



DESENVOLVIMENTO DE SERVIÇOS CLIMÁTICOS PARA RECURSOS SOLAR E EÓLICO PARA DIVERSAS ESCALAS E PÓSSIVEIS IMPACTOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

Relatório 5/5 - Quantificação da Disponibilidade Futura do Recurso Eólico no Brasil – Análises e Resultados

Graziela Luzia

Elaborado por: **Graziela Luzia**

Essa publicação foi realizada por uma equipe formada por consultores independentes sob a coordenação da Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável, por meio do projeto Ampliação dos Serviços Climáticos para Investimentos em Infraestrutura (CSI).

Este projeto foi pactuado no âmbito da Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável, por meio da parceria entre o Ministério do Meio Ambiente do Brasil e a Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ), no âmbito da Iniciativa Internacional para o Clima (IKI, sigla em alemão), do Ministério Federal do Meio Ambiente, Proteção da Natureza e Segurança Nuclear (BMU, sigla em alemão).

Participaram desse processo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a Empresa Eletrosul/ Eletrobrás e a Defesa Civil de Santa Catarina.

Todas as opiniões aqui expressas são de inteira responsabilidade dos autores, não refletindo necessariamente a posição da GIZ e do MMA. Este documento não foi submetido à revisão editorial.

EQUIPE TÉCNICA - MMA

Hugo do Valle Mendes (coordenação)
Adriana Brito da Silva
Jaqueline Leal Madruga

EQUIPE TÉCNICA - GIZ

Ana Carolina Câmara (coordenação)
Eduarda Silva Rodrigues de Freitas
Pablo Borges de Amorim

EQUIPE TÉCNICA - EPE

Angela Livino
Jeferson Soares
Gustavo Brandão
Haydt de Souza

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

André Rodrigues Gonçalves
Rodrigo Costa

Ministério do Meio Ambiente

Esplanada dos Ministérios, Bloco B, Brasília/DF, CEP
70068-901
Telefone: + 55
61 2028-1206

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Sede da GIZ: Bonn e Eschborn
GIZ Agência Brasília
SCN Quadra 01 Bloco C Sala 1501
Ed. Brasília Trade Center - 70.711-902 Brasília/DF
T + 55-61-2101-2170
E giz-brasilien@giz.de
www.giz.de/brasil

A encargo de:

Ministério Federal do Ambiente, Proteção da Natureza e Segurança Nuclear (BMU) da Alemanha

BMU Bonn:

Robert-Schuman-Platz 3
53175 Bonn, Alemanha
T +49 (0) 228 99 305-0

Diretora de Projeto:

Ana Carolina Câmara

T +55 61 9 99 89 71 71
T +55 61 2101 2098

E ana-carolina.camara@giz.de



SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	2
1. INTRODUÇÃO	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
3. METODOLOGIA.....	12
3.1 Base de dados observacionais consolidada	12
3.2 Modelo climático regional Eta/CPTEC.....	12
3.3 Correção de viés	14
4. RESULTADOS	16
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fator de escala c para os meses de janeiro (a), abril (b), julho (c) e outubro (d), do período histórico.....	17
Figura 2. Fator de forma k para os meses de janeiro (a), abril (b), julho (c) e outubro (d) do período histórico.	18
Figura 3. Pico do fator de escala c para o período histórico, com valor de velocidade do vento (m/s).	19
Figura 4. Projeções de pico do fator de escala c para o futuro próximo (2006-2040), meio do século (2040-2070) e final do século (2070-2099) para o cenário RCP4.5 pelos modelos HadGEM2ES, MIROC5 e CanESM2, com valor de velocidade do vento (m/s).....	20
Figura 5. Projeções de pico do fator de escala c para o futuro próximo (2006-2040), meio do século (2040-2070) e final do século (2070-2099) para o cenário RCP8.5 pelos modelos HadGEM2ES, MIROC5 e CanESM2, com valor de velocidade do vento (m/s).....	21
Figura 6. Pontos de avaliação do comportamento dos modelos no ciclo diurno.	23
Figura 7. ciclos sazonais do fator de escala c para os pontos P1 ((a) e (b)), P2 ((c) e (d)) e P3 ((e) e (f)), considerando os cenários de RPC's 4.5 ((a), (c) e (e)) e 8.5 ((b), (d) e (f)), simulados pelos modelos HadGEM2ES, CanESM e MIROC5.....	25
Figura 8. Projeções para a fator de escala c de Weibull realizadas pelo modelo climático HadGEM2ES.	27
Figura 9. Projeções para a fator de escala c de Weibull realizadas pelo modelo climático MIROC5.	28
Figura 10. Projeções para a fator de escala c de Weibull realizadas pelo modelo climático CanESM2.	29

Figura 11. Variação do fator de escala c considerando as simulações realizadas pelos modelos climáticos HadGEM2ES e MIROC5.	30
Figura 12. Projeções para a fator de forma k de Weibull realizadas pelo modelo climático HadGEM2ES.	32
Figura 13. Projeções para a fator de forma k de Weibull realizadas pelo modelo climático MIROC5.	33
Figura 14. Projeções para a fator de forma k de Weibull realizadas pelo modelo climático CanESM2.	34
Figura 15. Variação do fator de forma k considerando as simulações realizadas pelos modelos climáticos HadGEM2ES e MIROC5.	35

1. INTRODUÇÃO

Para que se possa reduzir os impactos das mudanças climáticas, o sistema energético precisa passar por um processo de descarbonização (CRONIN; ANANDARAJAH; DESSENS, 2018). Uma transição para outros recursos de fontes renováveis, além daqueles de origem hidráulica no sistema de energia poderia ajudar a atingir a meta de redução de CO₂ no Brasil (BRAZIL, 2015), mitigando os impactos das mudanças do clima. Entretanto, importantes fontes de energia renováveis, como o vento e a radiação solar são extremamente variáveis, o que significa que são altamente dependentes das condições do tempo e de qualquer variação espacial ou temporal deste.

O Plano Decenal de Expansão de Energia (EPE, 2019) projeta uma participação das fontes renováveis (excluindo fontes hídricas) de até 35% na matriz energética para a próxima década. Com o crescimento da participação da fonte eólica, faz-se necessário conhecer melhor o seu comportamento no que se refere a disponibilidade temporal e espacial, se o seu comportamento continuará condizente com o histórico ou se haverá alguma alteração do seu potencial, proveniente das mudanças climáticas.

Este documento apresenta o relatório da elaboração do Produto 5, “Quantificação da disponibilidade futura do recurso eólico no Brasil – análises e resultados”, fruto da consultoria contratada pela Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável (GIZ) no Brasil e pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) no âmbito do projeto “Ampliação dos Serviços Climáticos em Investimentos de Infraestrutura” (CSI), subprojeto “Desenvolvimento de serviços climáticos para recursos solar e eólico para diversas escalas e possíveis impactos de alterações climáticas”. Um estudo sobre os sistemas meteorológicos que atuam no Brasil, em diferentes escalas

espaciais e temporais e seus possíveis impactos nos recursos de energia renováveis foi apresentado no Produto 2 desta consultoria (MMA E GIZ, 2019a). Adicionalmente, uma base de dados climatológica (aproximadamente 30 anos de dados) dos parâmetros de distribuição de Weibull produzida com dados corrigidos de reanálises foi desenvolvida e apresentada no Produto 3 (MMA E GIZ, 2019b), com o intuito de servir como dado observado para corrigir as projeções dos modelos climáticos. Os fatores de escala e de forma mensais para o período histórico (neste estudo considerado entre 1979-2005) podem ser conferidos para todo o Brasil nos mapas do Produto 3. Para o produto 5, foi solicitada uma análise das projeções climáticas para o recurso eólico, produzidas por um modelo climático de mesoescala e aninhado em três diferentes modelos globais e para dois diferentes cenários de emissão de CO₂.

A vantagem em utilizar-se diferentes simulações é poder avaliar a variabilidade entre modelos com diferentes sensibilidades climáticas e assim, conhecer e interpretar todos os possíveis cenários, levando-se em conta a dispersão entre as suas saídas. Além disto, os caminhos de emissão de CO₂ que levarão às mudanças climáticas são incertos, por este motivo, diferentes cenários representativos de concentração de CO₂ (da sigla em inglês, RCP) são utilizados para expandir a análise. Adicionalmente, o estudo também apresenta o diferencial de utilizar dados com correção de erros sistemáticos para as projeções, o que não se percebe na literatura em trabalhos de semelhante propósito e complexidade.

O objetivo deste relatório é fornecer as informações necessárias sobre o Produto 5, desde a origem dos dados simulados, a metodologia utilizada para o ajuste do período histórico e projeções, além dos resultados do produto. O relatório está organizado da seguinte forma: a seção 2 apresenta uma revisão da literatura; a seção 3 descreve a metodologia

utilizada para a elaboração do produto em todas as suas fases, enquanto a seção 4 apresenta os resultados. As considerações finais são apresentadas na seção 5.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diferentemente de outros continentes, sobre os quais pode-se encontrar recentes revisões de literatura que apresentam diversos trabalhos focados na análise de possíveis impactos futuros das mudanças climáticas na disponibilidade do recurso eólico, como por exemplo na Europa (CRONIN; ANANDARAJAH; DESSENS, 2018) e na América do Norte (CRAIG et al., 2018), a América do Sul em geral e o Brasil possuem trabalhos escassos abordando este tema. Nos últimos 10 anos, estudos que utilizam modelagem climática para projetar cenários avançaram em complexidade e confiabilidade, na medida em que as ferramentas evoluem e novas técnicas de refinamento de grade e correção de vieses vão sendo incorporadas.

O estudo publicado por Breslow e Sailor, (2002) aponta uma diminuição de 1 a 4,5% na velocidade do vento associada às Mudanças Climáticas Globais para um período de 100 anos na região continental dos Estados Unidos da América. O trabalho utilizou dois GCMs, sendo um o *Canadian Climate Center model* e o outro o *Hadley Centre model* do *UK Meteorological Office*. Venäläinen et al. (2004) concluíram em um estudo realizado para a Finlândia que o potencial climatológico do vento pode ter um aumento 2 a 10% em condições de Mudanças Climáticas Globais.

Pryor et al. (2005) usaram um método de *downscaling* a partir de cinco GCMs e 46 estações no Norte da Europa e apontaram uma diminuição da velocidade média e na densidade do vento para as projeções climáticas entre 2080-2100. Sailor et al. (2000) realizaram um estudo sobre os efeitos das Mudanças Climáticas no vento em superfície para o Nordeste dos Estados Unidos utilizando métodos de *downscaling* das projeções climáticas futuras de quatro GCMs (*GISS, MPI, GFDL, MRI*) para os cenários de emissões do IPCC, *SRES A1B* e *A2*. O trabalho indica uma diminuição de 40% no recurso

eólico para ambos os cenários nos períodos de primavera e verão. Ainda, segundo os autores, os resultados dos GCMs apresentam ligeiras diferenças no potencial eólico e tornam-se ainda menores após a regionalização das séries temporais.

Para o Brasil, Lucena et al. (2010) produziram projeções para a velocidade do vento para o Brasil com resolução de 50 km x por 50 km e em dois cenários de emissão de CO₂ (A2 e B2), utilizando o modelo regional PRECIS do CPTEC/INPE aninhado ao modelo de circulação geral HadCM3 com a técnica de *downscaling*. Os autores encontraram evidência de um aumento no potencial de geração eólica no Brasil devido às mudanças climáticas globais de até 20%, principalmente para a região Nordeste (NEB) e uma redução significativa em uma área localizada no oeste da Amazônia. Lucena et al. (2010) também chamam a atenção ao fato de que os resultados dependem da qualidade do único modelo utilizado, e considerando a grande dispersão entre diferentes modelos de circulação geral, os resultados do trabalho carregam grande incerteza. Buscando refinar um pouco mais estes resultados, Pereira et al. (2013) produziu projeções climáticas com o modelo de mesoescala Eta/CPTEC aninhado ao modelo de circulação geral HadCM3, gerando séries de 40 km de resolução horizontal e 6h de resolução temporal. As projeções para o cenário A1B mostraram uma tendência de em média 15%-30% de aumento para a maior parte da região Nordeste, com algumas regiões com intensificação de mais de 100%, principalmente ao norte desta região. A estação do outono foi a que apresentou a maior tendência de aumento com relação ao período baseline. Para a região Sul, o modelo mostrou uma tendência de aumento um pouco menos expressiva, com picos de 20% em algumas áreas.

Em especial, as particularidades da região costeira do NEB permitem uma forte penetração de energia eólica, a qual deverá gerar 57% do fornecimento de energia elétrica do NEB até 2020. À medida que a precipitação na região NE é suscetível às mudanças climáticas, prevê-se que a energia eólica possa substituir a disponibilidade hidrelétrica perdida (De Jong et al., 2017). Entre os anos de 2000 e 2015, a produção de energia eólica aumentou de 19MW para 12,2GW (PES et al, 2017). Uma vez que o vento é uma fonte de energia intermitente, fortemente determinada pelas condições climáticas, efeitos importantes na geração de energia eólica podem ser esperados a médio e longo prazo, em particular relacionados aos impactos dos ventos extremos (PES et al., 2017).

De Jong et al. (2019) estimou o impacto das mudanças climáticas nos recursos de energia solar e eólica do Brasil utilizando dados de downscaling com o Eta, a partir de três diferentes modelos climáticos globais (HADGEM2-ES, MIROC5 e CANESM2), quantificando as mudanças percentuais na radiação solar média e na velocidade do vento nas décadas de 2030 e 2080 em cenários de altas emissões, os comparando com os dados da linha de base do final do século XX. Para o potencial de energia eólica, projetou-se um aumento substancial na maior parte do Brasil e, em alguns locais onde operam os principais parques eólicos, a geração de energia poderá aumentar em mais de 40%. Os autores também afirmam que apesar de algumas inconsistências entre as projeções de longo prazo dos três diferentes modelos climáticos, os resultados desta pesquisa são importantes no contexto das mudanças climáticas regionais e no planejamento de recursos de energia renovável. Importante notar, no entanto, que os dados das simulações climáticas foram utilizados neste trabalho sem nenhum tipo de remoção de viés.

Reboita et al. (2018) projetou mudanças na intensidade do vento e na densidade de potência para 100 m de altura na América do Sul e oceanos adjacentes, por meio de técnicas de redução de escala e *ensemble*, aninhando o modelo climático regional versão 4 (RegCM4) a partir das saídas dos modelos climáticos globais MPI-ESM-MR, GFDL-ESM2-M e HadGEM2-ES, considerando o cenário RCP8.5. O conjunto RegCM4 no clima atual (1979–2005) foi validado através de comparações com as reanálises do ERA-Interim e representam bem os padrões espaciais do vento, com algumas diferenças em relação à intensidade, principalmente no centro-leste do Brasil e na Patagônia. A comparação entre o clima futuro (2020-2050 e 2070-2098) e o atual mostra que há um aumento na intensidade do vento e na densidade de potência no norte da América do Sul, centro-leste do Brasil (exceto no verão) e latitudes superiores a 50° S. Esse aumento é mais intenso no período 2070-2098.

O Grupo I do IPCC AR5 (2012), através de estudos da circulação geral da atmosfera (GCM) para cenários climáticos futuros simulados por modelos de GCM, apontou mudanças na circulação geral da atmosfera e índices de variabilidade climática na pressão ao nível do mar, vento, altura geopotencial além de variabilidade multidecadal na circulação geral de larga escala no sobre o oceano Atlântico e Pacífico. O relatório concluiu que o vento de leste nas médias latitudes aumentou em ambos os hemisférios. No entanto, devido à deficiência das observações, o Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (MURRAY; EBI, 2012) afirmou que o nível de confiança na análise de tendências de vento em superfície é baixa, devido ao fato de que as medidas de vento sobre o continente e o oceano são obtidas a partir de diferentes métodos de observação; por exemplo, primeiros registros de vento no oceano foram realizados baseados na velocidade dos navios através da água, o impulsionamento das velas ou na

estimativa visual através das características da superfície do oceano, as quais eram convertidas em velocidade do vento por meio da escala de Beaufort. As medidas de vento com o uso de anemômetros só iniciaram em 1950.

3. METODOLOGIA

3.1 Base de dados observacionais consolidada

A base de dados observacionais consolidada foi produzida a partir da combinação de dados de reanálises corrigidas com dados medidos *in situ* fornecidos pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Detalhes da metodologia para o desenvolvimento da base podem ser encontrados em MMA e GIZ (2019b).

3.2 Modelo climático regional Eta/CPTEC

O modelo Eta foi desenvolvido nos anos 70, pela Universidade de Belgrado em parceria com o *Federal Hydrometeorological Institute* (Iugoslávia) para previsão numérica de tempo. O modelo tornou-se operacional na Iugoslávia em 1978 e posteriormente a coordenada eta foi criada por Mesinger et al. (1988) para reduzir os erros cometidos pela coordenada sigma. O modelo de área limitada Eta (BLACK, 1994; MESINGER et al., 1988) foi utilizado operacionalmente no Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) de 1996 até 2018. Este modelo regional se propõe a prever com maiores detalhes sistemas meteorológicos de mesoscala, tais como fenômenos associados a frentes, orografia, brisa marítima e tempestades severas. A resolução horizontal atual utilizada na América do Sul é de 20 km, enquanto a vertical é de 38 níveis, com as seguintes variáveis prognósticas: temperatura do ar, componente zonal e meridional do vento, umidade específica, hidrometeoros de nuvens, pressão à superfície e energia cinética turbulenta.

Os dados utilizados neste trabalho são provenientes do modelo regional Eta 20 km, executado com as condições de contorno de três diferentes modelos globais do CMIP5 (CHOU et al., 2014a, 2014b), a saber:

HadGEM2-ES, MIROC5 e CanESM, no Centro de Previsão de Tempos e Estudos Climáticos – CPTEC. As integrações do clima futuro realizadas com este modelo são baseadas nos caminhos representativos de concentração dos Gases de Efeito Estufa (GEE) e suas forçantes radiativas no clima, nomeadas de *Representative Concentration Pathway*. Os RCPs, como definidos em Moss et al. (2010), são cenários da evolução dos gases de efeito estufa na atmosfera até o ano de 2100 que levam em conta não somente a concentração dos gases (principalmente CO₂), mas também como se dará o comportamento da curva (apenas crescente, com estabilização ou com ponto de retorno no ano de 2100) nestes cenários (Tabela 1). Os dados do Eta utilizam os cenários RCP4.5 e RCP8.5 (destacados na Tabela 1), que representam, respectivamente, uma contribuição de 4.5 e 8.5 W/m² de energia como forçante radiativa. Trata-se de um cenário intermediário e de um cenário pessimista nos quais são baseadas as projeções disponibilizadas pelo CPTEC, com o período histórico compreendendo os anos entre 1979 e 2005 e as projeções se estendendo até o ano de 2099 para os conjuntos de dados forçados por cada modelo global.

Tabela 1: Representative Concentration Pathways (RCP)

Nome	Forçante radiativa	Concentração (p.p.m.)	Caminho
RCP8.5	>8.5 W/m ² em 2100	>1.370 para CO ₂ em 2100	Crescente
RCP6.0	~6 W/m ² com estabilização a partir de 2100	~850 para CO ₂ (com estabilização a partir de 2100)	Estabilização
RCP4.5	~4.5 W/m ² com estabilização a partir de 2100	~650 para CO ₂ (com estabilização a partir de 2100)	Estabilização
RCP2.6	Pico em ~3 W/m ² antes de 2100 e então declínio	Pico em ~490 para CO ₂ antes de 2100 e então declínio	Pico e declínio

Fonte: adaptado de Moss et al. (2010).

3.3 Correção de viés

Os modelos numéricos possuem um notório viés na simulação da velocidade do vento, causados pelas simplificações do modelo, das parametrizações dos processos atmosféricos e das suas condições iniciais; estas limitações resultam em erros sistemáticos mais altos que as incertezas de velocidade de vento observados em estações meteorológicas. Aceitadas estas limitações, verifica-se a real motivação para a realização desta etapa do trabalho, uma vez que refinamentos e a obtenção de simulações com menores erros são necessários para diversas aplicações.

No Produto 3, descrito em (MMA E GIZ, 2019b) foi gerada uma base consolidada, com resolução temporal e espacial compatíveis com os modelos climáticos que estão sendo usados neste relatório. Uma breve descrição desta metodologia é apresentada nos parágrafos seguintes, sendo está aplicada para cada ponto de grade dos modelos HadGEM2-ES, MIROC5 e CanESM, em todos os cenários já mencionados.

Os dados de velocidade de vento do modelo Eta foram corrigidos com base nos parâmetros da distribuição de Weibull. Ou seja, foi extraída uma série do modelo Eta em cada ponto de grade, e com isso foram calculados os parâmetros c e k dos dados simulados e da base de Reanálise Combinada. As diferenças entre os dados foram convertidas em percentual e a partir disto, foram gerados mapas de correção, sendo estes aplicados na base de dados do período histórico. Uma vez que o método foi validado, ele foi aplicado para o período futuro, nos dados de projeções climáticas.

A fim de ajustar adequadamente as saídas do Eta, assegurando variabilidades horária, diária e interanual de maneira realista, foram implementadas as correções descritas – que são na realidade uma abordagem baseada na correção de uma CDF, onde corrige-se a

frequência do vento. Como resultado desse processo, há a tendência em reduzir significativamente o erro sistemático inerente no modelo Eta.

O princípio do método consiste na utilização de função de distribuição acumulada de velocidade do vento para identificar a diferença sistemática entre os parâmetros observados e os parâmetros simulados dentro de um determinado período no passado, e posteriormente, corrigir estas diferenças na velocidade do vento das projeções climáticas. Assim como com todas as abordagens de *downscaling* estatístico, supõe-se que o viés em relação as simulações históricas serão constantes no período futuro da projeção (THRASHER et al., 2012).

4. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados das projeções dos modelos climáticos para diferentes cenários de emissão para o Brasil. Todos os dados, sejam do período histórico ou de projeções receberam ajustes (remoção de erros sistemáticos) de acordo com a metodologia apresentada na seção 3.3. A nomenclatura referente aos períodos futuros “futuro próximo”, “meio do século” e “final do século” será utilizada no texto para facilitar a conexão com as Figuras, embora algumas legendas possam aparecer nas Figuras originalmente como “timeslices” (2006-2040, 2040-2070 e 2070-2099, respectivamente). As Figuras 1 e 2 apresentam o período histórico para os fatores de forma e escala. O modelo aqui apresentado é uma escolha aleatória, pois os três modelos avaliados apresentam resultados absolutamente próximos entre si após os ajustes com a base observada (MMA E GIZ, 2019a), o que era esperado. Os resultados dos outros modelos foram omitidos para evitar redundância e podem ser conferidos nos dados anexados ao relatório.

Todos os dados produzidos para este trabalho estão em escala mensal climatológica, ou seja, cada dado representa um período de aproximadamente 30 anos, seja do período histórico ou futuro, de um mês específico. Para apresentação dos resultados, foram escolhidos quatro meses representativos das estações do ano, para ilustrar a variabilidade intra-anual do vento no território brasileiro ao longo do ano.

A Figura 1 apresenta a distribuição espacial do fator de escala c de Weibull para o período histórico. É possível perceber que a costa e o interior do NEB apresentam sempre os maiores valores de c ao longo do ano, especialmente nos meses de julho e outubro, acompanhando a intensificação dos alísios (em agosto-setembro). A região amazônica apresenta os menores valores da escala para o ano inteiro e nas demais

regiões não se percebe uma variação significativa, exceto pela costa sudeste, que exibe um mínimo em julho.

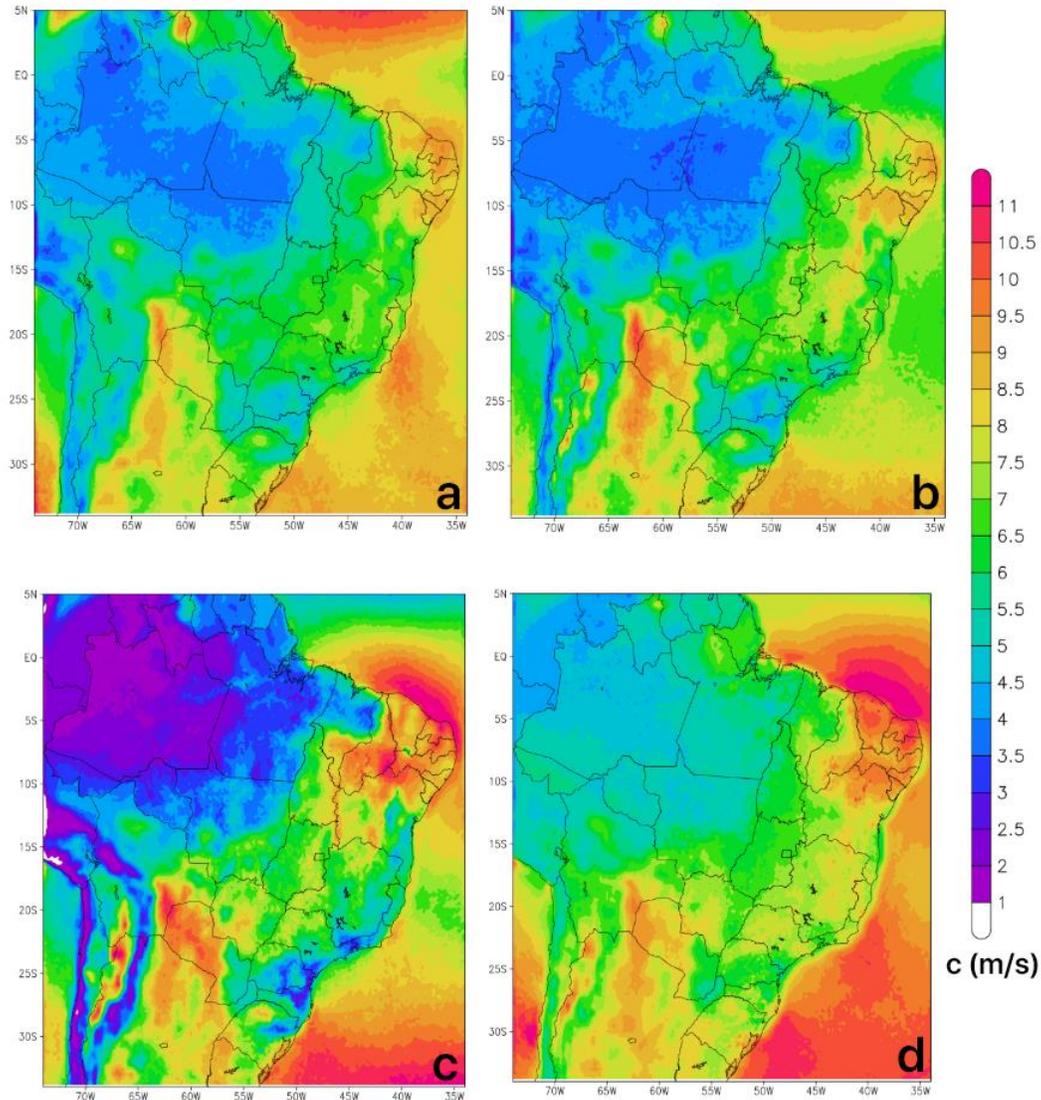


Figura 1. Fator de escala c para os meses de janeiro (a), abril (b), julho (c) e outubro (d), do período histórico.

Valores de fator de forma k de Weibull maiores que 3 podem ser encontrados na costa e interior do NEB ao longo do ano, indicando na média ventos relativamente constantes na região, como pode ser

observado para o período histórico na Figura 2. Valores mais elevados de k são percebidos no período de julho a outubro, pelo mesmo motivo já mencionado - a intensificação e a predominância dos ventos alísios - aliado ao afastamento da Zona de Convergência Intertropical para latitudes mais ao norte nesta época, reduzindo sua influência na diminuição dos ventos da região.

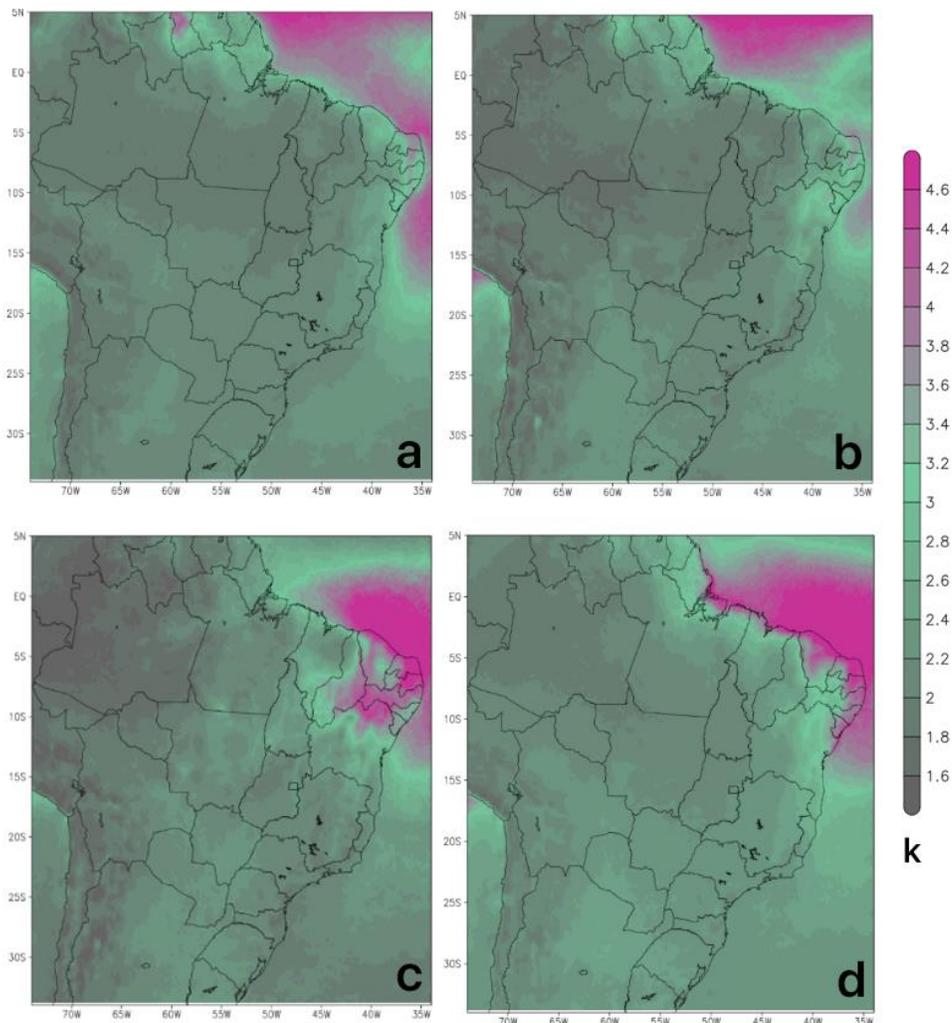


Figura 2. Fator de forma k para os meses de janeiro (a), abril (b), julho (c) e outubro (d) do período histórico.

As variações no comportamento da circulação geral da atmosfera ao longo do ano provocam variações significativas da velocidade do vento.

Estas variações estão relacionadas a variabilidade intra-anual da distribuição da irradiação solar e também efeitos de menor escala, como gradientes térmicos oceano-continente na costa e variações orográficas e térmicas no continente. A Figura 3 apresenta o pico do valor c ao longo do ano no período histórico e sintetiza as informações do período (mês do ano) em que o parâmetro de escala c é máximo junto da faixa de valores (em m/s) que cada ponto de grade apresenta através das cores e saturação da cor, respectivamente. Aqui também somente um modelo foi apresentado, devido a semelhança entre os modelos no período histórico. Os valores de c foram configurados para aparecer em intervalos acima de 6 m/s, para dar destaque aos locais com maiores velocidades.

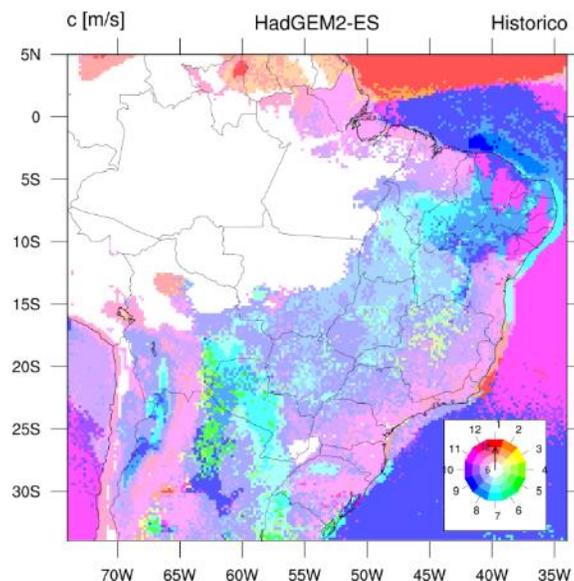


Figura 3. Pico do fator de escala c para o período histórico, com valor de velocidade do vento (m/s).

Alterações no clima e nos sistemas que impactam a América do Sul podem modificar o já referido ciclo sazonal do vento no Brasil nos próximos anos. A Figuras 4 e 5 mostram as projeções (mês do ano) do fator de escala c máximo nos três períodos avaliados: futuro próximo (2006-2040), meio do

século (2040-2070) e final do século (2070-2099), simulados para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 com os modelos HadGEM2ES, MIROC5 e CanESM2 (CanESM não possui dados para o final do século no cenário RCP8.5).

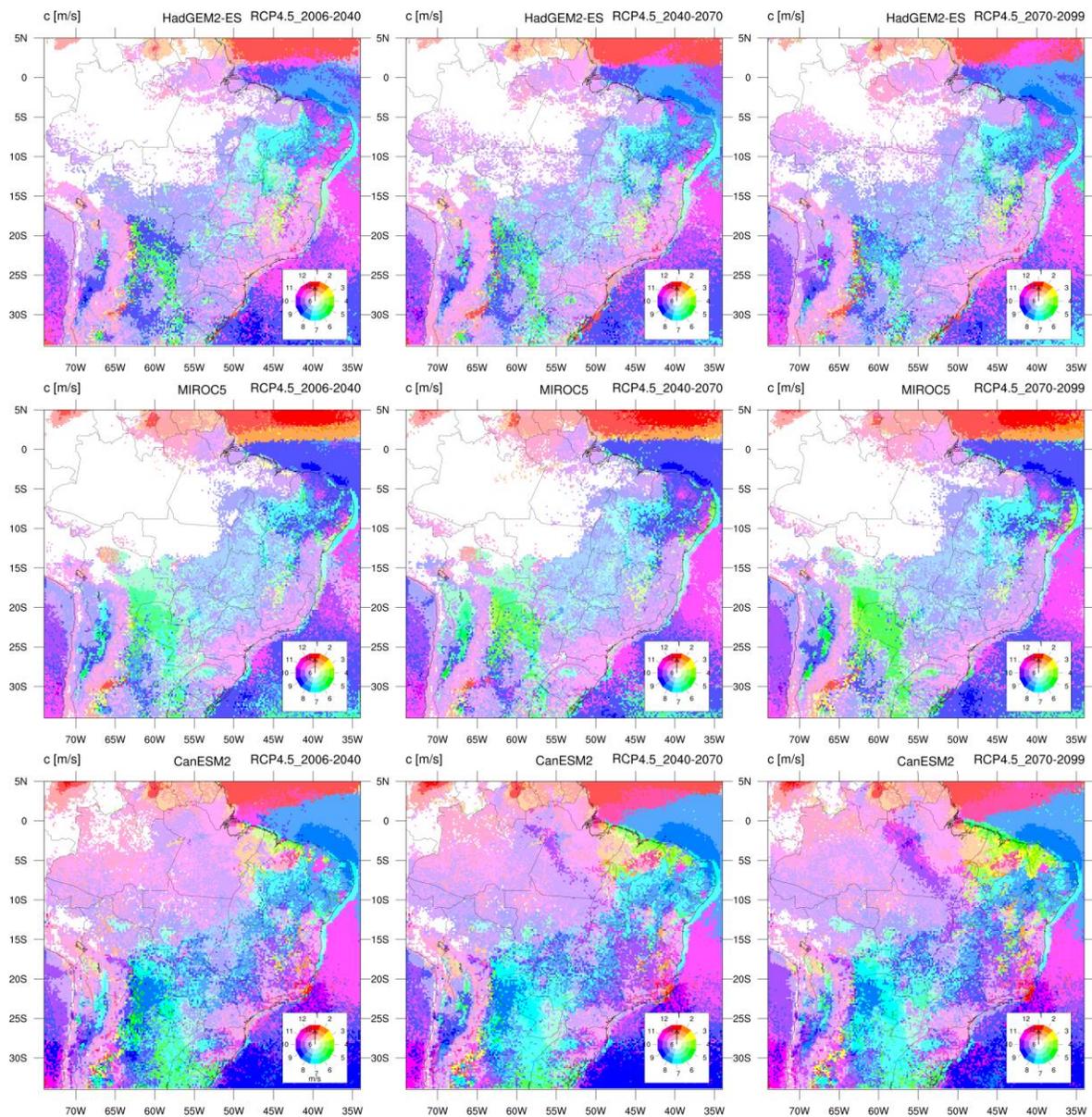


Figura 4. Projeções de pico do fator de escala c para o futuro próximo (2006-2040), meio do século (2040-2070) e final do século (2070-2099) para o cenário RCP4.5 pelos modelos HadGEM2ES, MIROC5 e CanESM2, com valor de velocidade do vento (m/s).

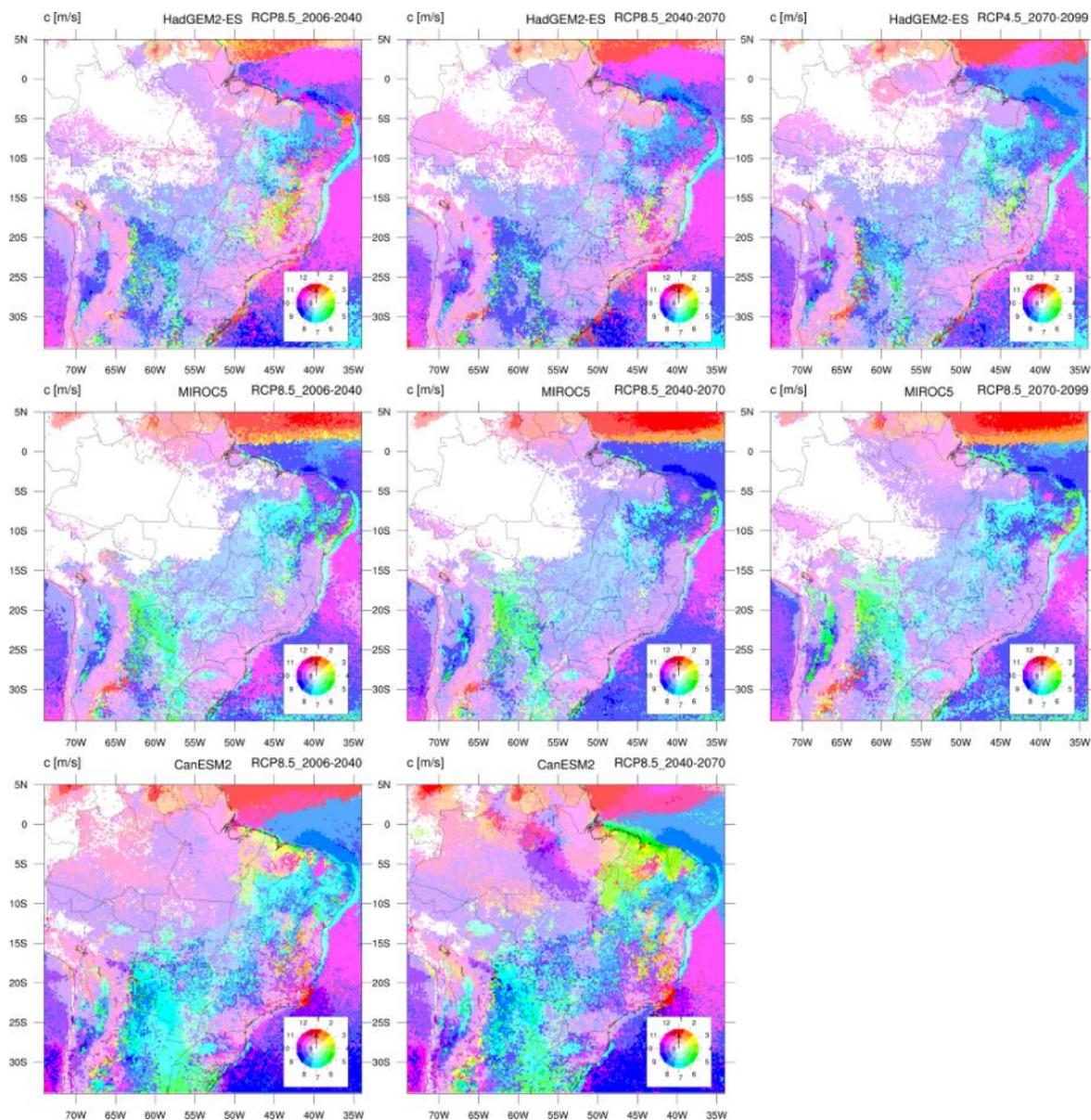


Figura 5. Projeções de pico do fator de escala c para o futuro próximo (2006-2040), meio do século (2040-2070) e final do século (2070-2099) para o cenário RCP8.5 pelos modelos HadGEM2ES, MIROC5 e CanESM2, com valor de velocidade do vento (m/s).

A tendência geral de que o mês com o valor máximo para o c pertencer ao segundo semestre do ano para a maior parte do Brasil parece se manter para todos os modelos e cenários. Podem ser verificadas feições com padrões bem definidos, em especial nas regiões onde o vento costuma ser mais intenso.

HadGEM2ES e MIROC5 projetam ao longo do próximo século que o pico do parâmetro de escala c ocorre de 30 a 60 dias (julho e agosto) antes do observado no período histórico (setembro e novembro), em especial no NEB. O MIROC5 projeta ainda mudança na costa do NEB do meio para o final do século, com o pico aparecendo no mês de abril. Já o CanESM2 também projeta um adiantamento do pico do parâmetro para a costa e interior do NEB, além de uma alteração significativa para a costa norte do NEB, com a mudança do pico de novembro para abril ou maio.

O cenário RCP8.5 mostra uma dispersão maior entre modelos, mas com as tendências de alteração do ciclo sazonal se confirmando em ambos os cenários. As projeções são bastante ruidosas no cenário RCP8.5, mas pode-se dizer que MIROC5 e CanESM2 projetam mais picos do parâmetro c para o mês de julho em pontos dispersos do território, em regiões com picos majoritariamente verificados no mês de novembro.

Buscando uma melhor visualização de possíveis transições do ciclo diurno em pontos de interesse, foram selecionados três pontos coincidentes com os locais com dados fornecidos pela EPE para o produto 3 (MMA e GIZ, 2019a), que podem ser observados na Figura 6.

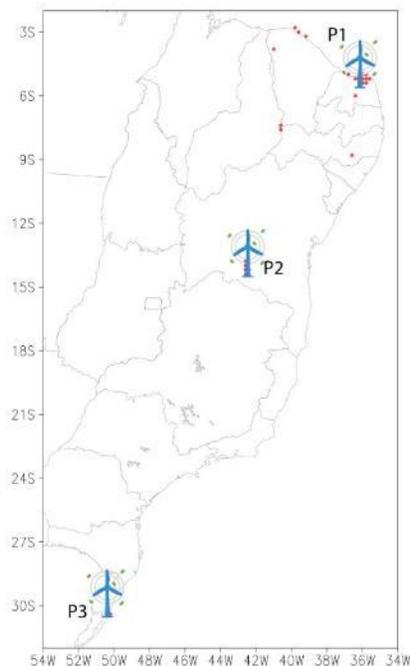


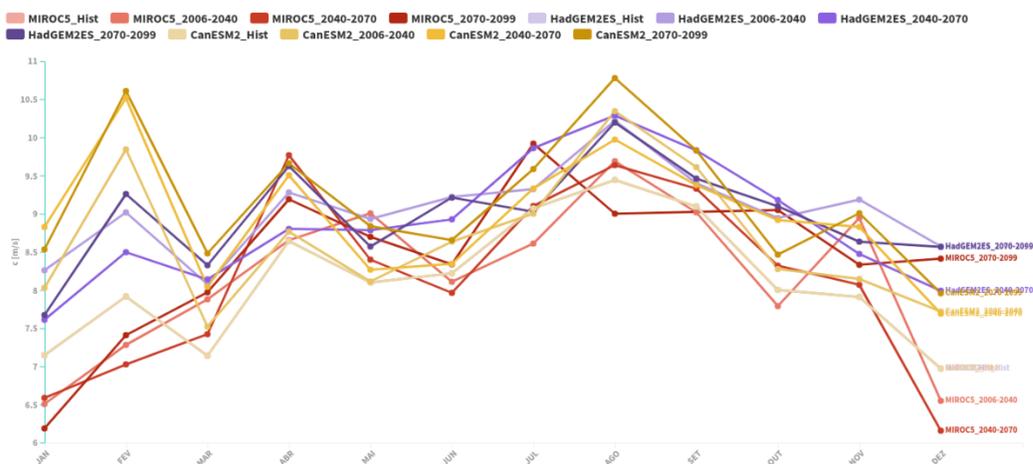
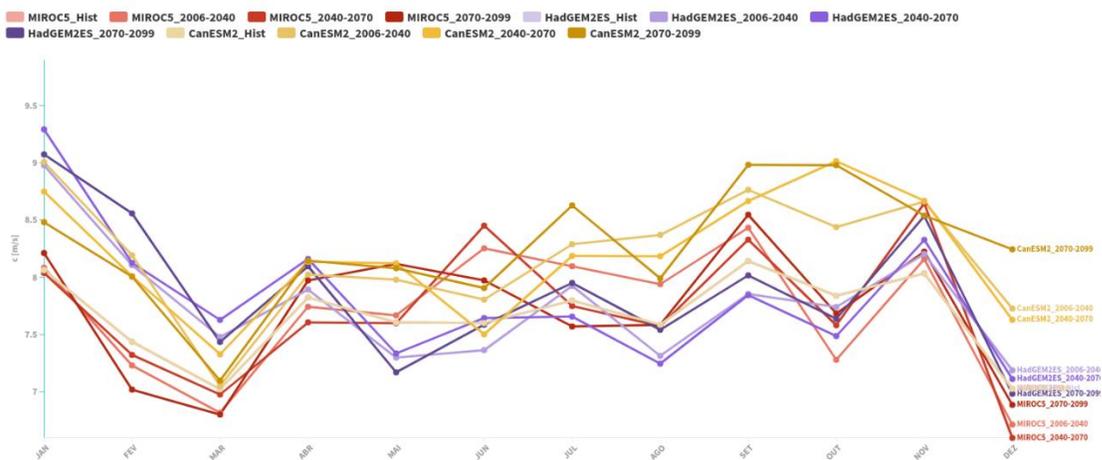
Figura 6. Pontos de avaliação do comportamento dos modelos no ciclo sazonal.

A Figura 7 (superior) mostra o ciclo sazonal de c para o ponto P1 no cenário RCP4.5, que está localizado sobre a costa do Rio Grande do Norte e possui um ciclo sazonal bem definido. O pico principal em setembro não parece se alterar de maneira significativa em nenhum dos períodos futuros simulados nos três modelos, com o cenário menos pessimista. No cenário RCP8.5 (Figura 8 superior), o HadGEM2ES projeta picos cada vez menores no mês de fevereiro, crescendo progressivamente para setembro. O CanESM projeta valores que tendem ao crescimento para o parâmetro, mas com uma relativa manutenção do ciclo sazonal em ambos os cenários.

O ponto P2 (Figura 7 intermediária), localizado no interior do estado da Bahia, não tem um ciclo bem definido. Isso pode ser explicado pelo fato desta região sofrer influência direta das regiões costeiras – como por exemplo na passagem de sistemas frontais – e também do próprio interior do país. Todos os modelos parecem apresentar um pico primário /

secundário em janeiro / agosto, com exceção do MIROC5, que tem o pico secundário em abril / maio.

O ponto P3 (Figuras 7 e 8 inferiores) fica no litoral do Rio Grande do Sul e também não apresenta um ciclo sazonal muito bem definido. entretanto, apesar da dispersão de valores entre os modelos, os máximos e mínimos relativos parecem se conservar em todos os períodos e cenários gerados por cada modelo. Para todos os pontos, as linhas referentes ao período histórico se sobrepõem devido ao fato de os dados serem iguais após a correção de viés para este período.



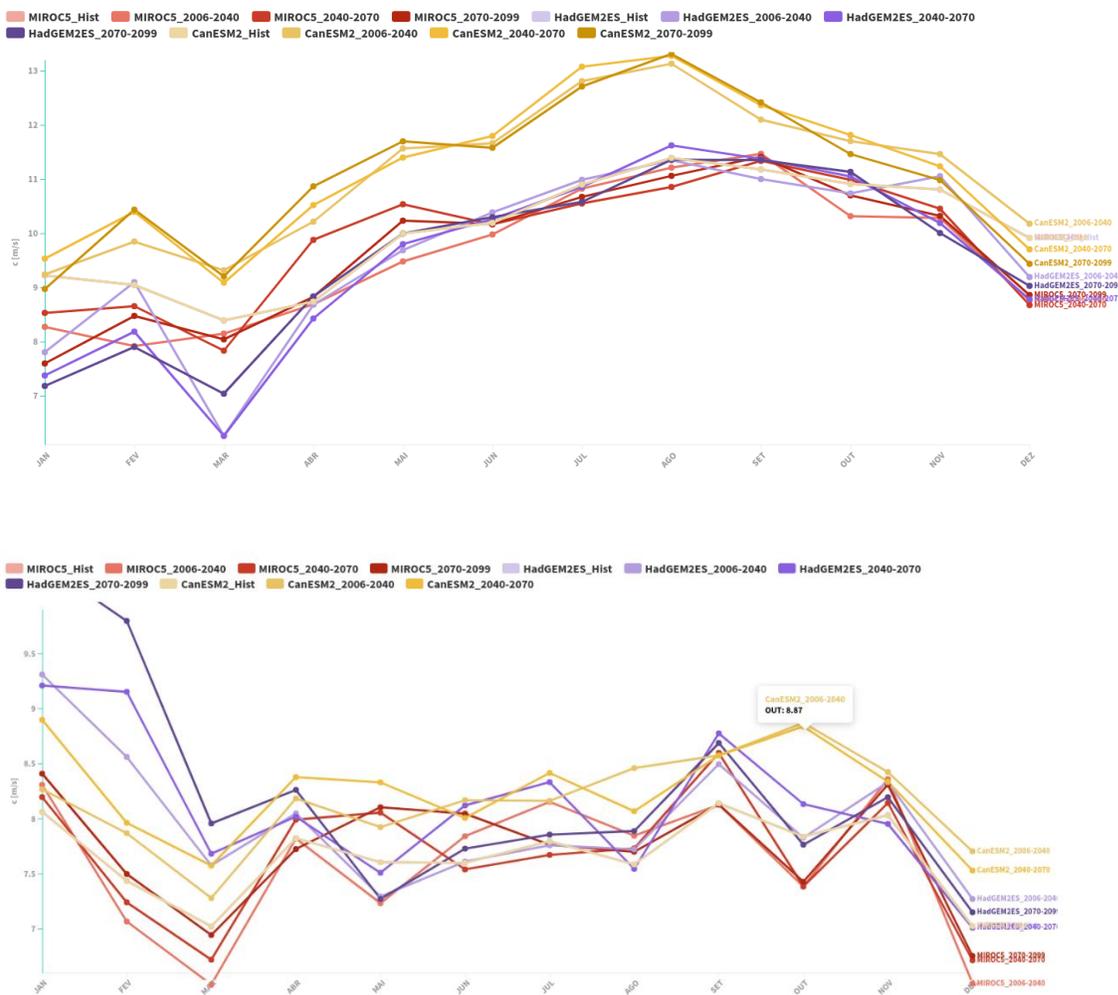


Figura 7. ciclos sazonais do fator de escala c para os pontos P1 (superior), P2 (intermediária) e P3 (inferior), considerando o cenário RPC 4.5 simulados pelos modelos HadGEM2ES, CanESM e MIROC5.

As Figuras 9, 10 e 11 apresentam os resultados das projeções realizadas pelos três modelos climáticos para a fator de escala c de Weibull. Já a Figura 12 apresenta a variação do parâmetro de escala c ao longo dos três períodos nos diferentes modelos em relação ao período histórico (1979-2005). Os resultados do modelo CanESM2 foram excluídos da análise por apresentarem valores muito discrepantes em relação as outras simulações realizadas, mas como já mencionado, constam na base de dados que está anexada a este produto.

Ambos concordam com uma redução no parâmetro de escala sobre o NEB no mês de janeiro, com aumento progressivo nos períodos futuros. O MIROC5 projeta uma área bem maior para a redução do parâmetro, chegando a marca de -20% em todo o NEB, com regiões mais localizadas sobre o interior e sua costa norte apresentando uma redução de 30 a 40% no parâmetro c. O HadGEM2ES projeta um aumento de 20% do parâmetro c entre o estado de São Paulo (SP) e o Paraná (PR), ainda no início do século.

Ambos os modelos projetam aumento de 20% no parâmetro c sobre a porção norte da Amazônia, e o modelo HadGEM2ES indica este aumento do Centro-Oeste até a Amazônia Ocidental. Para o mês de abril, o HadGEM2ES projeta aumento de 20% sobre algumas localidades no norte do país e o MIROC5 projeta um aumento de 20% sobre o NEB, a partir do meio para o final do século. Os meses de julho e outubro se assemelham ao mês de abril considerando as mudanças apresentadas pelo modelo HadGEM2ES, enquanto não se percebe nenhuma alteração relevante para o período nas simulações do modelo MIROC5.

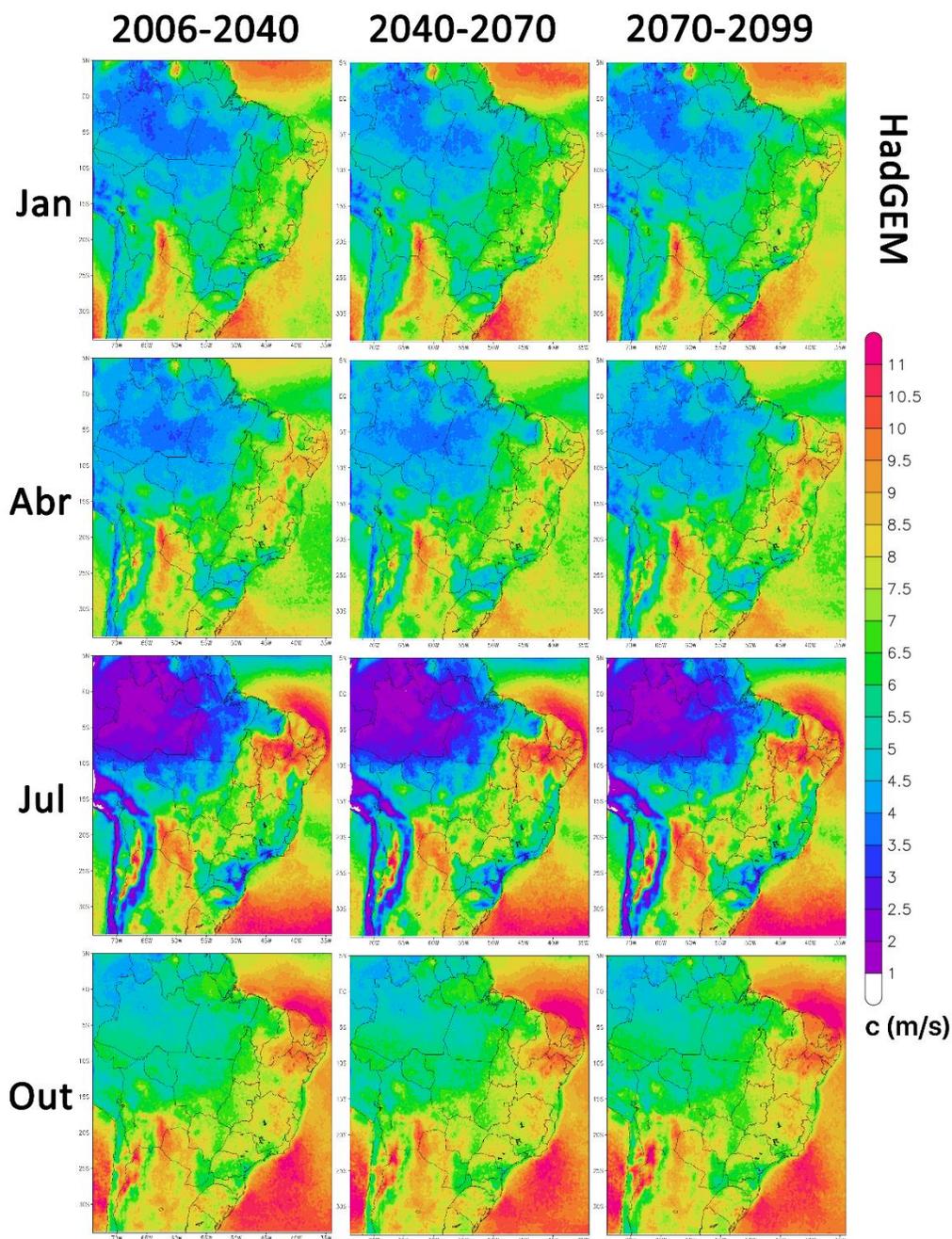


Figura 8. Projeções para a fator de escala c de Weibull realizadas pelo modelo climático HadGEM2ES.

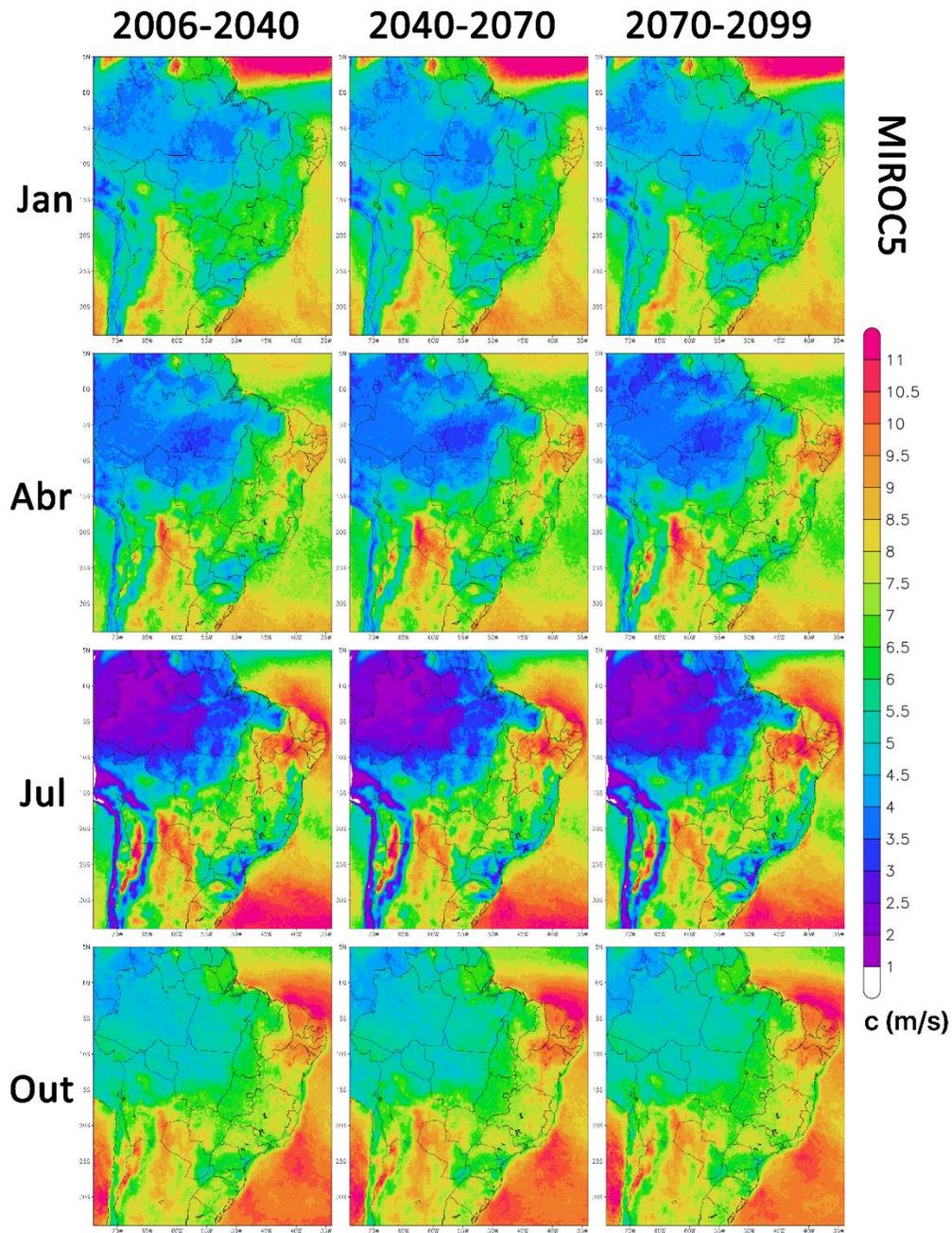


Figura 9. Projeções para a fator de escala c de Weibull realizadas pelo modelo climático MIROC5.

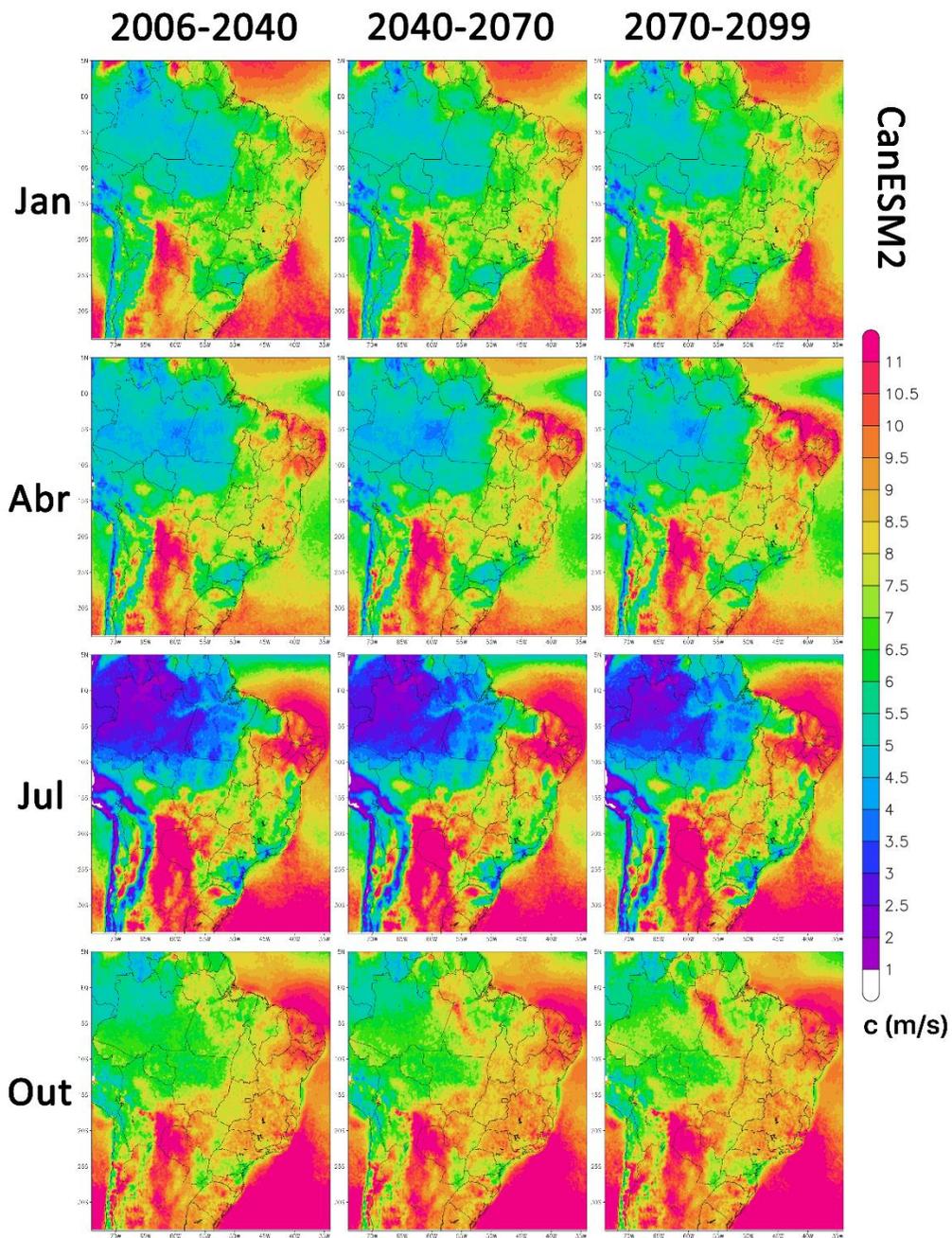


Figura 10. Projeções para a fator de escala c de Weibull realizadas pelo modelo climático CanESM2.

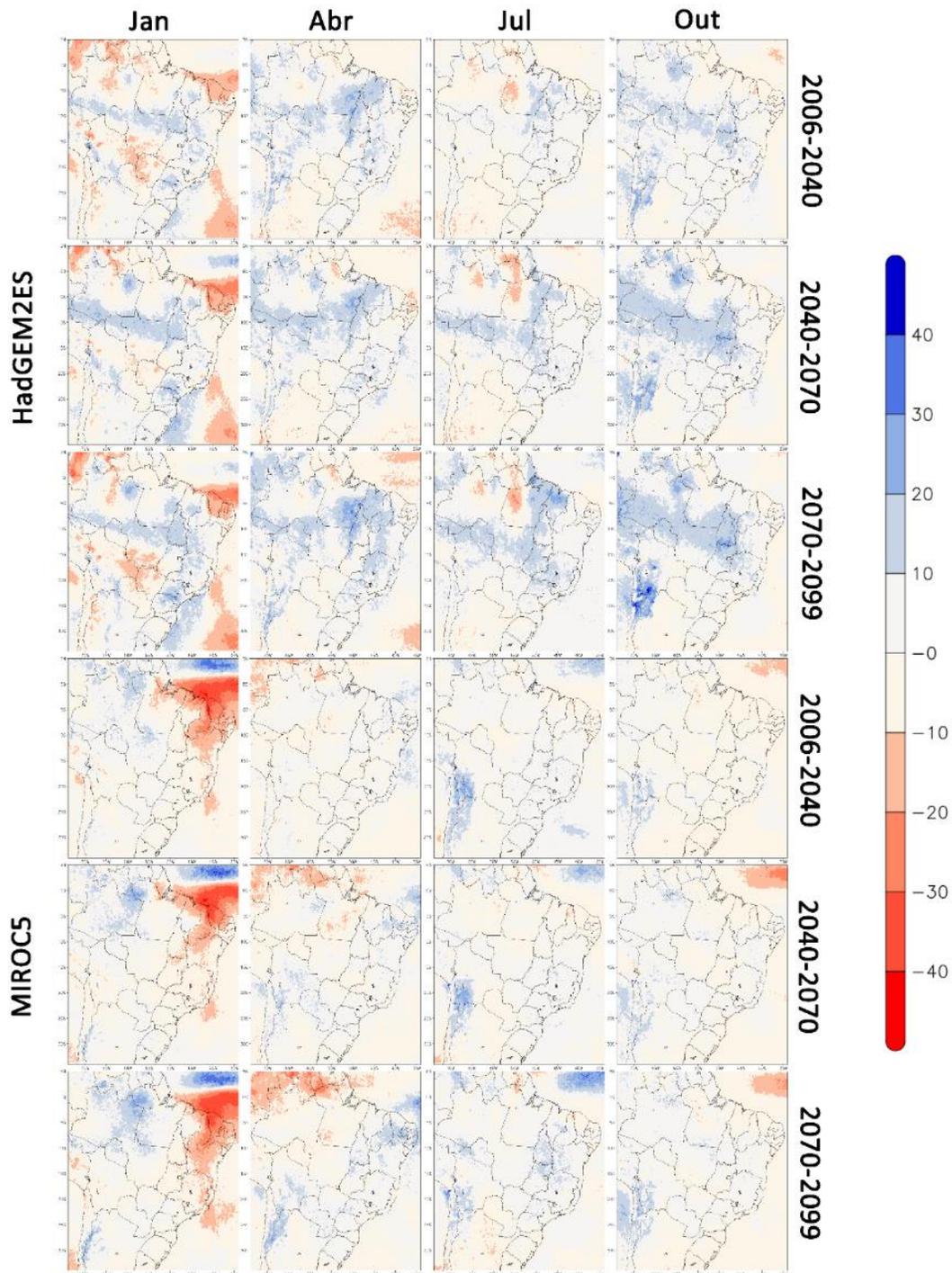


Figura 11. Variação do fator de escala c (m/s) considerando as simulações realizadas pelos modelos climáticos HadGEM2ES e MIROC5 em comparação ao período histórico.

Da mesma forma, as Figuras 13, 14 e 15 apresentam os resultados das projeções para o fator de forma k de Weibull para o cenário RCP4.5, a partir das simulações realizadas.

De um modo geral, a evolução observada para o mês de janeiro no parâmetro de forma k acompanha aquela já observada quando na análise do parâmetro c , onde são previstas reduções de 20% a 30% (com regiões onde os valores apresentam uma redução de até 40%) para a costa norte no NEB nos dois modelos. Entretanto, para o norte do estado da Bahia, o HadGEM2ES prevê um aumento de até 20% no parâmetro de forma de Weibull no futuro próximo e final do século, enquanto o MIROC5 projeta redução para o parâmetro em praticamente toda a região nordeste do país, independente do período.

Para o mês de abril, o HadGEM2ES indica um aumento de 10 a 20% sobre a Amazônia Oriental e também sobre o interior do NEB. Para julho é previsto um aumento de 10 a 30% sobre o interior do NEB para o futuro próximo, de acordo com o HADGEM2ES; também é previsto um aumento de 10 a 30% (com valores localizados de mais de 40%) sobre o estado do Maranhão e leste do Pará (PA), além de uma redução de 10 a 20% no oeste do mesmo estado. O MIROC5, por outro lado, projeta um aumento de 10 a 20% sobre o interior do NEB no futuro próximo e meio do século.

Os resultados observados para o mês de outubro apresentam reduções e aumentos dispersos. Destaca-se, entretanto, o aumento entre 10 a 20% dos valores observados nas simulações realizadas com o modelo HadGEM2ES para os três períodos, em uma área que vai do interior do NEB até a região Sudeste do País.

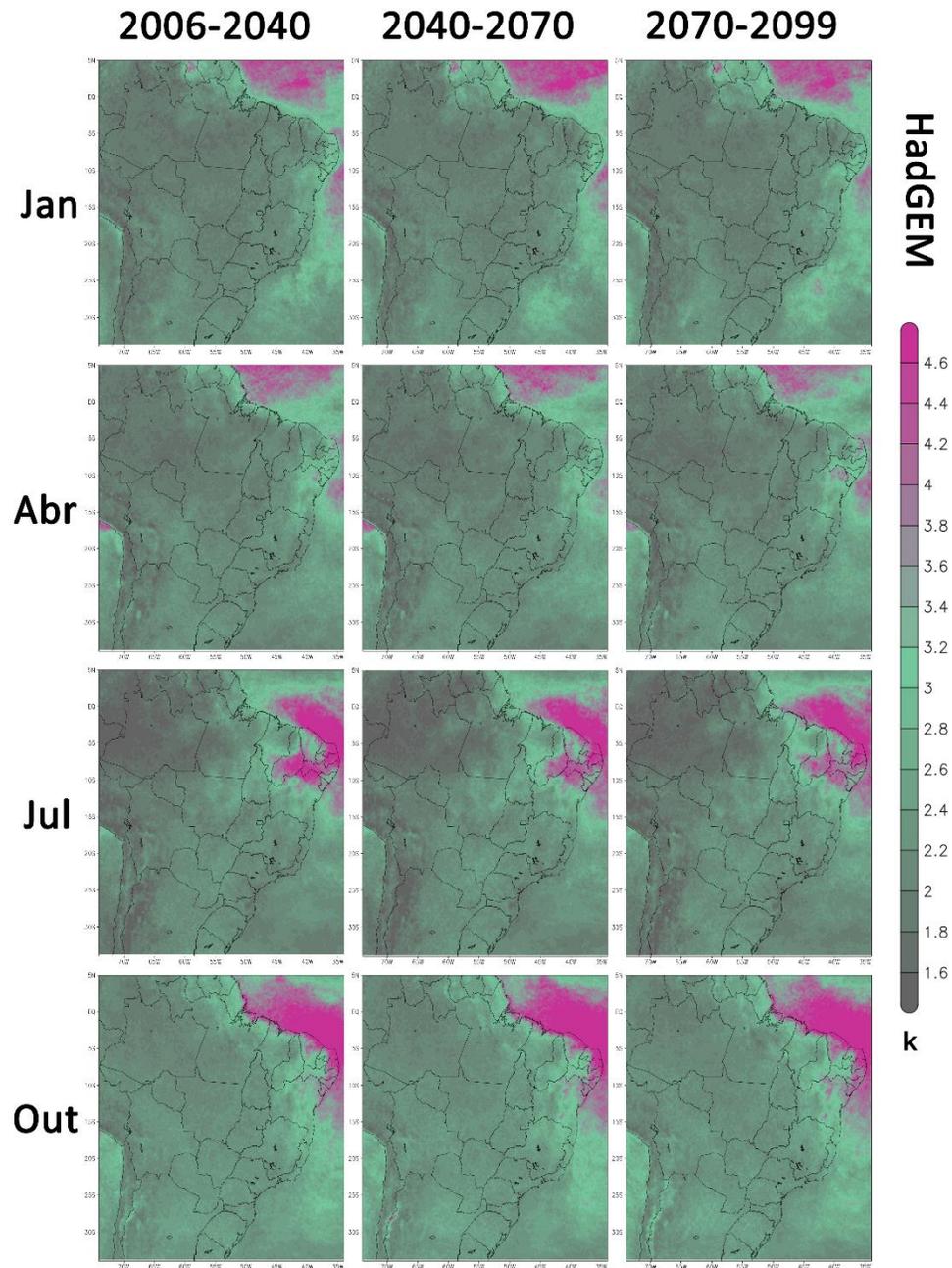


Figura 12. Projeções para a fator de forma k de Weibull realizadas pelo modelo climático HadGEM2ES.

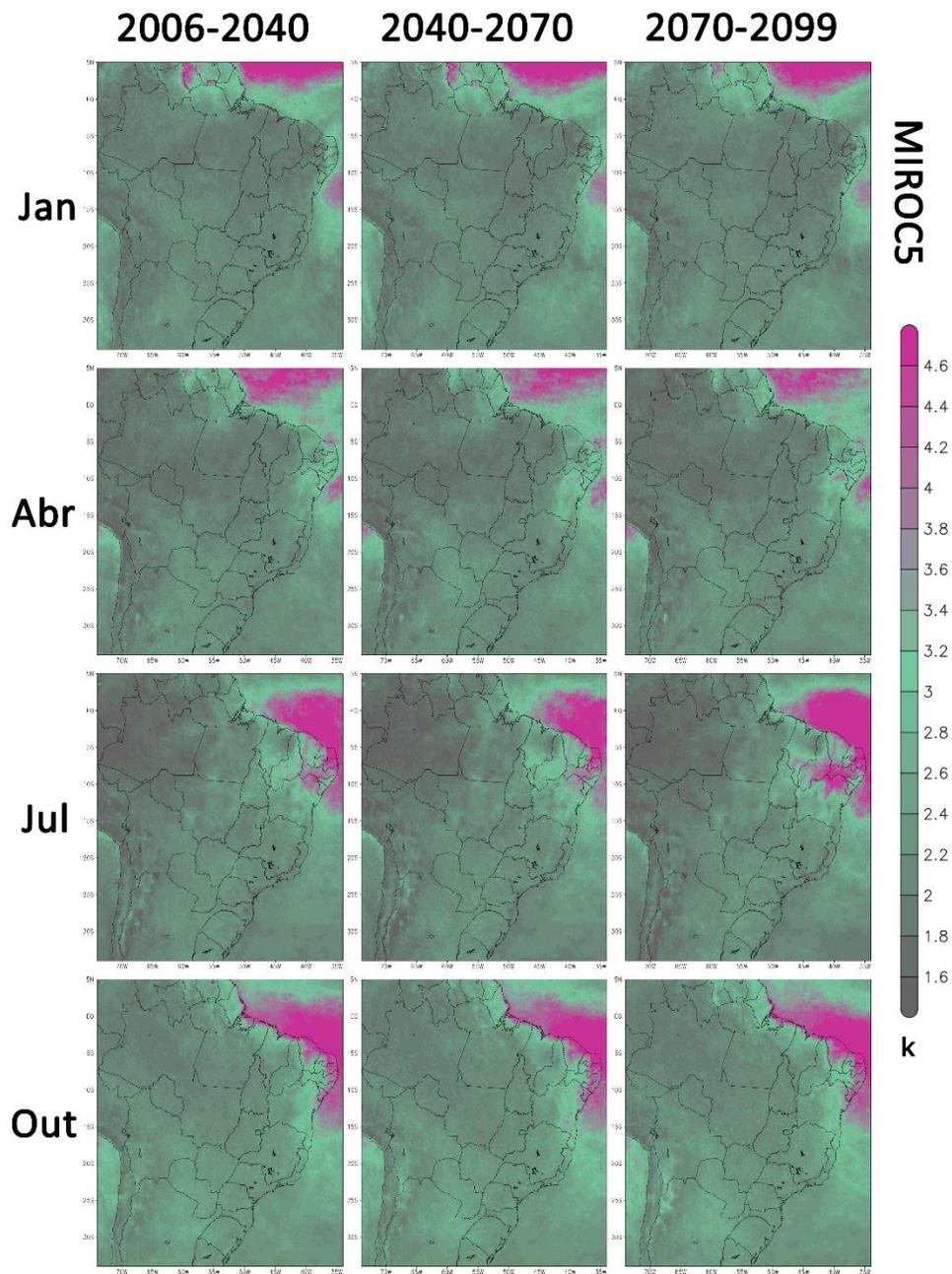


Figura 13. Projeções para a fator de forma k de Weibull realizadas pelo modelo climático MIROC5.

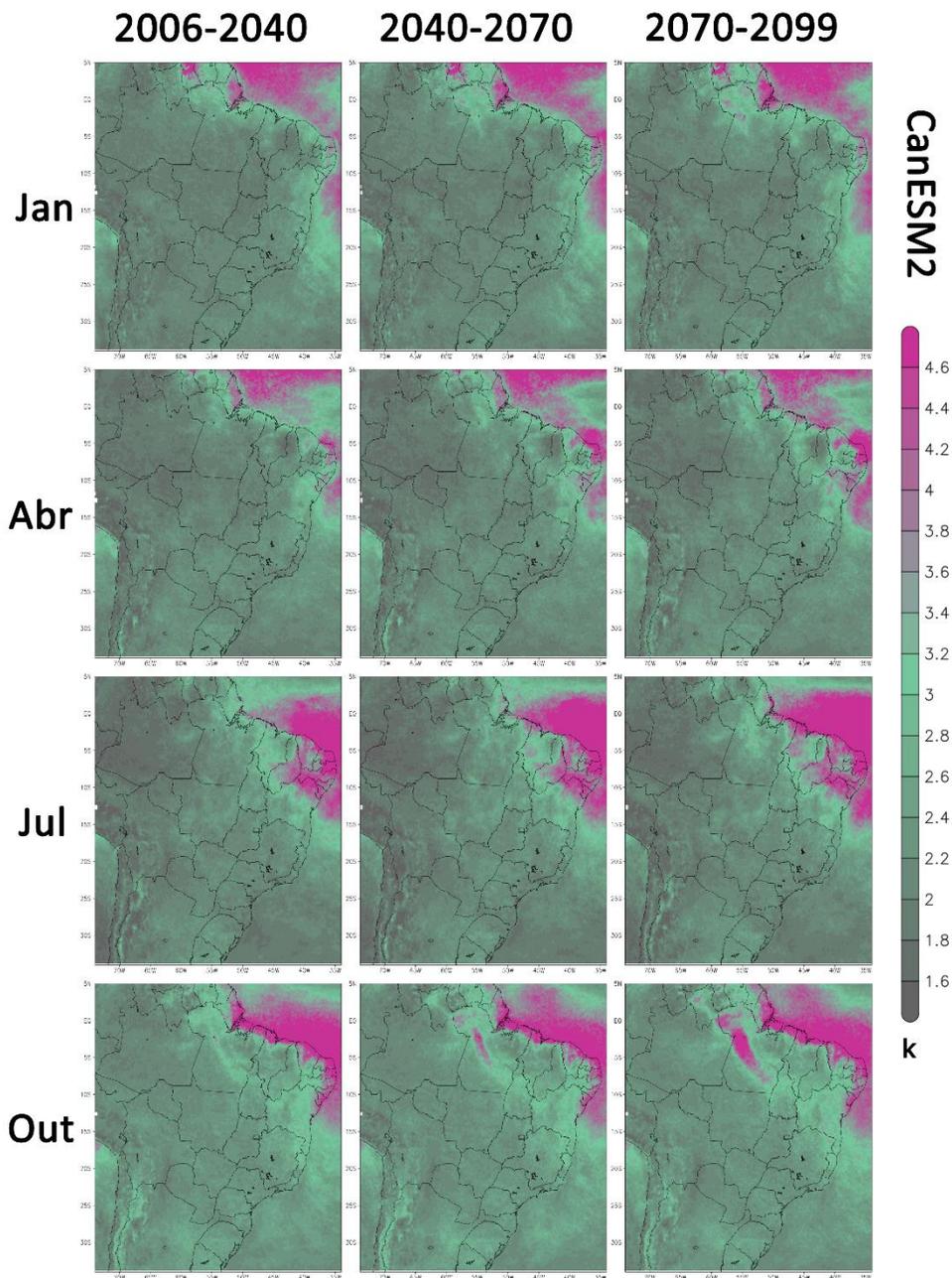


Figura 14. Projeções para a fator de forma k de Weibull realizadas pelo modelo climático CanESM2.

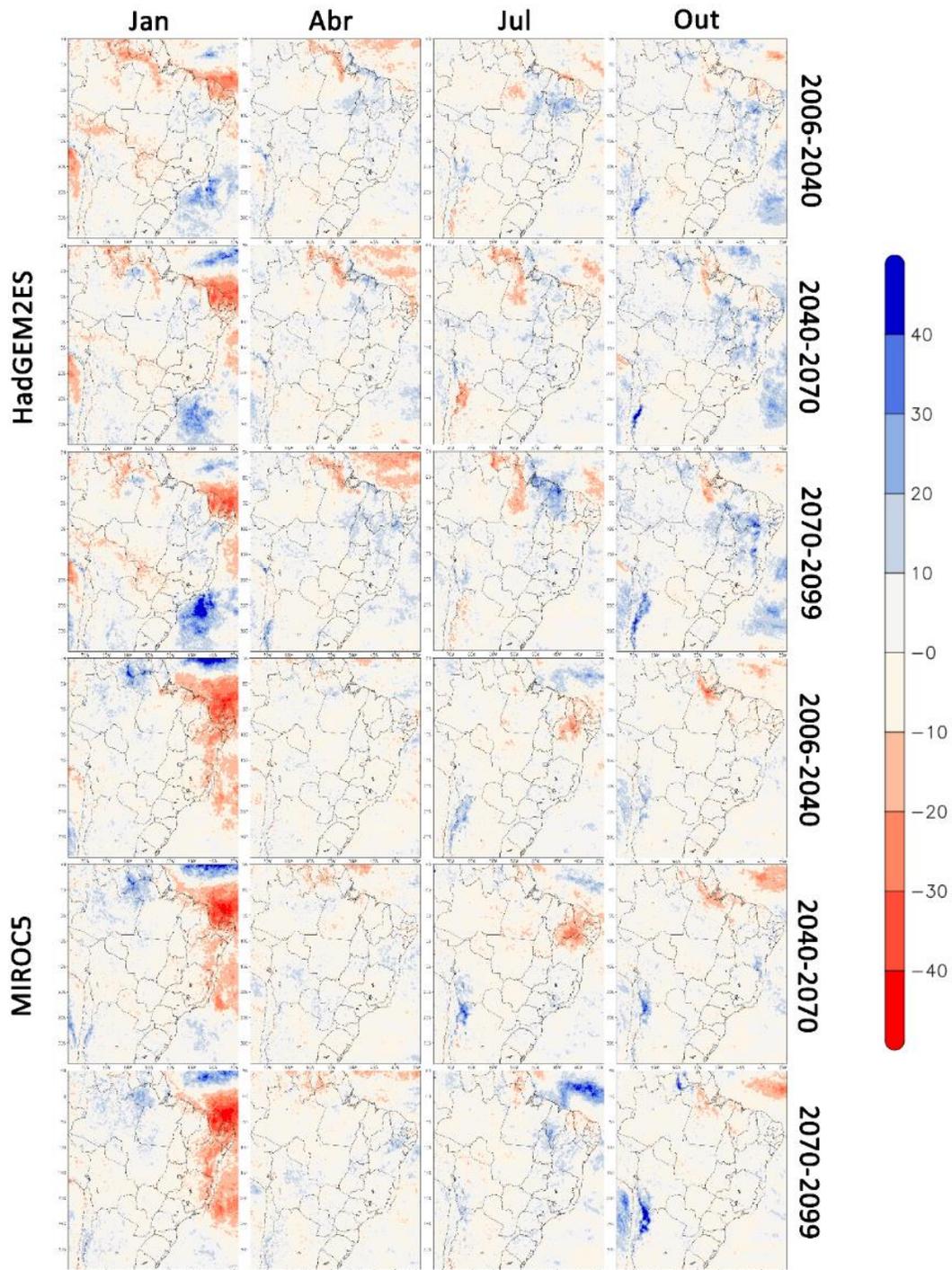


Figura 15. Variação do fator de forma k considerando as simulações realizadas pelos modelos climáticos HadGEM2ES e MIROC5 em comparação ao período histórico.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Produto 5, “Quantificação da disponibilidade futura do recurso eólico no Brasil – resultados finais”, foi desenvolvido com o objetivo de apresentar as avaliações de diferentes modelos climáticos a respeito do potencial eólico futuro, considerando os diferentes cenários associados às mudanças climáticas. Estas avaliações foram realizadas através da análise das simulações de três modelos climáticos - que foram aninhados a um modelo de mesoescala conhecido e respeitado na comunidade científica - onde seus resultados foram ajustados a partir de uma metodologia robusta e bastante complexa, que já foi apresentada e discutida em produtos anteriores.

As projeções do modelo HadGEM2-ES mostraram uma redução no parâmetro de escala sobre a região nordeste do Brasil durante o mês de janeiro para o início do século e com aumento progressivo para o meio e final do século. O resultado do MIROC5 concorda com o HadGEM2-ES e projeta uma área ainda maior para a redução do parâmetro, chegando a marca de -20% em toda a região, com pontos mais localizados apresentando redução de até 30 a 40%. O modelo HadGEM2-ES projeta um aumento de 20% do parâmetro c entre o estado de São Paulo e Paraná para o início do século, mas tal projeção não é acompanhada pelo MIROC5. Ambos os modelos projetam um aumento de 20% no parâmetro c sobre a porção norte da Amazônia. Para o fator de forma, os modelos apresentaram projeções semelhantes às realizadas para o fator de escala, com redução de 20 a 30% no parâmetro k em janeiro sobre a região nordeste para ambos os modelos. Entretanto, para o norte da Bahia, o HadGEM2-ES prevê um aumento de até 20% no fator k no futuro próximo, enquanto o MIROC5 projeta redução do parâmetro em praticamente toda a região nordeste do país, independente do período analisado. De acordo com ambos os modelos, é esperado um aumento de 10 a 30% em k para o

mês de julho sobre o interior do nordeste no futuro próximo. Adicionalmente, os resultados observados para o mês de outubro apresentam aumento entre 10 a 20% nas simulações de k realizadas com o modelo HadGEM2-ES para os três períodos, em uma área que vai do interior do nordeste até a região sudeste do país.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BLACK, T. L. The New NMC Mesoscale Eta Model: Description and Forecast Examples. **Weather and Forecasting**, 1994.

BRAZIL. Intended Nationally Determined Contribution: Towards achieving the objective of the United Nations Framework Convention on Climate Change. **Intended Nationally Determined Contribution**, v. 9, p. 6, 2015.

BRESLOW, P. B.; SAILOR, D. J. Vulnerability of wind power resources to climate change in the continental United States. **Renewable Energy**, v. 27, n. 4, p. 585–598, 2002.

CHOU, S. C. et al. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, 2014a.

CHOU, S. C. et al. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, 2014b.

CRAIG, M. T. et al. A review of the potential impacts of climate change on bulk power system planning and operations in the United States. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 98, n. September, p. 255–267, 2018.

CRONIN, J.; ANANDARAJAH, G.; DESSENS, O. Climate change impacts on the energy system: a review of trends and gaps. **Climatic Change**, v. 151, n. 2, p. 79–93, 2018.

DE JONG, P. et al. Forecasting high proportions of wind energy supplying the Brazilian Northeast electricity grid. **Applied Energy**, v. 195, p. 538–555, 2017.

DE JONG, P. et al. Estimating the impact of climate change on wind and solar energy in Brazil using a South American regional climate model.

Renewable Energy, v. 141, p. 390–401, out. 2019.

EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano Decenal de Expansão de Energia 2019. p. 435, 2019.

MESINGER, F. et al. The Step-Mountain Coordinate: Model Description and Performance for Cases of Alpine Lee Cyclogenesis and for a Case of an Appalachian Redevelopment. **Monthly Weather Review**, 1988.

MMA E GIZ. **Sistemas Meteorológicos que atuam no Brasil e seus impactos nos recursos solar e eólico. Ampliação dos Serviços Climáticos para Investimentos em Infraestrutura (CSI)**. Brasília, DF: [s.n.].

MMA E GIZ. **Quantificação da disponibilidade futura do recurso eólico no Brasil - análises e resultados preliminares. Ampliação dos Serviços Climáticos para Investimentos em Infraestrutura (CSI)**. Brasília, DF: [s.n.].

MOSS, R. H. et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, 2010.

MURRAY, V.; EBI, K. L. IPCC Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX). **Journal of Epidemiology and Community Health**, v. 66, n. 9, p. 759–760, 2012.

PEREIRA DE LUCENA, A. F. et al. The vulnerability of wind power to climate change in Brazil. **Renewable Energy**, v. 35, n. 5, p. 904–912, 2010.

PEREIRA, E. B. et al. The impacts of global climate changes on the wind power density in Brazil. **Renewable Energy**, v. 49, p. 107–110, 2013.

PES, M. P. et al. Climate trends on the extreme winds in Brazil. **Renewable Energy**, v. 109, p. 110–120, 2017.

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.

REBOITA, M. S.; AMARO, T. R.; DE SOUZA, M. R. 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.

SAILOR, D. J. et al. A neural network approach to local downscaling of GCM output for assessing wind power implications of climate change. **Renewable Energy**, v. 19, n. 3, p. 359–378, 2000.

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

VENÄLÄINEN, A. et al. The influence of climate change on energy production and heating energy demand in Finland. **Energy and Environment**, v. 15, n. 1, p. 93–109, 2004.