

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PECE – PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA USP

YANN MARIEN

**Impactos das mudanças climáticas na geração de energia eólica no sul
da Bahia e incertezas associadas**

São Paulo

2020

YANN

**Impactos das mudanças climáticas na geração de energia eólica no sul da
Bahia e incertezas associadas**

Monografia apresentada para o Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como requisito para obtenção do diploma no curso de Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Orientador: Prof. Dr. Demétrio Cornílios Zachariadis

**SÃO PAULO
2020**

“Become who you were born to be”

J.R.R. Tolkien

RESUMO

O Nordeste Brasileiro é a principal região de geração de energia eólica, com um dos melhores fatores de capacidade do mundo, entender como as mudanças climáticas decorrentes de forçantes antropogênicas poderão alterar o regime de ventos da região pode trazer informações relevantes para possíveis investidores. O presente trabalho estudou a tendência da magnitude do vento para a região sul da Bahia que apresenta grande potencial eólico e, para isso, foram utilizados os dados de vento em 10 metros de altura dos modelos globais contidos no CMIP5, com RCP8.5 para maximizar a forçante antropogênica e RCP4.5 para representar uma projeção mais otimista da concentração de gases do efeito estufa. Sendo propostos dois cenários futuros para a análise: “futuro próximo” (2031 – 2060) e “futuro distante” (2071 – 2100), onde foi possível identificar que haverá um aumento da velocidade do vento com relação à média histórica de 4.9% para o “futuro próximo” e aproximadamente 7,8% para o “futuro distante” no RCP8.5, e para o RCP4.5 este aumento se deu de forma menos acentuada, com aumento de 1,3% para o “futuro próximo” e 1,6% para o “futuro distante”. Além da intensificação da velocidade dos ventos, foi identificada para os dois RCPs a manutenção do vento unidirecional, com maior predominância de leste, este aumento está condizente com o padrão de circulação de brisa, que deverá ser intensificado como consequência do aumento gradiente de temperatura do sistema continente-oceano. Apesar da incerteza associada aos modelos, existem fortes indicativos de que o sul da Bahia poderá ter melhoria em seu potencial de geração de energia eólica como consequência do aquecimento global.

Palavras-chave: Energia eólica, geração de energia, Bahia, modelos meteorológicos globais, CMIP5, mudanças climáticas, forçante antropogênica, aquecimento global.

ABSTRACT

North-eastern Brazil is the country's main region in terms of wind power, with one of the highest capacity factors in the world. Understanding climate changes due to anthropogenic impact on the environment and how they can affect regional wind systems can provide relevant information for possible investors. This research studied tendencies in the magnitude of wind speed in Southern Bahia, an area with great wind power potential. Using data referring to 10 m high winds in CMIP5, looking at RCP8.5 and RCP4.5 to represent a maximised and an optimistic projections for the increase of greenhouse gases, respectively, proposing two future scenarios for analysis: "near future"(2030 – 2069) and "far future"(2070 – 2100). Using historical averages, it was estimated an increase in wind velocities of approximately 4.9% in the "near future" and 7.8% in the "far future" for the maximised scenario and, much less drastically, 1.3% increase in the 'near future" and 1,6% in the "far future" in the optimistic scenario. Besides the increase in wind velocity, both scenarios show a preservation of unidirectional winds, mainly east, being congruent with breeze patterns, which tend to intensify with temperature gradient increases in the continent-ocean system. Taking into consideration the uncertainty of the models used, there are strong indications that southern Bahia will present an increase in its wind power generation potential in consequence to the effects of global warming.

Keywords: Wind power, Bahia, Global Models, CMIP5, climate changes, anthropogenic forcing, global warming.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1: Mapa do potencial de geração de energia eólica no Nordeste Brasileiro, baseado nos ventos em 50 m. Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001, página 44.....	18
Figura 1. 2: Distribuição global do albedo. Fonte: Peixoto, J.P., and Oort, A.H. (1992) Physics of climate. Springer, Berlin.....	19
Figura 1. 3: Esquema da circulação atmosférica global. Fonte: https://courses.lumenlearning.com/geophysical/chapter/global-atmospheric-circulations/	20
Figura 1. 4: Ventos no nível de pressão do mar, no painel superior: dezembro, janeiro e fevereiro, no painel inferior: junho, julho e agosto. Fonte: WALLACE, J.M; HOBBS, P.V. Atmospheric Science – An Introductory Survey . 2. ed. Burlington, EUA: Elsevier Academic Press, 2006. P17.	21
Figura 1. 5: No gráfico superior mostra o perfil de emissão espectral de radiação do Sol e da Terra, na parte inferior está a absorção espectral de radiação da atmosfera terrestre. Fonte: JACOB, Daniel J. 7. The Greenhouse Effect. In: Introduction to Atmospheric Chemistry, p. 126.	22
Figura 1. 6: Múltiplos indicadores de estudos independentes mostrando o aquecimento global. Fonte: IPCC AR5, Climate Change 2013, The Physical Science Basis, FAQ.2.1 figura 2.	23
Figura 1. 7: Os painéis da esquerda representam a anomalia de temperatura observada e simuladas, no painel superior apenas com forçantes naturais, no inferior com forçante natural e antropogênica. Os painéis da direita representam a distribuição espacial da anomalia de temperatura da superfície da terra. Fonte: IPCC AR5, Climate Change 2013, The Physical Science Basis, FAQ.10.1 figura 1.	24
Figura 3. 1: Forçante radioativa total para os RCPs, período entre os anos 2000 e 2100. Fonte: IPCC AR5, Climate Change 2013, The Physical Science Basis, cap. 3. Box 1.1, figura 1.	30
Figura 3. 2: Zoom na região sul da Bahia onde foram feitas as séries temporais das variáveis.	31

Figura 4. 1: Média da anomalia de temperatura para os modelos do CMIP5 em relação ao período histórico (1980 – 2005) para os 3 cenários: período histórico (1980-2005), futuro próximo (2031-2060) e futuro distante (2071-2100). A área sombreada representa o intervalo de confiança de 95% dos modelos e a linha representa a média.

.....33

Figura 4. 2: (a) Média do vento a 10 metros entre 1980 e 2005 para o ERA5; O mapa de vento com a média dos dados de vento em 10 metros de altura dos modelos do CMIP5 estão representados para 3 diferentes cenários: (d) período histórico (1980-2005); (b) e (c) futuro próximo (2031-2060) e (e) e (f) futuro distante (2071-2100), para RCP8.5 e RCP4.5, respectivamente. As linhas paralelas quando mais espaçadas representam que mais de 60% dos modelos do CMIP5 apresentaram tendência de aumento de vento para a região, quando as linhas estão mais próximas significa que ao menos 90% dos modelos apresentaram tendência para a região.....34

Figura 4. 3: Série temporal da diferença da velocidade do vento de cada ano com a média histórica, para o RCP4.5 e 8.5. As três regiões retangulares representam o período histórico, futuro próximo e futuro distante, respectivamente.35

Figura 4. 4: Médias mensais dos modelos do CMIP5 da porcentagem do aumento ou diminuição do vento em relação ao vento do período histórico para: (a) e (c) futuro próximo, (b) e (d) futuro distante, para RCP8.5 e RCP4.5, respectivamente.36

Figura 4. 5: Rosa dos ventos para os dados de reanálise (a), média do: período histórico (d), do futuro próximo (b) e (c) e futuro distante (e) e (f), para RCP8.5 e RCP4.5, respectivamente. Região sul da Bahia.....37

LISTA DE TABELAS

Tabela 4. 1: Resumo das informações contidas na Figura 4. 3, mostrando o valor médio do aumento do vento para o cenário e entre colchetes os percentis de 10% e 90%, respectivamente.	36
Tabela 4. 2: Estimativa do aumento do potencial de geração de energia eólica para a região sul da Bahia para os cenários de “futuro próximo” e “futuro distante” para os RCPs de 8.5 e 4.5.	38

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Potencial de geração de energia eólica na região Nordeste do Brasil...	17
1.2 Características meteorológicas do Nordeste Brasileiro	18
1.3 Mudanças Climáticas.....	22
2 OBJETIVOS.....	27
3 METODOLOGIA	29
3.1 Cenários de RCP para o CMIP5	29
3.2 Pré-processamento e processamento dos dados.....	30
4 ANÁLISE DE DADOS	33
5 CONCLUSÃO	39
REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

Como resposta para os impactos ambientais advindos da utilização de combustíveis fósseis para a geração de energia, o mundo vem buscando diversificar, de forma sustentável, a sua matriz energética. Nos últimos anos as fontes de energias renováveis, como energia solar e eólica, vêm sendo largamente incentivadas, e tiveram grande redução de preço com os avanços tecnológicos, o que as tornou uma opção competitiva no mercado. O panorama no Brasil reflete esta tendência, onde a capacidade instalada de energia eólica teve um aumento de mais de 18 vezes no período de 2010 até 2020 de acordo com a ABEEólica (<http://abeeolica.org.br/>), saindo de 928 MW instalados para 17 GW. Ainda, segundo a ABEEólica, aproximadamente 87% da energia eólica no Brasil foi gerada na região Nordeste, sendo esta considerada uma das melhores regiões do mundo para geração de energia eólica. Atualmente a energia eólica ocupa o segundo lugar na matriz energética brasileira, representando 9,8% da potência instalada no país.

O trabalho foi dividido de maneira em que no capítulo 1 será feita uma análise das características meteorológicas da região Nordeste do Brasil, além de também trazer algumas observações sobre mudanças climáticas e suas consequências. O capítulo 2 traz o objetivo do trabalho, o capítulo 3 fala sobre os dados e a metodologia empregada em seu estudo, os resultados dessas análises são apresentados no capítulo 4, seguidos pela conclusão no capítulo 5. Referências bibliográficas no capítulo 6.

1.1 Potencial de geração de energia eólica na região Nordeste do Brasil

O Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (AMARANTE, 2001) foi um dos primeiros trabalhos a mostrar este grande potencial da região Nordeste para a geração de energia eólica, tal estudo estimou que poderiam ser instalados 75 GW com base nos ventos em 50 metros, como visto Figura 1. 1 abaixo, isso é refletido em seu fator de capacidade médio, que segundo a ABEEólica é de 42,7%, acima da média global de 34%. Apesar de ser a região com a maior concentração de parques eólicos do Brasil ainda há muito espaço para ser explorado, pensando ainda apenas em parques onshore.

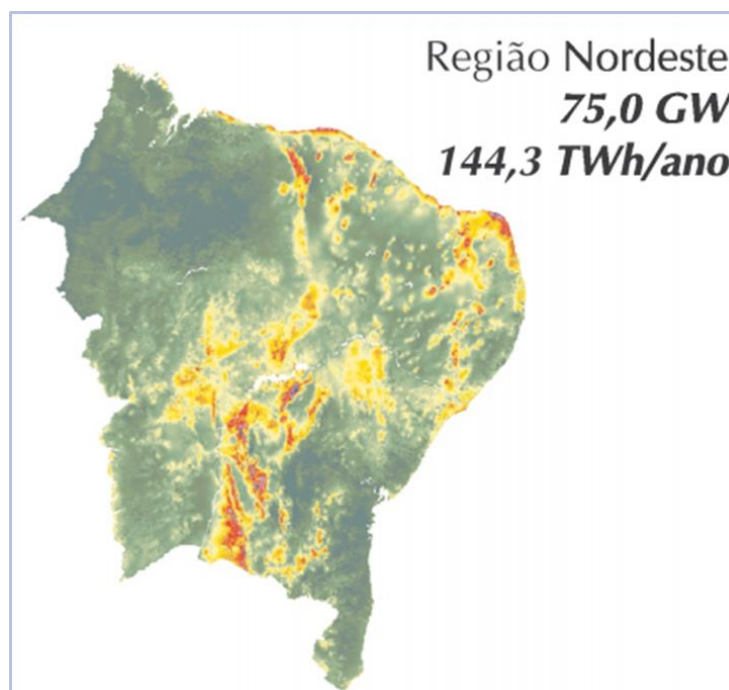


Figura 1. 1: Mapa do potencial de geração de energia eólica no Nordeste Brasileiro, baseado nos ventos em 50 m. Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001, página 44.

Como a geração de energia nas turbinas eólicas depende diretamente da velocidade do vento à terceira potência, na próxima seção serão apresentadas, de forma sucinta, as principais características meteorológicas de escala sinótica que conferem à região o alto fator de capacidade, os efeitos locais não foram abordados na discussão, apesar de terem importância no regime de ventos local.

1.2 Características meteorológicas do Nordeste Brasileiro

O fato de o planeta Terra ser aquecido de forma diferencial, com a região equatorial recebendo muito mais energia do que as regiões polares, é um dos principais responsáveis para a formação da circulação global atmosférica. Outro ponto envolve o albedo da região, sendo este definido como a razão entre a energia refletida e a energia incidente em uma superfície, assim quanto mais próximo o albedo estiver de 1 mais a superfície irá refletir a radiação incidente, a Figura 1. 2 mostra que o albedo da região equatorial é menor do que os de maiores latitudes, fazendo com que esta região absorva proporcionalmente mais da radiação solar incidente, além de naturalmente já receber mais radiação.

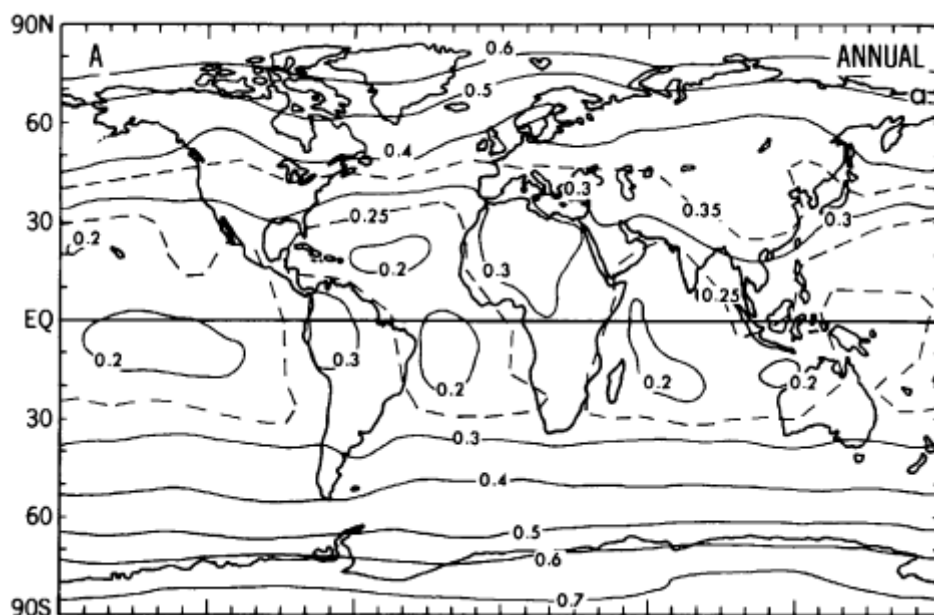


Figura 1. 2: Distribuição global do albedo. Fonte: Peixoto, J.P., and Oort, A.H. (1992) *Physics of climate*. Springer, Berlin.

Como um sistema termodinâmico a Terra busca o seu equilíbrio térmico, que é feito através da troca por dois fluídos, água dos oceanos e o ar na circulação global atmosférica (ventos) (CAVALCANTI et al, 2009). Portanto, o ar mais quente das regiões equatoriais, região de baixa pressão, se torna menos denso e sobe formando grandes nuvens convectivas para depois descer nas regiões subtropicais (30 graus de latitude norte e sul), formando regiões de alta pressão e com baixíssimos níveis pluviométricos, como a região do Saara, tal circulação é conhecida como Célula de Hadley. A célula de Hadley é a responsável pelo transporte de energia meridional no sistema, levando a energia da região equatorial para as de maior latitude.

Além da célula de Hadley, existem mais duas células que atuam no transporte meridional de energia, a célula de Latitudes Médias e a Polar. Um esquema simplificado da circulação atmosférica global é apresentado abaixo na Figura 1. 3

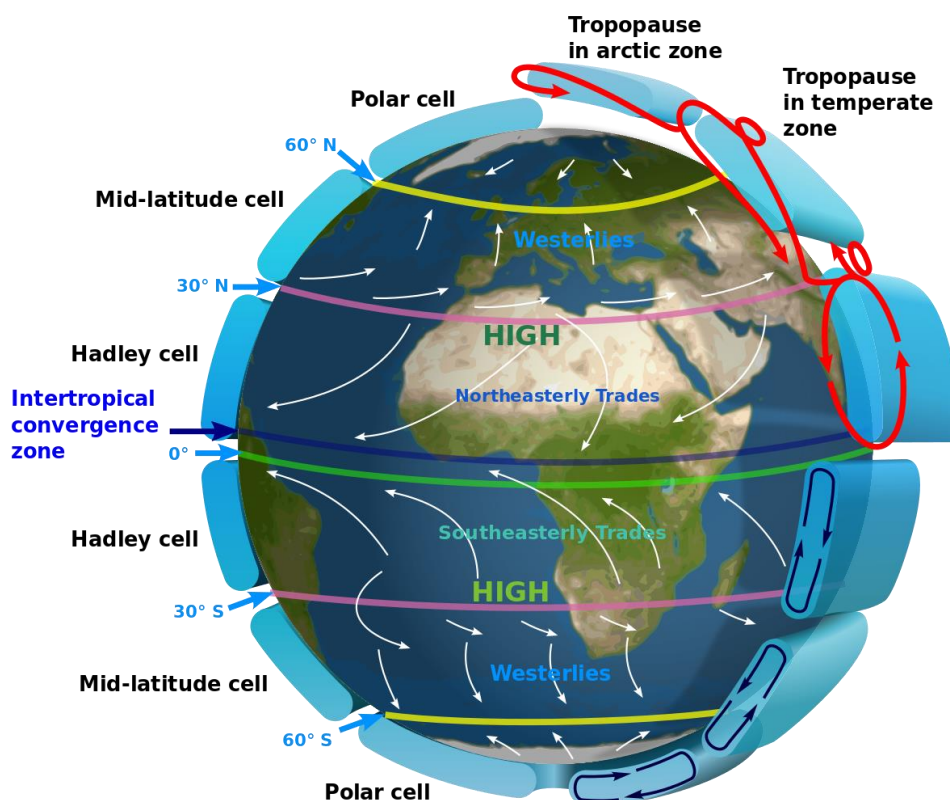


Figura 1. 3: Esquema da circulação atmosférica global. Fonte: <https://courses.lumenlearning.com/geophysical/chapter/global-atmospheric-circulations/>

A Figura 1. 3 mostra também um corte vertical da atmosfera, onde é possível identificar o movimento ascendente na região equatorial, com isso há convergência de massa em superfície, assim o ramo da célula de Hadley em superfície busca levar o ar mais frio das regiões subtropicais para a região equatorial num movimento norte-sul, porém o planeta está em rotação, de forma que o movimento não se dá na direção norte-sul devido à força de Coriolis, assim os ventos que vão em direção à linha do equador são defletidos para a esquerda no Hemisfério Sul e para a direita no Hemisfério norte, formando os alísios de sudeste e nordeste, respectivamente. Os alísios convergem numa região que se chama Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), sendo esta a principal responsável pelos padrões de precipitação do nordeste brasileiro, a ZCIT varia de 14 graus norte até 2 graus sul, em sua posição máxima ao sul é responsável pela estação chuvosa no Nordeste nos meses de março e abril (CAVALCANTI et al, 2009), enquanto que nos meses de agosto e setembro atinge seu máximo ao norte, meses inclusive que ocorrem os máximos de vento médio na região nordeste.

Os alísios são ventos constantes, de intensidade alta e com pouca mudança de direção, sendo eles um dos principais formadores do regime de vento da região

Nordeste do Brasil, e tais características os tornam ventos de altíssima qualidade para geração de energia nas turbinas eólicas.

A ZCIT é a principal responsável pelos padrões de vento do nordeste, mas como observado no Atlas Eólico Brasileiro (AMARANTE, 2001) a região mais ao sul da Bahia, que possui inúmeros parques eólicos instalados, está abaixo da linha da ZCIT, e a principal responsável pelo padrão de vento da região é a parte superior da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que tem sua origem no ramo descendente da célula de Hadley nas latitudes subtropicais, pois a subsidência do ar forma uma região de alta pressão praticamente constante ao longo do ano, e uma região de alta pressão no nível da superfície gera um movimento anticiclônico, que no Hemisfério Sul é caracterizado por um giro anti-horário. A Figura 1. 4 abaixo traz um mapa de vento onde esses fenômenos podem ser mais facilmente identificados:

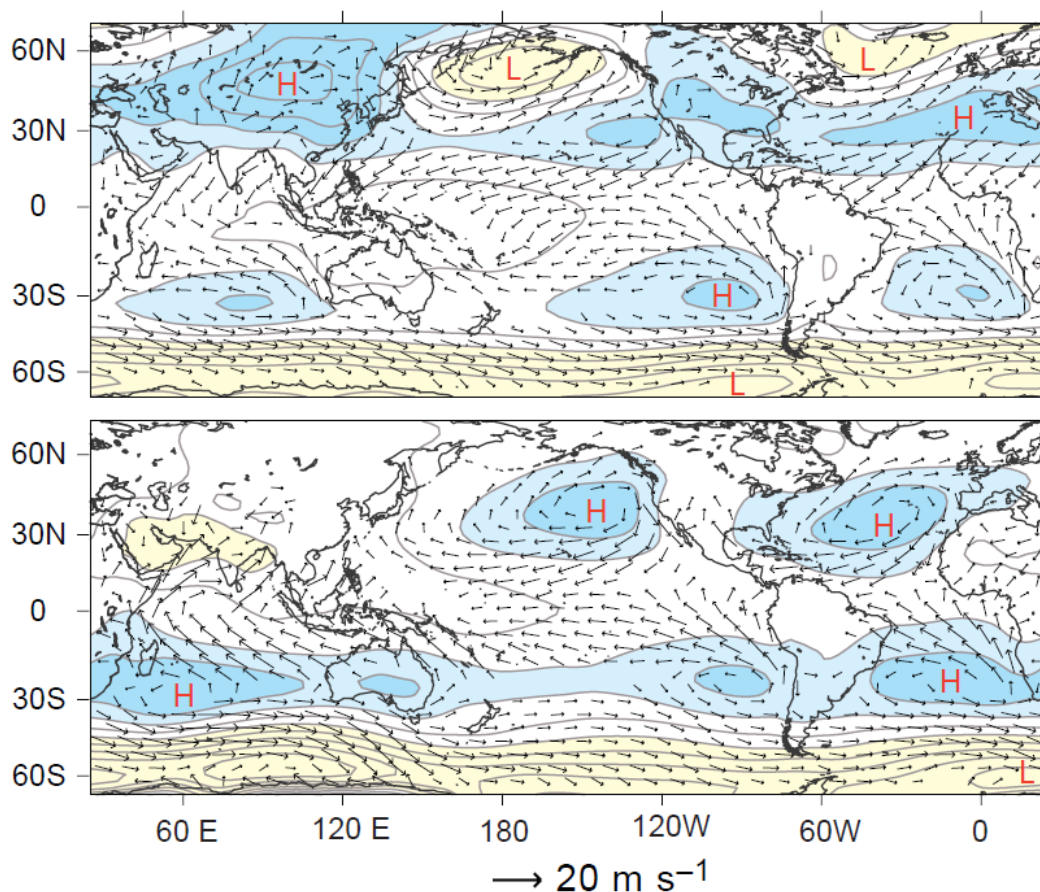


Figura 1. 4: Ventos no nível de pressão do mar, no painel superior: dezembro, janeiro e fevereiro, no painel inferior: junho, julho e agosto. Fonte: WALLACE, J.M; HOBBS, P.V. **Atmospheric Science – An Introductory Survey**. 2. ed. Burlington, EUA: Elsevier Academic Press, 2006. P17.

A Figura 1. 4 foi feita com os dados de um satélite chamado QuikSCAT, é possível notar no mapa superior, verão no hemisfério sul, que a confluência dos alísios está mais para baixo quando comparada com a sua posição no inverno. Além de demonstrar a diferença da

posição da ZCIT no verão e inverno, nota-se também que no inverno há o fortalecimento da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), região à direita da América do Sul demarcada em azul e por um H (*high pressure*), com este fortalecimento da ASAS há a intensificação dos alísios de sudeste, conseqüentemente aumentando a intensidade dos ventos na região do nordeste brasileiro nos meses de inverno.

1.3 Mudanças Climáticas

Sem a atmosfera o planeta Terra teria temperatura de equilíbrio abaixo de 273 K, mais precisamente sua temperatura equivalente de corpo negro é 255 K, porém, a temperatura média na superfície da Terra é 289 K (WALLACE; PETER V. HOBBS, 2006), tal discrepância de temperaturas ocorre em função do efeito estufa natural, alguns dos gases constituintes da atmosfera, como H₂O, CO₂, N₂O, CH₄, tem bandas específicas de absorção no espectro eletromagnético que, em geral, os tornam transparentes à radiação de ondas curtas na região do visível e opacos para a radiação de onda longa e ultravioleta (JACOB, 2019).

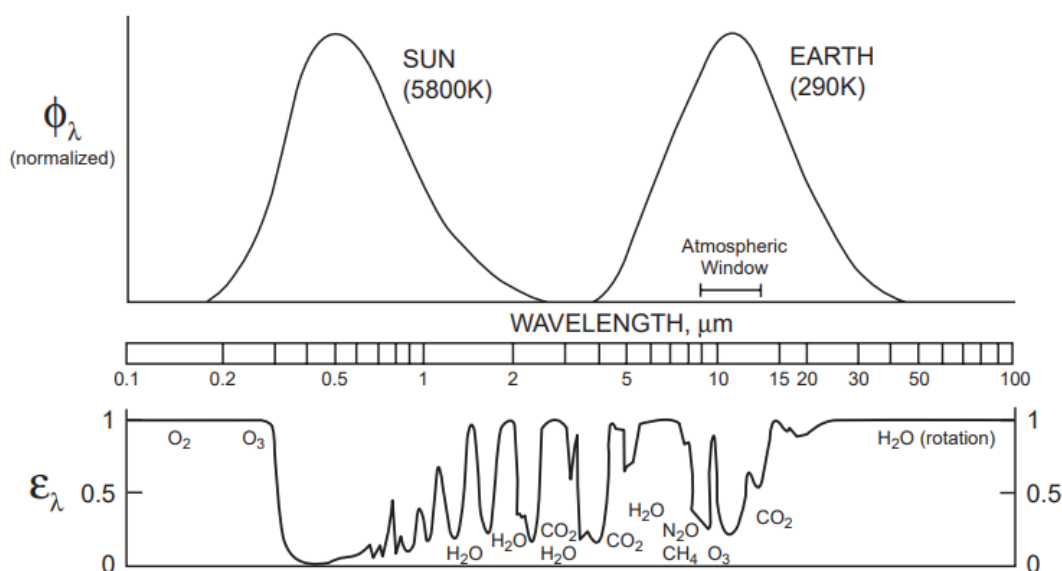


Figura 1. 5: No gráfico superior mostra o perfil de emissão espectral de radiação do Sol e da Terra, na parte inferior está a absorção espectral de radiação da atmosfera terrestre. Fonte: JACOB, Daniel J. 7. The Greenhouse Effect. In: Introduction to Atmospheric Chemistry, p. 126.

Desta forma, grande parte da radiação emitida pelo Sol atravessa a atmosfera terrestre e é absorvida pela superfície terrestre, para a seguir ser reemitida à temperatura da Terra, que de acordo com a Lei do Deslocamento de Wien, que diz que o comprimento de onda da máxima emissão, λ_{max} , é inversamente proporcional à

temperatura do corpo, ocorre na região do infravermelho como mostrado na Figura 1. 5. De modo que, parte da energia que a Terra reemitiria de volta para o espaço é absorvida pelos gases da atmosfera, e por isso a temperatura média da superfície da terra é 289 K.

Porém, existem evidências de diversos estudos independentes que inequivocamente mostram que a Terra está aquecendo desde o século XIX (HARTMANN et al., 2013), algumas dessas evidências estão representadas na Figura 1. 6, o que chama a atenção dos cientistas é a rápida taxa de mudança nesses indicadores, levando ao questionamento se é devido a apenas forças naturais ou a uma ação externa causada pelo homem, o efeito estufa antropogênico.

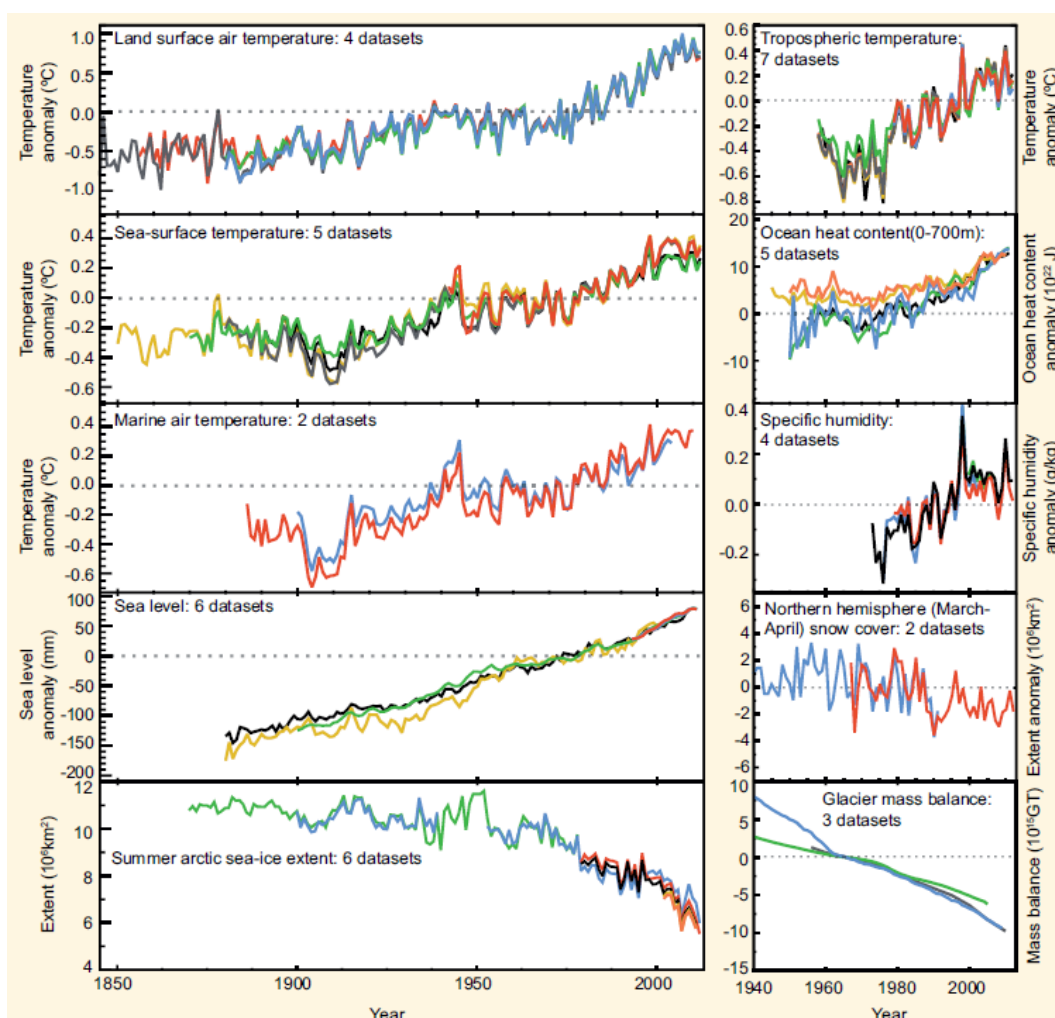


Figura 1. 6: Múltiplos indicadores de estudos independentes mostrando o aquecimento global. Fonte: IPCC AR5, Climate Change 2013, The Physical Science Basis, FAQ.2.1 figura 2.

O clima da Terra está sempre em mudança, pois depende de forçantes naturais externas (atividade vulcânica e solar) e da própria variabilidade interna do sistema (El Niño, por exemplo) (WALLACE; PETER V. HOBBS, 2006). Além das forçantes naturais existe a forçante antropogênica, que representa as emissões de gases de efeito estufa e demais poluentes atmosféricos ocasionadas pela ação humana. As mudanças climáticas observadas no último século só podem ser explicadas numericamente quando contabilizada a forçante antropogênica nos modelos meteorológicos (BINDOFF et al., 2013), conforme mostrado na Figura 1. 1 retirada do relatório AR5 do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) de 2014. Além do aumento da temperatura média da Terra, quando não é contabilizada a forçante antropogênica, os modelos meteorológicos também não conseguem reproduzir a anomalia espacial de temperatura que ocorreu na segunda metade do último século, como pode ser visto nos painéis à direita da Figura 1. 7.

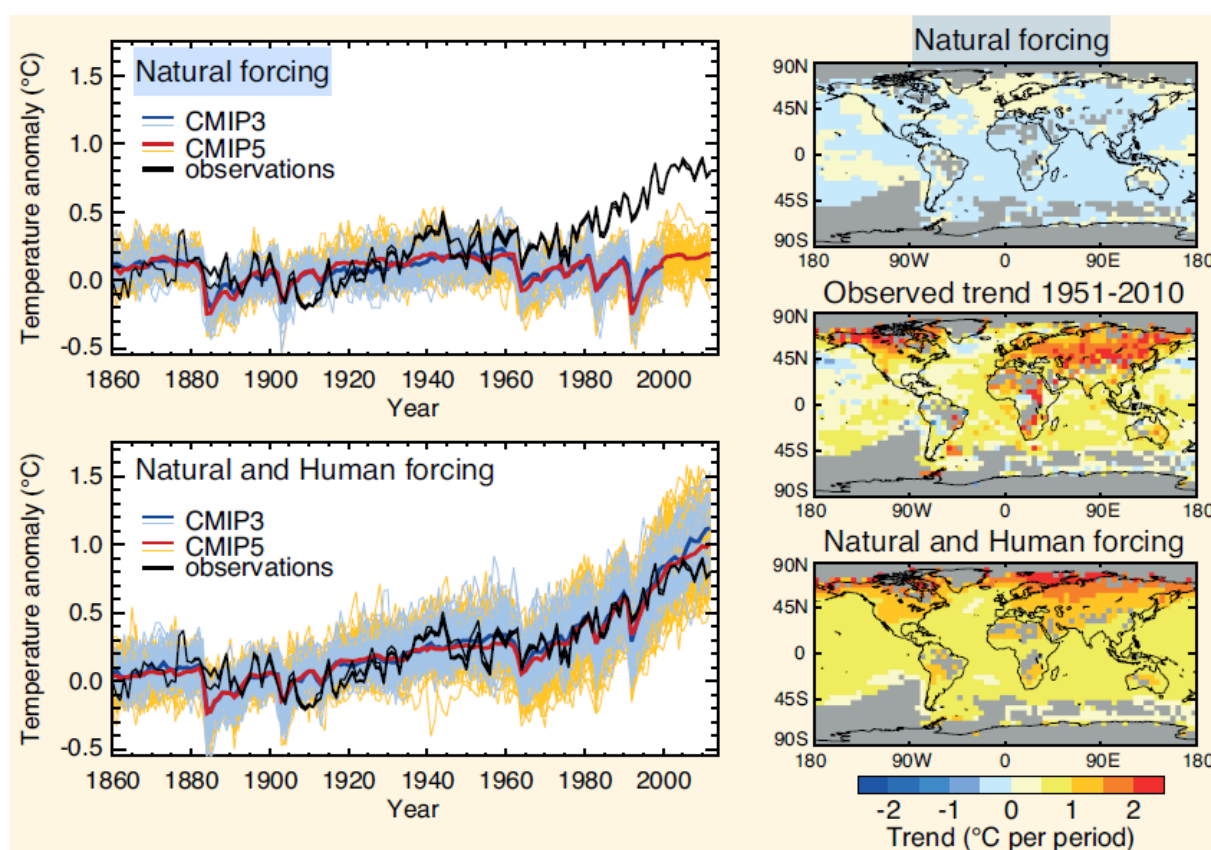


Figura 1. 7: Os painéis da esquerda representam a anomalia de temperatura observada e simuladas, no painel superior apenas com forçantes naturais, no inferior com forçante natural e antropogênica. Os painéis da direita representam a distribuição espacial da anomalia de temperatura da superfície da terra. Fonte: IPCC AR5, Climate Change 2013, The Physical Science Basis, FAQ.10.1 figura 1.

O maior ponto de interesse para os cientistas é entender quais serão as consequências do aquecimento global, bem como desenvolver soluções para mitigar a forçante antropogênica. Nesse sentido, um artigo recente de De Abreu et al., 2019 estimou que houve aquecimento de aproximadamente 1,1 °C para a região Sudeste do Brasil como consequência da emissão de gases do efeito estufa, em outro artigo o mesmo autor mostra que a chance do evento extremo de intensa precipitação na bacia do rio Uruguai ter ocorrido, foi intensificada 5 vezes como consequência da forçante antropogênica (DE ABREU et al., 2019b). Estudos mostram que o aquecimento global trará fortes consequências para a agricultura, como por exemplo as produções de soja e trigo podem ter redução em sua produtividade (STRECK; ALBERTO, 2006), enquanto outras culturas como a cana de açúcar podem ter aumento de produtividade em todo o Sudeste Brasileiro, e de até 54% na região Sul (MARIN et al., 2013). Mas nem todos os eventos extremos são consequência do aquecimento global, por exemplo a seca de 2014, que segundo OTTO et al., 2015 não foi causada pela consequência da forçante antropogênica, mas sim pelo uso da água em si.

Assim como o aquecimento global terá repercussões na agricultura, é esperado que as mudanças climáticas também influenciem na geração de energia eólica ao redor do globo, como consequência de novos padrões de vento. Alguns estudos foram realizados para tentar avaliar este impacto nos ventos do Brasil utilizando modelos meteorológicos regionais, como (RUFFATO-FERREIRA et al., 2017) que apontou uma tendência de aumento da velocidade do vento nas regiões Norte, Nordeste e Sul do Brasil, PEREIRA et al., 2013 sugere que para grande parte da região Nordeste haverá um aumento da densidade de energia eólica em torno de 15 – 30%, esta tendência de aumento do vento na região Nordeste do Brasil também é verificada por PES et al., 2017, que também indica que haverá o aumento de extremos para a velocidade do vento, mas não acima da velocidade de cut-off dos aerogeradores (25 m/s). Há também alguns estudos internacionais preliminares com modelos globais que mostram um decréscimo da velocidade do vento para a Europa, e de forma geral para as latitudes médias (30° - 65° N) (CARVALHO et al., 2017; KARNAUSKAS; LUNDQUIST; ZHANG, 2018).

2 OBJETIVOS

Os parques eólicos são empreendimentos de longa duração, chegam a operar por 20, 30 anos, de maneira que podem ser afetados pelas mudanças climáticas, por isso é importante ter uma estimativa de como os regimes de ventos serão afetados. Tal estimativa pode ser crucial para o planejamento estratégico de longo prazo dos investidores.

Neste trabalho serão apresentados dois possíveis cenários futuros para o vento médio da região Nordeste, em maiores detalhes para a região sul da Bahia, até o ano de 2100. De forma alternativa aos estudos prévios (PEREIRA et al., 2013; PES et al., 2017; RUFFATO-FERREIRA et al., 2017) que utilizaram modelos regionais, serão utilizados dados de todos os modelos meteorológicos globais disponíveis no CMIP5¹ (*Coupled Model Intercomparison Experiment Phase 5*), para que possa ser feita uma estatística robusta das tendências de mudança da velocidade em decorrência das mudanças climáticas antropogênicas no Nordeste Brasileiro.

¹ NorESM1-M, IPSL-CM5B-LR, GISS-E2-R, MPI-ESM-LR, GFDL-ESM2G, GFDL-ESM2M, IPSL-CM5A-LR, CMCC-CESM, bcc-csm1-1, BNU-ESM, CMCC-CMS, CanESM2, CSIRO-Mk3-6-0, bcc-csm1-1-m, MPI-ESM-MR, CMCC-CM, ACCESS1-0, GFDL-CM3, GISS-E2-H-CC, IPSL-CM5A-MR, HadGEM2-CC, GISS-E2-H, GISS-E2-R-CC, CNRM-CM5, HadGEM2-ES, inmcm4, MIROC5, ACCESS1-3

3 METODOLOGIA

Para este estudo foram utilizados os dados de magnitude e direção do vento em 10 metros de altura, calculados a partir do vento zonal e meridional, em escala mensal de cada um dos 28 modelos meteorológicos do CMIP5, que são utilizados nas avaliações realizadas pelo IPCC. Os cenários estudados tiveram divisão da seguinte forma: “período histórico” (entre os anos de 1980 – 2005), “futuro próximo” (2031 – 2060) e “futuro distante” (2071 – 2100). Adicionalmente, o período “histórico” modelado foi comparado com os dados da reanálise ERA5 (HERSBACH et al., 2020) do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) para o mesmo período.

3.1 Cenários de RCP para o CMIP5

Os modelos do CMIP5 dependem da forçante radioativa, que por sua vez é função de uma entre as quatro séries temporais projetadas até 2100 para as concentrações de gases do efeito estufa, que podem ser representadas como uma concentração equivalente de CO₂. A forçante radioativa será tanto maior quanto maior for a concentração equivalente de CO₂. São 4 séries temporais que representam a concentração equivalente de CO₂ até 2100, chamadas de *Representative Concentration Pathway* (RCP) (RHEIN et al., 2014), Figura 3. 1, cada cenário de RCP é nomeado pela magnitude da Forçante Radioativa (W/m²) atingida em 2100. O caminho mais pessimista é o RCP8.5 (ou seja, 8,5 W/m² de forçante radioativa em 2100) onde as emissões de gases do efeito estufa continuarão aumentando com o decorrer do século de forma acentuada, enquanto que o mais otimista é o RCP2.6, onde as concentrações de gases de efeito estufa vão diminuir a partir da primeira metade do século 21. Foram determinados os cenários de “futuro próximo” e “futuro distante” para o RCP4.5 e RCP8.5

Foi utilizado o RCP8.5 para avaliar o pior cenário de aumento dos gases do efeito estufa, de modo a maximizar a razão entre o sinal da influência antropogênica e o ruído (todas as outras forçantes: solar, variabilidade interna, erupção vulcânica) nas variáveis calculadas. Enquanto que a utilização do RCP4.5 foi para representar um cenário de intermediário para otimista, onde houve o controle e estabilização das

emissões de gases do efeito estufa no meio do século 21, como por exemplo inserindo um custo para a sua emissão (BRUYERE et al., 2015).

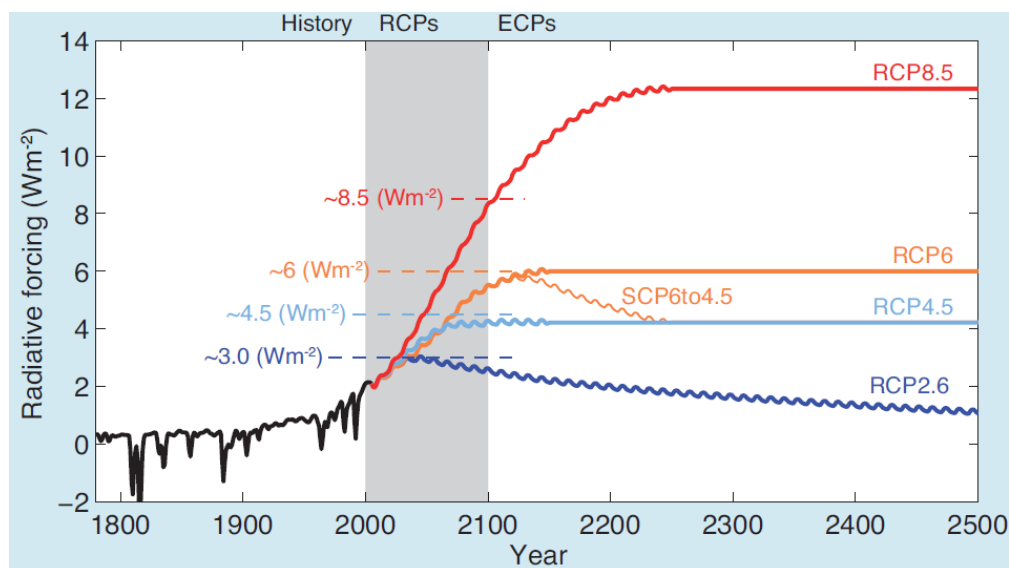


Figura 3. 1: Forçante radioativa total para os RCPs, período entre os anos 2000 e 2100. Fonte: IPCC AR5, Climate Change 2013, The Physical Science Basis, cap. 3. Box 1.1, figura 1.

3.2 Pré-processamento e processamento dos dados

Como os modelos têm diferentes resoluções espaciais, todos foram reinterpolados para uma grade comum de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ (aproximadamente 50 km de lado), de latitude e longitude, sendo excluídos os pontos localizados sob o oceano, pois a dinâmica da atmosfera logo acima dos oceanos difere da dinâmica continental. Como alguns modelos possuem mais de uma simulação, relacionado a variação nas condições iniciais e mudanças nas parametrizações físicas para estimar uma incerteza associada às projeções, foi considerada a média do conjunto de simulações quando mais de uma estava disponível. Para obter uma série temporal das variáveis no Nordeste do Brasil, foi calculada a média na área destacada na Figura 3. 2 abaixo, limitada pelos pontos 47°W , 16°S e 39°W , 12°S , utilizando o método descrito por MORICE et al., 2012, o qual leva em consideração o tamanho de cada célula de grade para ponderar a média.

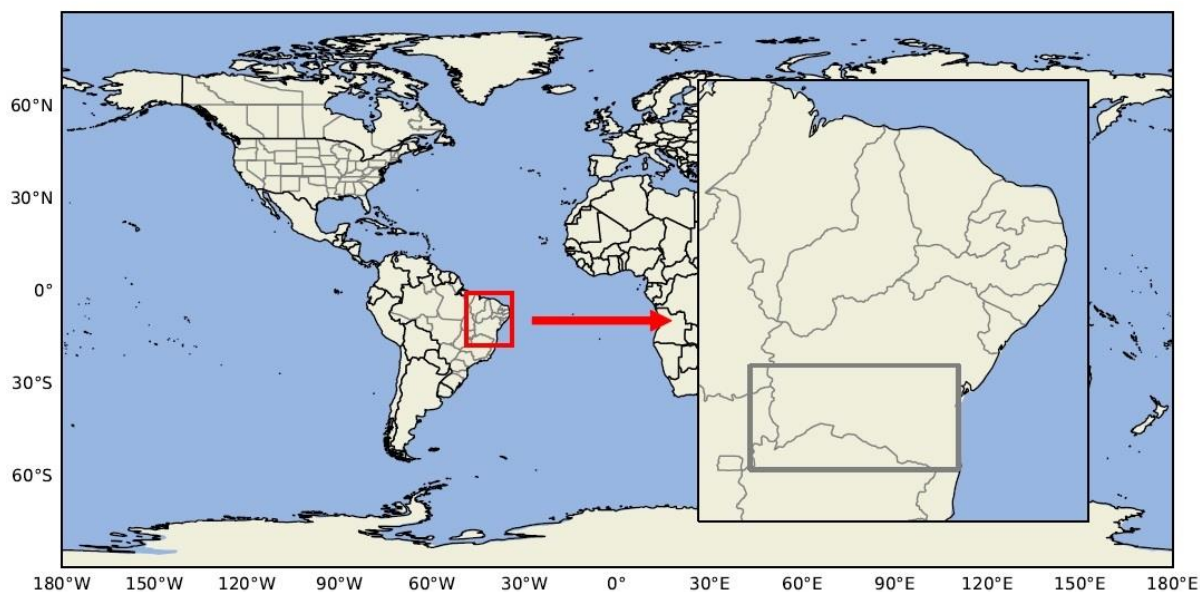


Figura 3. 2: : Zoom na região sul da Bahia onde foram feitas as séries temporais das variáveis.

De modo a utilizar todos os modelos disponíveis na composição dos cenários, foi calculado o desvio com relação à média do “período histórico” relativizado por ela mesma. Dessa forma, todos os modelos são tratados como uma porcentagem com relação à média histórica, limitando a necessidade de se remover modelos que apresentem algum erro sistemático com relação às observações. Além disso, como os dados não estão disponíveis à 80 metros, altura típica para a instalação de turbinas eólicas, foi considerado que a mudança do vento nos cenários futuros dentro da Camada Limite Planetária (CLP) será a mesma, ou seja, não haverá alteração da estrutura vertical nessa camada, isso permite que os resultados para 10 metros sejam extrapolados para a altura da nacela e possam ser comparados com os dados atuais.

4 ANÁLISE DE DADOS

As projeções até 2100 para a anomalia de temperatura na região sul da Bahia são apresentadas na Figura 4. 1, apesar de existir grande incerteza nas projeções desta anomalia para o RCP4.5 e RCP8.5, a tendência é de aumento da temperatura nos dois casos. Para o RCP4.5 a média do aumento de temperatura é aproximadamente 2,5 °C, e de aproximadamente 5°C para o RCP8.5. Os dados de reanálise do ERA5 sugerem que o RCP8.5 pode estar sendo o mais representativo até o momento, isto pode ser visto pela tendência de o aumento de temperatura do ERA5 estar sendo mais intenso, em certos pontos, do que a média dos dois RCPs.

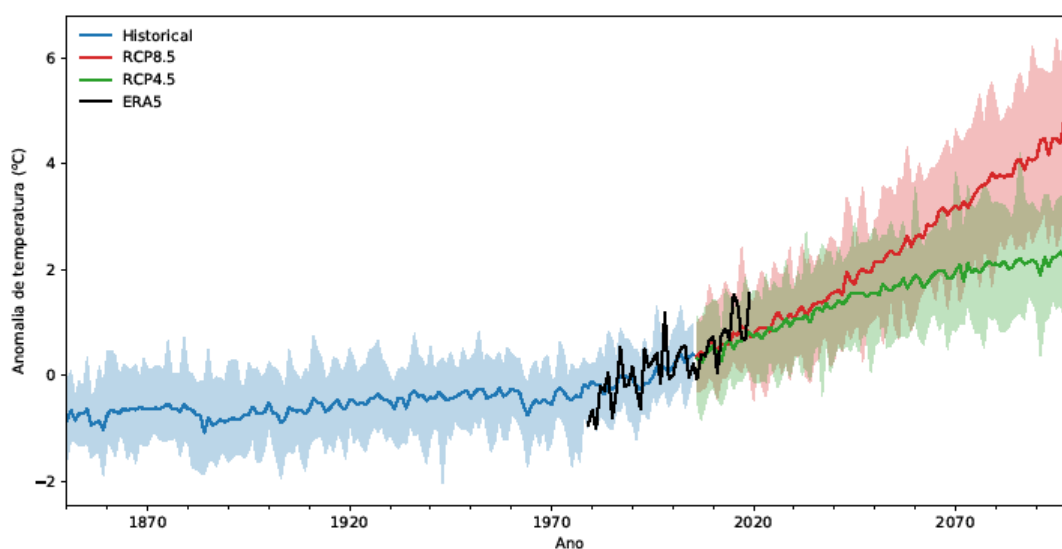


Figura 4. 1: Média da anomalia de temperatura para os modelos do CMIP5 em relação ao período histórico (1980 – 2005) para os 3 cenários: período histórico (1980-2005), futuro próximo (2031-2060) e futuro distante (2071-2100). A área sombreada representa o intervalo de confiança de 95% dos modelos e a linha representa a média.

O “período histórico” modelado pelo CMIP5 Figura 4. 2 (d), apresenta um perfil de vento médio em 10 metros próximo aos dados da reanálise do ERA5, Figura 4. 2 (a). Os dois campos de vento apresentam máximos e mínimos nas mesmas regiões do Nordeste Brasileiro, porém é importante ressaltar que os modelos utilizados no CMIP5 têm resolução nativa menor do que o ERA5, enquanto este tem resolução de 0,25°, os modelos do CMIP têm ao menos 1°, de forma que por ter menor espaçamento das linhas de grade os dados do ERA5 conseguem identificar melhor os padrões regionais, destacando as áreas de máximos e mínimos.

Os itens (b) e (e) da Figura 4. 2 mostram, para o RCP8.5, a diferença relativizada entre o vento médio modelado para o “futuro próximo” e “futuro distante”, respectivamente, e o período histórico, sendo possível inferir como o padrão de vento

na região será afetado pelas mudanças climáticas antropogênicas. Tanto o cenário do “futuro próximo”, quanto o cenário do “futuro distante”, mostram que há uma tendência de aumento da magnitude da velocidade do vento para todo o Nordeste, em especial para a região de interesse ao sul da Bahia, demarcada pelo retângulo cinza, quando considerado o RCP8.5. As linhas paralelas indicam a porcentagem dos modelos do CMIP que apresentaram aumento do vento, quando estas linhas estão mais espaçadas significa que ao menos 60% dos modelos apresentaram aumento, já quando elas estão mais próximas indicam que 90% dos modelos apresentaram tendência de aumento da velocidade do vento na região. Na região de interesse, observa-se que existe uma grande concordância entre os modelos, o que aumenta a confiabilidade dos cenários indicados.

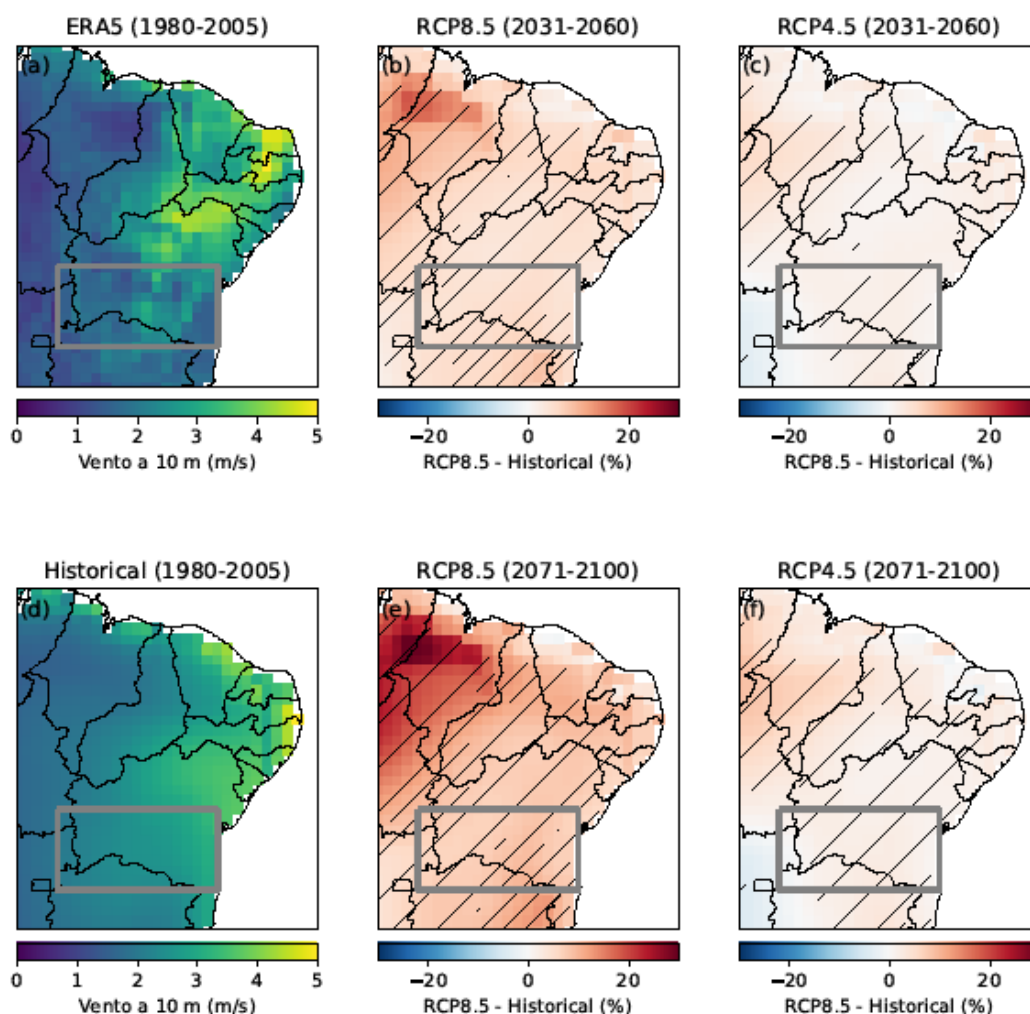


Figura 4. 2: (a) Média do vento a 10 metros entre 1980 e 2005 para o ERA5; O mapa de vento com a média dos dados de vento em 10 metros de altura dos modelos do CMIP5 estão representados para 3 diferentes cenários: (d) período histórico (1980-2005); (b) e (c) futuro próximo (2031-2060) e (e) e (f) futuro distante (2071-2100), para RCP8.5 e RCP4.5, respectivamente. As linhas paralelas quando mais espaçadas representam que mais de 60% dos modelos do CMIP5 apresentaram tendência de

aumento de vento para a região, quando as linhas estão mais próximas significa que ao menos 90% dos modelos apresentaram tendência para a região.

A Figura 4. 3 mostra a tendência de aumento ou diminuição da velocidade do vento na região, são representados nos retângulos cinzas os períodos que definem os três cenários de tempo estudados: período histórico, futuro próximo e futuro distante. É possível identificar uma grande incerteza associada à tendência prevista pelos modelos, porém, apesar da grande incerteza, o valor médio de todas as tendências aponta para um aumento do vento em relação à média histórica. Para a caixa do meio, representando o futuro próximo (2031 – 2060) a tendência média de todos os modelos com RCP8.5 é que haja um aumento de aproximadamente 5% da velocidade do vento, já para o RCP4.5 o aumento médio da velocidade do vento é de 1,3%. Considerando o cenário de futuro distante, caixa da direita, a expectativa de aumento na velocidade do vento é maior, com um aumento médio em torno de 8% para o RCP8.5 e de 1,6% para o RCP4.5.

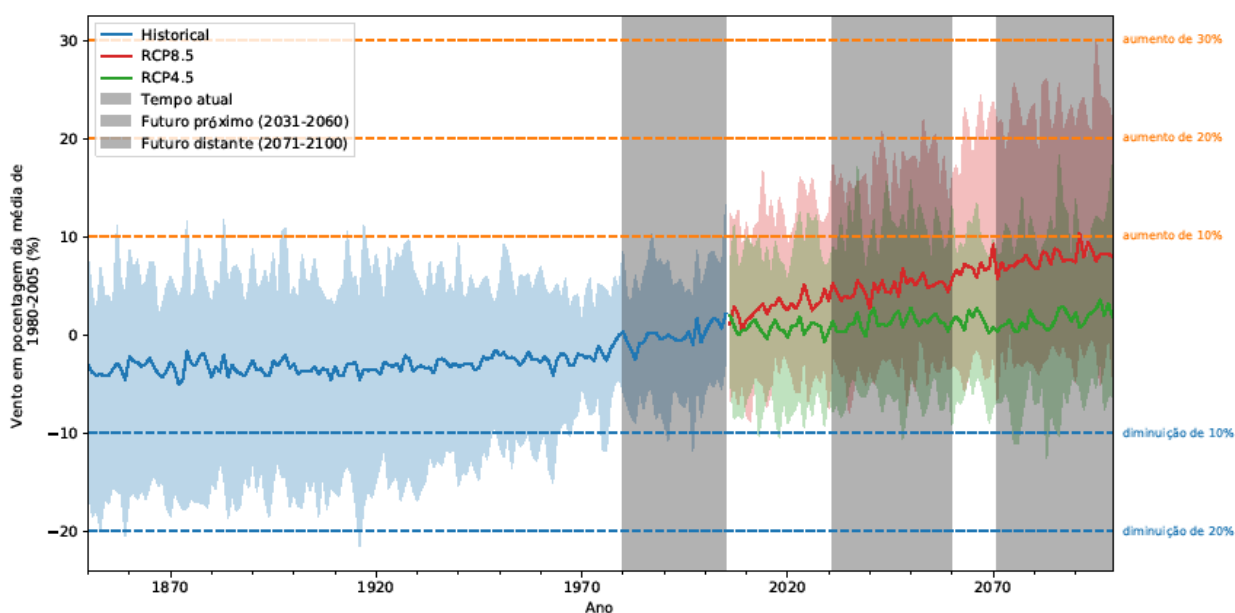


Figura 4. 3: Série temporal da diferença da velocidade do vento de cada ano com a média histórica, para o RCP4.5 e 8.5. As três regiões retangulares representam o período histórico, futuro próximo e futuro distante, respectivamente.

A Tabela 4. 1 oferece mais detalhes sobre as informações contidas na Figura 4. 3, agora mostrando os percentis de 10% e 90% para os dois cenários para os dois RCPs.

Tabela 4. 1: Resumo das informações contidas na Figura 4. 3, mostrando o valor médio do aumento do vento para o cenário e entre colchetes os percentis de 10% e 90%, respectivamente.

	Futuro Próximo (%)	Futuro Distante (%)
Aumento de vento - RCP8.5	4,9 [-0,2 ; 13,4]	7,8 [0,3 ; 20,7]
Aumento de vento - RCP4.5	1,3 [-2,6 ; 6,6]	1,6 [-3,1 ; 5,69]

Com relação à variação média sazonal percentual do vento em relação à média do período histórico, os resultados para os dois RCPs apresentam resultados similares, de forma que tanto para o futuro próximo, Figura 4. 4 (a) e (c), como para o futuro distante, Figura 4. 4 (b) e (d), o aumento máximo mensal ocorre na primavera e verão, principalmente para o mês de novembro, e também é possível observar que para o inverno a magnitude de aumento da média do vento é menos intensa. O aumento do vento no verão pode ser significativo para os parques na região, pois atualmente a época de maior fator de capacidade é o inverno.

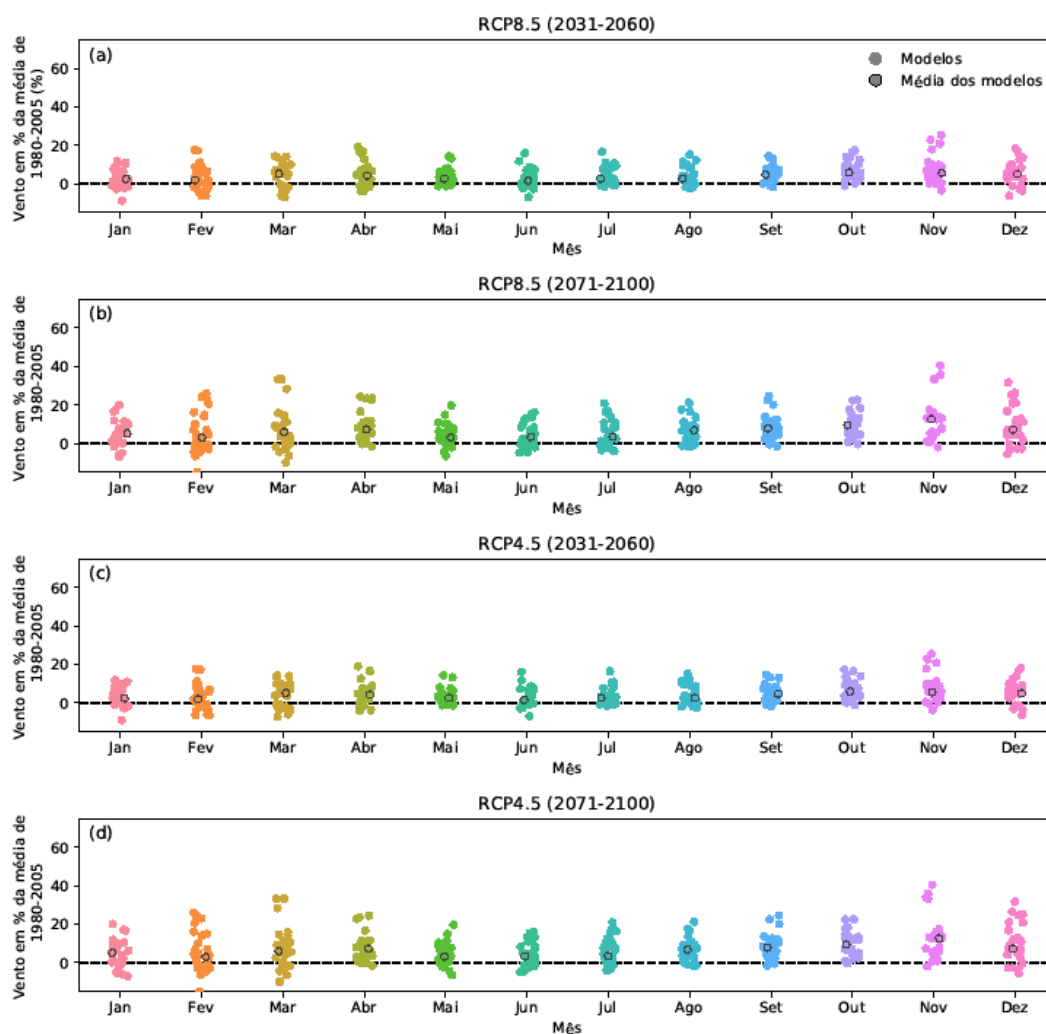


Figura 4. 4: Médias mensais dos modelos do CMIP5 da porcentagem do aumento ou diminuição do vento em relação ao vento do período histórico para: (a) e (c) futuro próximo, (b) e (d) futuro distante, para RCP8.5 e RCP4.5, respectivamente.

A direção predominante do vento na região sul da Bahia, representada pelos dados de reanálise do ERA5, foi bem captada pelo período histórico dos dados do CMIP5 para os dois RCPs, Figura 4. 5 (a) e (d), respectivamente. Nota-se ainda que, para cenários futuros, Figura 4. 5 (b), (c), (e) e (f), os modelos apontam para ventos com maior predominância de leste, em acordo com uma circulação de brisa mais intensificada como consequência do aumento do gradiente de temperatura continente-oceano num cenário de aquecimento global.

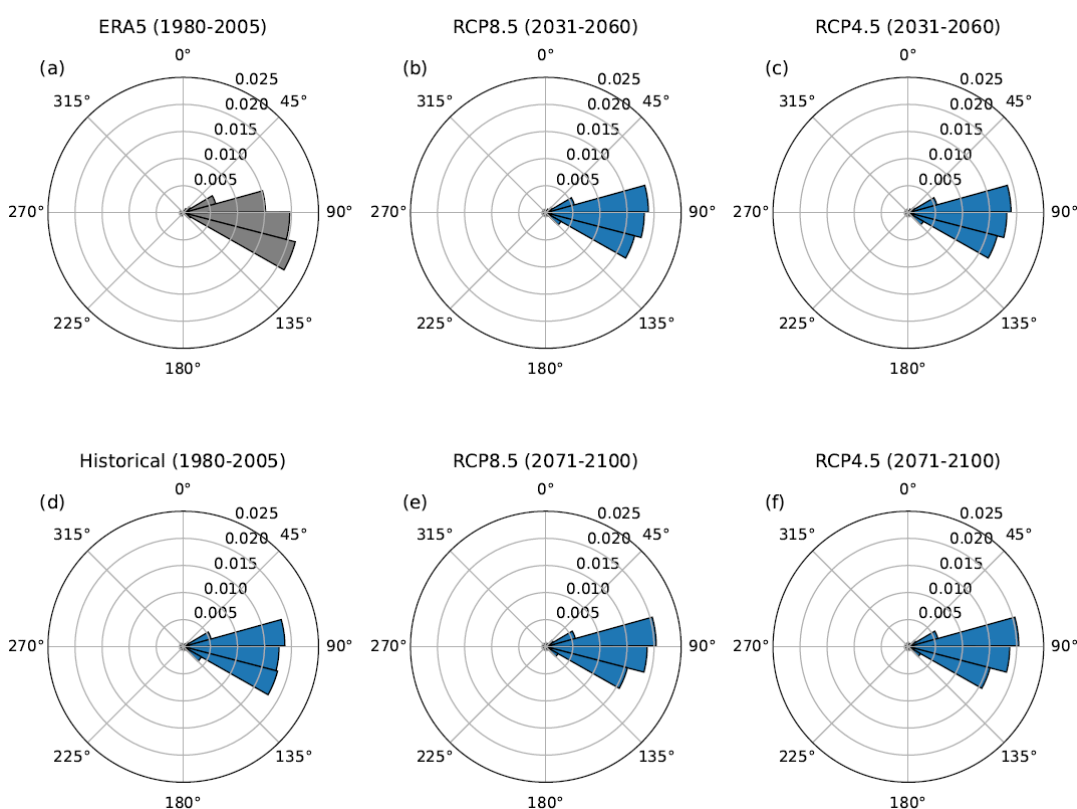


Figura 4. 5: Rosa dos ventos para os dados de reanálise (a), média do: período histórico (d), do futuro próximo (b) e (c) e futuro distante (e) e (f), para RCP8.5 e RCP4.5, respectivamente. Região sul da Bahia.

De forma geral, no cenário de maior efeito da forçante antropogênica, RCP8.5, os modelos, que apesar de grande incerteza, apresentam tendência de aumento para todo o Nordeste Brasileiro, isto ocorre de forma clara para a região sul da Bahia, onde 90% dos modelos convergem para um aumento da velocidade média do vento, principalmente nos meses de primavera-verão, além disso espera-se que haja manutenção, e inclusive intensificação, do regime de ventos com pouco giro e direção predominante de leste, estes dois fatores são muito benéficos para a geração de energia eólica, que depende de um vento com pouca variação de direção e é proporcional ao cubo da velocidade do vento, sabendo disso, com o aumento médio

da velocidade do vento é possível estimar de forma simplificada o aumento do potencial de geração de energia eólica na região para os cenários discutidos acima. Os resultados desta estimativa são apresentados na Tabela 4. 2.

Tabela 4. 2: Estimativa do aumento do potencial de geração de energia eólica para a região sul da Bahia para os cenários de “futuro próximo” e “futuro distante” para os RCPs de 8.5 e 4.5.

	Futuro Próximo (%)	Futuro Distante (%)
Aumento de geração - RCP8.5	15	26
Aumento de geração - RCP4.5	4	5

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve o intuito de avaliar os possíveis impactos das mudanças climáticas na geração de energia eólica na região sul da Bahia. Para tal, foi analisada a tendência na mudança da magnitude do vento na região, através do conjunto de modelos meteorológicos globais contidos no CMIP5, utilizando o RCP8.5 para que a forçante antropogênica fosse destacada, e o RCP4.5 para um cenário mais otimista em relação ao controle e redução da emissão de gases do efeito estufa. Os resultados apresentados foram divididos em dois cenários: “futuro próximo” (2031 – 2060) e “futuro distante” (2071 – 2100).

De forma geral, para o RCP8.5, os dois cenários mostraram tendência de aumento da velocidade do vento para a região, e esta tendência apareceu em ao menos 60% dos modelos. Para o “futuro próximo” a média de aumento foi de aproximadamente 5,0% com -0,2% para o percentil de 10%, e 13,4% para o percentil de 90%. Para o “futuro distante”, a média ficou em torno de 8,0%, com 0,3% para o percentil de 10% e 20,7% para o percentil de 90%. Como a geração em uma turbina eólica depende da velocidade do vento ao cubo, a densidade de energia pode aumentar significativamente para a região, para o cenário de “futuro próximo” este aumento na geração eólica pode ser da ordem de 15%, e de 25% no “futuro distante”.

Os resultados encontrados com o RCP4.5 apresentaram também um aumento médio na velocidade do vento para os dois cenários, porém de forma menos acentuada do que do RCP8.5. Para o “futuro próximo” o aumento médio foi de 1,3%, com -2,6% e 6,6% para os percentis de 10% e 90%, respectivamente. E para o “futuro distante” o aumento médio foi de 1,6% com -3,1% e 5,7% para os percentis de 10% e 90%, respectivamente. O aumento de geração de energia eólica pode ser da ordem de 4% para o “futuro próximo” e 5% para o “futuro distante”.

Foi possível identificar que o aumento da magnitude do vento em relação à média ocorrerá principalmente nas estações da primavera e verão, e haverá a manutenção, senão intensificação, da predominância de um regime de ventos de leste com pouquíssimo giro, condição muito favorável para a geração de energia eólica naquela região. O aumento da intensidade do vento nos meses de primavera e verão, ajudará a diminuir a sazonalidade do período de geração de energia eólica, sendo hoje mais intensa nos meses de inverno.

Além disso, analisando as tendências de temperatura para o RCP8.5 e RCP4.5 e comparando com os dados de reanálise do ERA5, há indícios de que o RCP8.5 possa ser o mais próximo da realidade no futuro. Porém, vale ressaltar que este panorama apresentado tem grande incerteza associada aos modelos, como pode ser visto pela grande diferença de valores dos percentis de 10 e 90%, sendo necessário mais estudos para melhorar a compreensão de qual é a sensibilidade da tendência de vento na região com relação ao aumento de temperatura da Terra.

REFERÊNCIAS

AMARANTE, O. A.; BROWER, M.; ZACK, J. **Atlas do potencial eólico brasileiro. Atlas do potencial eólico brasileiro**, v. Ministerio, 2001.

BINDOFF, N. L. et al. IPCC 2013 AR5 - Chapter 10: Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional. **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, *[S. l.]*, 2013.

BRUYERE, Cindy L.; MONAGHAN, Andrew J.; STEINHOFF, Daniel F.; YATES, David. **Bias-Corrected CMIP5 CESM Data in WRF/MPAS Intermediate File Format**. [s.l: s.n.].

CAVALCANTI, I. F. A. **Tempo e Clima no Brasil**. [s.l.] São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

CARVALHO, D.; ROCHA, A.; GÓMEZ-GESTEIRA, M.; SILVA SANTOS, C. Potential impacts of climate change on European wind energy resource under the CMIP5 future climate projections. **Renewable Energy**, *[S. l.]*, v. 101, n. 2017, p. 29–40, 2017. DOI: 10.1016/j.renene.2016.08.036.

HARTMANN, Dennis L. et al. Observations: Atmosphere and surface. *In: Climate Change 2013 the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [s.l: s.n.]. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.008.

HERSBACH, Hans et al. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, *[S. l.]*, v. 146, n. 730, p. 1999–2049, 2020. DOI: 10.1002/qj.3803.

JACOB, Daniel J. 7. The Greenhouse Effect. *In: Introduction to Atmospheric Chemistry*. [s.l: s.n.]. DOI: 10.1515/9781400841547-008.

KARNAUSKAS, Kristopher B.; LUNDQUIST, Julie K.; ZHANG, Lei. Southward shift of the global wind energy resource under high carbon dioxide emissions. **Nature Geoscience**, *[S. l.]*, v. 11, n. 1, p. 38–43, 2018. DOI: 10.1038/s41561-017-0029-9. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41561-017-0029-9>.

MORICE, Colin P.; KENNEDY, John J.; RAYNER, Nick A.; JONES, Phil D. Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 data set. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, *[S. l.]*, v. 117, n. 8, p. 1–22, 2012. DOI:

10.1029/2011JD017187.

OTTO, Friederike E. L. et al. **Factors other than climate change, main drivers of 2014/15 water shortage in southeast Brazil** *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015. DOI: 10.1175/BAMS-D-15-00120.1.

PEREIRA, Enio B.; MARTINS, Fernando R.; PES, Marcelo P.; DA CRUZ SEGUNDO, Eliude I.; LYRA, André de A. The impacts of global climate changes on the wind power density in Brazil. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 49, p. 107–110, 2013. DOI: 10.1016/j.renene.2012.01.053. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.053>.

PES, Marcelo P.; PEREIRA, Enio B.; MARENGO, Jose A.; MARTINS, Fernando R.; HEINEMANN, Detlev; SCHMIDT, Michael. Climate trends on the extreme winds in Brazil. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 109, p. 110–120, 2017. DOI: 10.1016/j.renene.2016.12.101.

RHEIN, M. et al. Observations: Ocean. 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*. In: **Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 255**. [s.l: s.n.].

RUFFATO-FERREIRA, Vera; DA COSTA BARRETO, Renata; OSCAR JÚNIOR, Antonio; SILVA, Wanderson Luiz; DE BERRÊDO VIANA, Daniel; DO NASCIMENTO, José Antonio Sena; DE FREITAS, Marcos Aurélio Vasconcelos. 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**, [S. l.], v. 72, n. October 2015, p. 1124–1137, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2016.10.020.

WALLACE, John M.; PETER V. HOBBS. **Atmopsheric Science:An Introductory Survey**. [s.l: s.n.].