

VARIAÇÕES NA FREQUÊNCIA DE VENTOS EXTREMOS E SEU IMPACTO NO SETOR DE ENERGIA

Francisco José Lopes de Lima¹
André Rodrigues Gonçalves¹
Rodrigo Santos Costa¹
Fernando Ramos Martins²
Enio Bueno Pereira¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

²Universidade Federal do Estado de São Paulo

DOI: 10.47168/rbe.v26i3.575

Recebido em: 12.07.2020

Aceito em: 18.08.2020

RESUMO

Eventos extremos de vento causam prejuízos diversos à sociedade, tais como destelhamentos, danos a coberturas, prédios, pontes e queda de árvores mas, especificamente no setor de energia, estes eventos podem danificar torres de transmissão e aerogeradores, além de outros componentes do sistema de geração e transmissão. Este trabalho busca quantificar a frequência de extremos de rajadas de vento utilizando modelos climáticos ajustados com dados medidos em superfície para o período de 1961 a 2005. Posteriormente, foram utilizadas as projeções futuras dos mesmos modelos para identificar alterações na frequência dos ventos extremos até o ano de 2070. As projeções mostraram um aumento na frequência de rajadas de vento acima de 20 m/s. O aumento pode ser comprovado pelo índice FAR (*Fraction Atributable Risk*), e percentil 99 (P99).

Palavras-chave: Eventos extremos, Modelos climáticos e período de retorno.

ABSTRACT

Extreme wind events cause various damage to society, such as desolations, damage to roofs, buildings, bridges and falling trees, but specifically in the energy sector these events can damage transmission towers, wind turbines and other components of the generation and transmission system. This work quantifies the frequency of extremes of wind gusts using historical series of data observed on the surface, adjusted by climatic models, for the period from 1961 to 2005. It later uses future projections derived from these models to identify variations

in the frequency of extreme winds until the year 2070. Projections showed an increase in the frequency of wind gusts above 20 m/s. The increase can be proven by the FAR (Fraction Attributable Risk) index, and 99th percentile (P99).

Keywords: Extreme events, Climate models and return period.

1. INTRODUÇÃO

Alterações no clima futuro, sejam de origem antropogênica ou não, devem ter um impacto mais significativo sobre a frequência de extremos do que sobre o valor médio de uma variável ambiental em si. Eventos extremos de vento (ou rajadas) causam prejuízos diversos à sociedade, como destelhamentos, danos a coberturas, prédios, pontes, queda de árvores e eventualmente danos a torres de transmissão de energia, o que implica perdas econômicas e riscos a infraestrutura e a segurança pública. Quantificar o risco futuro que ventos extremos podem ocasionar ao setor de energia passa por compreender melhor as relações entre as projeções climáticas e o comportamento do vento sobre nosso território, conforme discutido em diversos trabalhos (GILLILAND; KEIM, 2018; MARTINS; PEREIRA, 2011; PES et al., 2017).

Dessa forma, um dos fatores motivadores deste trabalho é que o Brasil não possui um mapeamento das áreas de maior risco de ocorrência de ventos extremos. Gerar informações que contribuam para o planejamento e operação dos atuais e futuros investimentos é bastante relevante, já que a informação dos máximos de vento que ocorrem no local interessam, por exemplo, a setores como o de distribuição de energia elétrica, de energia eólica, de aviação e da construção civil, dentre outros.

Pesquisas publicadas recentemente sugerem que devido às Mudanças Climáticas Globais (GILLILAND; KEIM, 2018; MARTINS; PEREIRA, 2011; PES et al., 2017), o regime de ventos de algumas regiões pode sofrer variações. Destaca-se o trabalho de Pes et al., (2017) que fez uma análise detalhada sobre eventos extremos de vento e indicaram alterações na frequência de ocorrência com base na avaliação de simulações de 45 anos do modelo Eta.

Desta forma, o objetivo deste trabalho é avaliar os valores extremos de vento para o período de retorno de 50 anos obtidos a partir de rodadas históricas e projeções futuras do modelo climático Eta, regionalizadas pelo modelo global HadGEM2-ES e corrigidas por observações de superfície. Uma das principais justificativas para a análise de ventos extremos usando modelos de projeções futuras é a baixa

densidade de dados de ventos observados no Brasil, em especial no Estado de Santa Catarina. Também será realizada uma avaliação do quanto o clima futuro poderia afetar as linhas aéreas de transmissão de energia elétrica, o que ajuda a detalhar os critérios de severidade de vento que devem ser usados para garantir a segurança das edificações e das torres de distribuição de energia, em complemento aos requisitos impostos pelas normas técnicas brasileiras.

2. METODOLOGIA

A primeira etapa consistiu em corrigir o modelo Eta para o período baseline entre 1961 e 2005, utilizando séries de vento em superfície ao nível de 10 metros, superiores a trinta anos de dados, registradas no aeroporto de Florianópolis, bem como estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia que estão distribuídas em todo o Estado de Santa Catarina. O modelo Eta foi integrado com as condições de contorno do modelo global HadGEM2-ES (Eta- HadGEM2-ES).

Na segunda etapa foram utilizados os parâmetros das correções estatísticas obtidas na fase anterior para a correção dos cenários futuros de vento, obtendo assim séries futuras para cada uma das estações em particular, além de mapas de tendência e frequência de vento. Foram abordados, então, a análise dos resultados da aplicação dos valores extremos de vento para períodos de retorno de 50 anos em cenários de mudanças climáticas e mapas de alterações de risco futuro (índice FAR). As integrações do clima futuro utilizadas são baseadas nos caminhos representativos de concentração dos Gases do Efeito Estufa (GEE) e suas forçantes radiativas no clima, nomeados de *Representative Concentration Pathway* (RCP) (MOSS et al., 2010). Os valores seguidos da sigla “RCP” indicam o nível de concentração das forçantes radiativas, dadas em W/m^2 (MESINGER et al., 1988; CHOU et al., 2011, 2012, 2014). Neste estudo, foram consideradas as concentrações intermediárias-baixas (RCP4.5 - cenário otimista) e de alta concentração (RCP8.5 - cenário pessimista).

2.1 Remoção de Viés do modelo Eta-HadGEM2-ES

A correção dos dados de velocidade de vento do modelo Eta foi realizada com base nos parâmetros da distribuição de Weibull. Ou seja, foram extraídas séries temporais do modelo Eta para cada latitude e longitude onde estão localizadas as estações meteorológicas e, com isso, obtidos os parâmetros c e k dos dados simulados e observados. A partir da diferença percentual dos parâmetros c e k (observados

e simulados) foi gerado o mapa de correção, partindo da interpolação linear dos parâmetros; este mapa foi “aplicado” a toda a grade do modelo para o período histórico. Uma vez validado, o modelo foi aplicado para o período futuro, nos dados de projeções climáticas. Como em 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).

Os modelos atmosféricos de mesoescala possuem limitações, associadas principalmente as parametrizações de processos *sub-grade* e as imperfeições nas condições iniciais e no equacionamento, que somado à restrição no intervalo de integração de seu núcleo dinâmico, impede que se detecte rajadas de vento na escala de poucos segundos. Por esta razão, é necessário estimar as intensidades de rajada a partir do vento médio calculado pelo modelo. A metodologia utilizada para encontrar uma relação entre a rajada máxima diária e a velocidade máxima diária do vento observado partiu de uma relação linear entre as variáveis e foi aplicada aos dados do modelo Eta. A existência desta relação pode ser verificada na Figura 1 (velocidade versus rajada), embora a dispersão dos dados seja grande. Observa-se ainda que, na Figura 1, temos um único ajuste para todas as estações do INMET, que é o objetivo destes ajustes - uma única regressão que represente todas as estações.

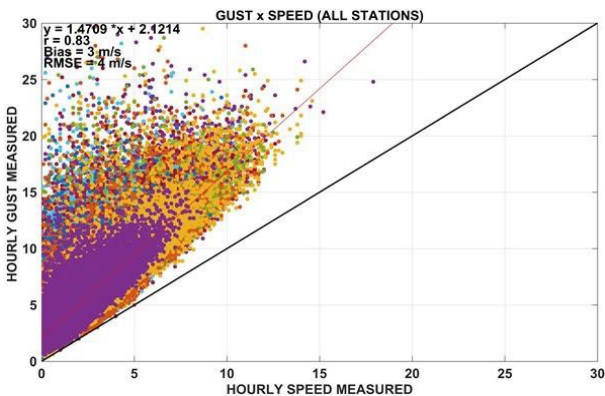


Figura 1 – Dispersão entre os dados de velocidade (média de 10 minutos) e rajada do vento observado em intervalos horários a 10m de altura para todas as estações, ou seja, um único ajuste para todas estações

2.2 Distribuição de probabilidade de frequência das séries de vento máximo

Para obter as funções de distribuições de probabilidade (PDF) foi utilizado o modelo de Weibull, e a determinação dos parâmetros das distribuições foi obtida por meio do método da máxima verossimilhança (REISS; THOMAS, 2007). A distribuição de Weibull é amplamente usada no setor de energia eólica para avaliar a viabilidade do vento na geração de energia elétrica (ANGELI SANSIGOLO, 2005; VAN DER AUWERA; DE MEYER; MALET, 1980).

Um dos maiores objetivos da análise de valores extremos é a estimativa do período de retorno T (REISS; THOMAS, 2007), sendo ele o período médio em que um determinado evento é igualado ou superado pelo menos uma vez. Esse parâmetro estatístico é empregado no estudo de eventos extremos, sendo amplamente utilizado em hidrologia, principalmente na prevenção de inundações. A análise de período de retorno é mais interessante se as observações forem feitas em intervalos equidistantes de tempo, como é o caso da meteorologia estatística. Dessa forma, o tempo de retorno é uma medida de tempo e para observações anuais, ele representa um número de anos (GUMBEL, 2004). Seja x um evento e T o tempo entre os eventos consecutivos x , o valor médio da variável T é denominado período de retorno da variável x . O período de retorno é determinado através da seguinte função:

$$T(x) = 1 / [1 - P(x)] \quad (1)$$

onde P é a probabilidade de um valor qualquer de uma variável x ocorrer novamente ou ser superada ao menos uma vez.

O Conceito de Fraction Attributable Risk (FAR) (STOTT et al., 2016), foi aplicado pela primeira vez em uma análise de onda de calor na Europa. Essa foi a primeira instância de atribuição de um evento fornecendo uma ligação direta entre mudança climática antropogênica e um evento climático extremo. Para obter este resultado, a probabilidade (P_1) de um registro de onda de calor em uma determinada região europeia foi comparado com sua probabilidade (P_0) de não ter influências antropogênicas sobre o clima. Portanto, tendo calculado as probabilidades do evento na presença e na ausência das alterações climáticas antropogênicas, P_1 e P_0 , os resultados podem ser expressos como uma probabilidade, P_1/P_0 , ou seja, no caso uma fração da probabilidade.

Alternativamente, eles podem ser expressos como um extremo, calculado como $1-P_0/P_1$ onde um extremo superior a 0,5, como neste caso, indica sua probabilidade de aumento.

3. RESULTADOS

Uma avaliação das simulações do período histórico dos modelos EtaHadGEM2-ES é apresentada juntamente com uma descrição das distribuições de função e discussões sobre os erros. Nas figuras de distribuição de probabilidade de frequência e probabilidade acumulada são apresentadas as comparações entre as duas distribuições, a observada (azul) e a simulada (laranja). Observa-se na Figura 2 que o modelo Eta tende a superestimar os dados para as estações das figuras abaixo e que apesar de o modelo apresentar um viés elevado, ocorre uma concordância entre os dados observados e modelados nas estações de Florianópolis e Dionísio Cerqueira. Após corrigidos pelos parâmetros da distribuição de Weibull, estes apresentam distribuição de frequência similar aos dados medidos para a maior parte das estações de Santa Catarina (SC). Observa-se ainda que os modelos corrigidos apresentam médias semelhantes aos dados medidos e percebe-se uma maior concordância entre os dados medidos e modelados em todas as estações – entretanto, nestas comparações, serão apresentadas as análises das estações de Florianópolis e Dionísio Cerqueira, onde foram observados os piores e os melhores resultados.

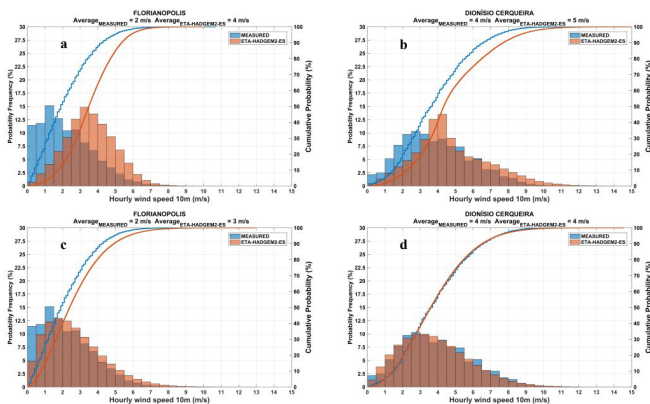


Figura 2 – Distribuições de probabilidade de frequência e probabilidade acumulada dos dados medidos e do modelo Eta-HADGEM-ES (a) e (b) comparações originais, (c) e (d) corrigidos pela porcentagem da diferença dos parâmetros da distribuição de Weibull, período histórico, para a velocidade do vento a 10m de altura.

Na Figura 3 é mostrada comparação entre as simulações e dados observados de rajada de vento a 10 metros de altura. A rajada de vento foi estimada para os dados simulados através da já comentada regressão linear, obtida então para todas as estações, comparando a velocidade do vento horário com a máxima rajada no intervalo de uma hora dos dados medidos. Observa-se que o modelo Eta tende a simular bem os extremos observados nos dados medidos para a rajada do vento horário nas estações de Florianópolis e Dionísio Cerqueira para o período histórico, indicando que a correção foi satisfatória. Isto oferece suporte ao desenvolvimento de uma metodologia para estimar a máxima rajada de vento máximo diária no modelo, para as projeções. Possibilita ainda um estudo aprofundado e o desenvolvimento de novas metodologias estatísticas para este tipo de inferência em modelos atmosféricos.

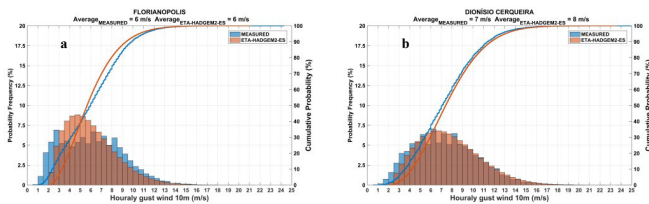


Figura 3 – Distribuições de probabilidade de frequência e probabilidade acumulada dos dados medidos de rajada de vento (em azul) e do modelo Eta-Hadgem2-ES (a e b) em laranja estimados a partir da regressão linear mostrada na Figura 1, período histórico, para o vento a 10m de altura

A Figura 4 apresenta os mapas da rajada máxima (a) e do P99 (b) do vento para o Eta-HADGEM2-ES. Observa-se um padrão semelhante entre os dois gráficos, verificado em todo o período de dados, e a localização de duas linhas de transmissão. Observa-se que os maiores valores de vento ocorrem no oeste do Estado, onde está localizado a linha de transmissão do Ita-Salto Santiago, e os menores valores são encontrados no leste do Estado, onde se localiza a linha de Biguaçu-Blumenau. Entretanto, também são observadas rajadas elevadas de vento em uma pequena porção sudeste do Estado, próximo a região dos cânions.

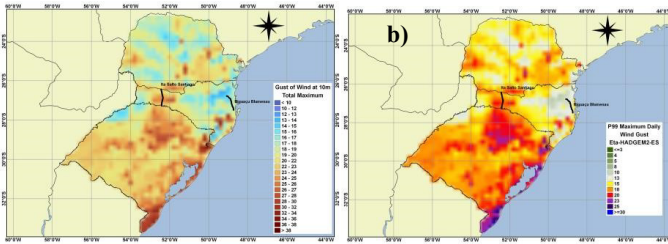


Figura 4 – Rajada máxima do vento simulado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES

A Figura 5 apresenta os mapas das diferenças das rajadas máximas para o período de retorno de 50 anos entre o clima atual (histórico) e o clima futuro (projeções) do modelo Eta-HadGEM2-ES. Valores positivos indicam que no clima futuro a intensidade do vento será maior que no clima atual, enquanto valores negativos indicam que a intensidade do vento no clima futuro será menor do que o atual.

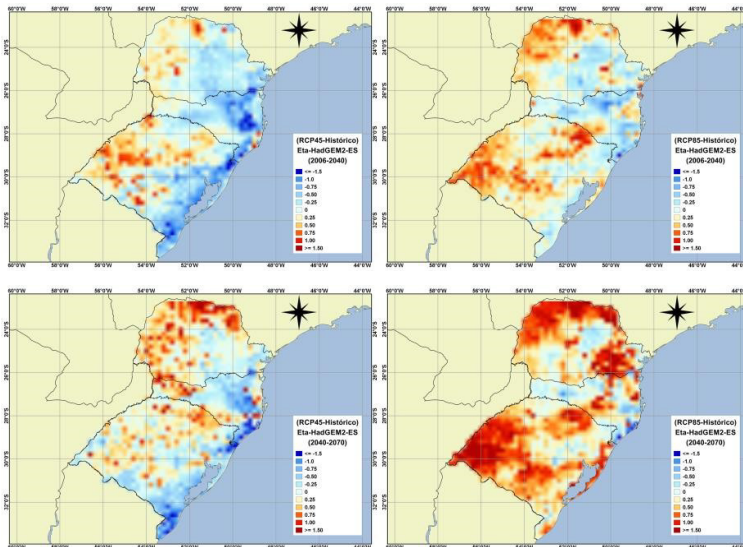


Figura 5 – Diferença da rajada máxima anual do vento para o período de retorno de 50 anos entre o clima atual (histórico) e futuro (projeções), simulados pelo modelo Eta-HadGEM2-ES. Os mapas à esquerda referem-se ao cenário RCP4.5 e os mapas à direita ao cenário RCP8.5

De modo geral, são observadas diferenças relevantes entre as projeções e o histórico - tanto no aspecto quantitativo como no que diz respeito ao padrão espacial, principalmente no cenário RCP8.5. Na Figura 6, que mostra as projeções do EtaHadGEM2-ES, foi observada uma diferença expressiva entre as partições do clima futuro. É possível observar variações positivas na intensidade do vento entre os períodos de 2006-2040 e 2040-2070. Isto pode ser mais claramente observado no cenário pessimista (RCP8.5), no qual o vento tende a ficar mais intenso à medida que se aproxima do final do século. Diferenças significativas também foram verificadas entre os dois cenários analisados, no qual se pode observar a preponderância de alterações mais acentuadas da intensidade do vento no RCP8.5 em relação ao RCP4.5. Os resultados sugerem que a Região Sul do Brasil pode ser mais susceptível à ocorrência de ventos mais intensos, em um cenário futuro com maiores níveis de emissões de gases do efeito estufa, principalmente em seu setor oeste.

Na Figura 6 tem-se os mapas da diferença entre o 99° percentil (P99) da rajada máxima do vento do período histórico e das projeções futuras. Observa-se no cenário RCP8.5 um aumento significativo da rajada no oeste, e um leve aumento ao leste do Estado de Santa Catarina. No cenário RCP4.5 este padrão espacial também pode ser observado, porém em menor intensidade que no RCP8.5. Os cenários mostram que os maiores valores de rajada (ou as maiores alterações nas mesmas) ocorrerão a Oeste do Estado, onde está localizada a linha de transmissão do Ita-Salto Santiago. Já os menores valores (ou as menores alterações) são encontrados a Leste do Estado de Santa Catarina, onde se localiza a linha de Biguaçu-Blumenau. Ainda, observa-se valores intensos de vento (ou de variação) no Sudeste do Estado.

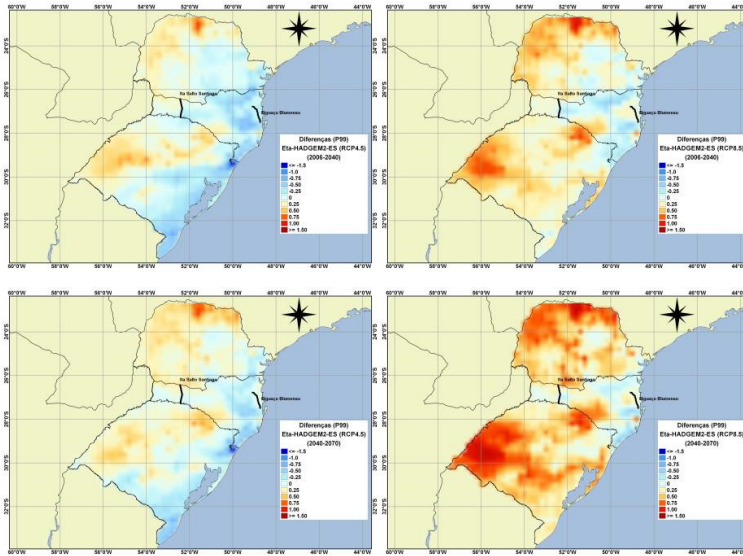


Figura 6 – Diferença do percentil 99 (P99) da Rajada máxima do vento simulado pelo modelo EtaHADGEM2-ES (Projeções – Histórico)

Na Figura 7 tem-se o mapa da distribuição do índice FAR máximo da rajada do vento calculado a partir do período histórico e das projeções futuras verificadas em todo o período de dados para o modelo Eta-HadGEM2-ES. Foi calculada a probabilidade de ocorrência da rajada de 20 m/s no período histórico e nas projeções a partir dos valores de FAR indicados nas figuras seguintes. Pode-se verificar os resultados para o modelo Eta-HadGEM2-ES, onde valores de FAR maiores que zero indicam que o evento se tornou mais provável devido as alterações climáticas. Serão apresentados apenas valores de FAR positivo, porém os mesmos argumentos são válidos para valores negativos, que indicam diminuição de valores extremos.

Foram observados valores elevados de FAR no Oeste do Estado, aumentando significativamente ao longo do século. Avaliando o cenário mais pessimista (RCP8.5), a alteração do índice FAR fica ainda mais evidente. No Leste do Estado, onde está localizada a linha de Biguaçu-Blumenau, não se observa um comportamento relevante em relação ao índice. Já a linha Itá-Salto Santiago está localizada onde temos os maiores valores do índice de FAR no Estado, o que pode servir de alerta para os tomadores de decisões. Estes resultados indicam que eventos extremos de rajada de vento mais intensas são esperados a Oeste do Estado de Santa Catarina no decorrer deste século.

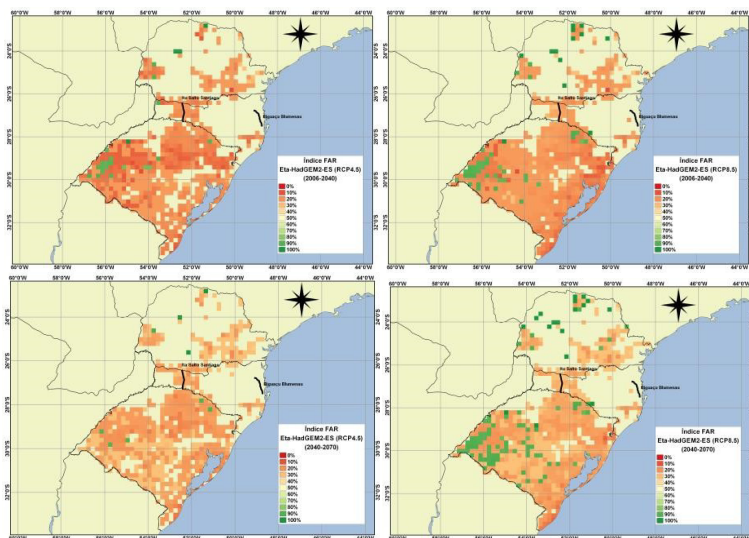


Figura 7 – Mapa da variação do indicador de risco de mudanças climáticas FAR, simulado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES, correspondente ao aumento na probabilidade da rajada de vento ultrapassar os 20 m/s

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho investigou os aspectos relativos à ocorrência de ventos extremos máximos no estado de Santa Catarina a partir das projeções climáticas do modelo Eta-HADGEM2-ES, compreendendo a validação das rodadas históricas, a correção do viés do modelo, o ajuste de uma relação entre o vento médio e a rajada do vento, distribuição de eventos extremos e método estatísticos de ajuste. Encontrou-se uma relação estatística preliminar entre o vento médio e o vento de rajada, o que possibilitou estimar valores mais realistas da rajada máxima. Os resultados mostraram que são esperadas alterações significativas nos regimes de vento no Estado de Santa Catarina, servindo de alerta para os tomadores de decisão.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao suporte financeiro da Petrobras, através dos Projetos ANEEL PD-00553-0034/2016 e PD-00553-0042/2016. Agradecem também ao Instituto Nacional de Ciência e Tec-

nologia para Mudanças Climáticas (INCT-MC), através dos processos CNPq 573797/2008-0 e FAPESP 2008/57719-9. Por fim, ao apoio da FAPESP, através do processo 2019/05361-8.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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*, 2011.

CHOU, S. C. et al. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. *Climate Dynamics*, 2012.

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

GILLILAND, J. M.; KEIM, B. D. Surface wind speed: trend and climatology of Brazil from 1980–2014. *International Journal of Climatology*, 2018.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. Enhancing information for solar and wind energy technology deployment in Brazil. *Energy Policy*, v. 39, n. 7, p. 4378–4390, 2011.

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.

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

NBR 6123. NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988.

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

PINTO, H. S. Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil. Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável, 2012.

REISS, R. D.; THOMAS, M. Statistical analysis of extreme values: With applications to insurance, finance, hydrology and other fields: Third edition. [s.l.: s.n.].

SANSIGOLO, C. A. Distribuições de probabilidade de velocidade e potência do vento, *Revista Brasileira de Meteorologia*. [s.l.: s.n.].

STOTT, P. A. et al. Attribution of extreme weather and climate-related events. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, v. 7, n. 1, p. 23–41, 2016.

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

VAN DER AUWERA, L.; DE MEYER, F.; MALET, L. M. The Use of the Weibull ThreeParameter Model for Estimating Mean Wind Power Densities *Journal of Applied Meteorology*, 1980.