



DESENVOLVIMENTO DE SERVIÇOS CLIMÁTICOS PARA ANÁLISE DE RISCO EM INFRAESTRUTURA DE LINHA DE TRANSMISSÃO EM SANTA CATARINA

Relatório 5/5 - Classificação da Probabilidade de Ventos Extremos Oriundos do Histórico e Projeções Climáticas dos Modelos Eta-HADGEM2-ES (5 km e 20 km) e Eta-MIROC5 (20 km)

Francisco Lima

Elaborado por: **Francisco Lima**

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 Madruça

EQUIPE TÉCNICA - GIZ

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

EQUIPE TÉCNICA - DEFESA CIVIL/ SANTA CATARINA

Flavio Rene Brea Victoria
Frederico Moraes Rudorff

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Chou Sin Chan

EQUIPE TÉCNICA - ELETROSUL

Diego Luis Tedesco Dandolini (coordenação)
André Luis Padovan
Jacira Prichula
Rogério Parrela de Amorim
Marisa Bender
Loriane Silveira

Giancarlo Maffezzoli
Mércio Antonio Pavanati
Marcelo Kotani
Julian Luis Reis
Claudia Teresa Pillatti
Raquel Carolina Chinchilla Cartagena

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	3
LISTA DE TABELAS.....	6
1. INTRODUÇÃO	7
2. OBJETIVOS	8
2.2. Objetivos Específicos.....	9
3. MATERIAL E MÉTODO	9
3.1. Metodologia.....	9
3.2. Área de Estudo e Dados Observacionais	10
3.3. Remoção de Viés do modelo Eta-HadGEM2-ES-5km	11
3.4. Distribuição de Probabilidade de Frequência das Séries de Vento Máximo.....	13
3.5. Período de Retorno – T.....	14
3.6. Índice FAR.....	14
3.7. Análise de Tendência - Teste de Kendall.....	16
3.8. Classificação da Escala de Probabilidade.....	18
4. RESULTADOS: PERÍODO HISTÓRICO	19
4.1. Resultado das Avaliação dos Modelos Eta-HadGEM2-ES-5km... 20	
4.2. Resultados da correção do viés do modelo Eta.	22
4.3. Resultado da Relação entre a velocidade do vento horário observado e a rajada do vento horário observados.	26
4.4. Análise Espacial do Período de Retorno de 50 anos com as Distribuições GEV, Weibull e Gumbel para a Rajada do Vento Simulado pelo Modelo ETA.....	29
5. RESULTADOS DAS PROJEÇÕES	33
5.1. Análise Espacial da Diferença entre as Rajadas Máximas para o Período de Retorno de 50 anos do Período Histórico e das Projeções Simuladas pelo Modelo ETA	34
5.2. Resultado do Teste de Tendência para os Modelos Eta-HADGEM2-ES (5 km), Eta-HADGEM2-ES (20 km) e Eta-MIROC5 (20 km) para o Período Histórico e Projeções.....	40

5.3. Classificação da probabilidade de ventos extremos oriundos do histórico e projeções climáticas dos modelos Eta-HADGEM2-ES (5 km), Eta-HADGEM2-ES (20 km), Eta-MIROC5 (20 km)	44
6. CONCLUSÕES	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Área de estudo e a localização das estações automáticas do INMET (identificados por pontos pretos) e METAR (identificados por pontos azuis)..... 11
- Figura 2.** Uma ilustração das funções de densidade de probabilidade (PDFs) de uma variável climática (linha verde) e o efeito da influência humana sobre o clima (linha vermelha). As probabilidades correspondentes de exceder um limiar (P_1 e P_0) são representadas pelas áreas tracejadas da mesma cor. A linha vermelha tracejada ilustra como o PDF do mundo real pode variar com a mudança do clima. 15
- Figura 3.** Distribuições de probabilidade de frequência (barras) e probabilidade acumulada (linhas) dos dados medidos (tons em azul) e do modelo Eta-HADGEM2-ES-5km (tons em laranja), período histórico, para a velocidade do vento a 10m de altura. 22
- Figura 4.** Distribuições de probabilidade de frequência (barra) e probabilidade acumulada (linha) dos dados medidos (tons em azul) e do modelo Eta-HADGEM2-ES-5km (tons em laranja) corrigido pela porcentagem da diferença dos parâmetros da distribuição de Weibull, no período histórico, para a velocidade do vento a 10m de altura..... 25
- Figura 5.** Distribuições de probabilidade de frequência (barra) e probabilidade acumulada (linha) dos dados medidos de rajada de vento (em azul) e do modelo Eta-Hadgem2-ES (em laranja) estimados a partir da regressão linear mostrada na Figura 4, para o período histórico, em vento a 10m de altura..... 28
- Figura 6.** Rajada máxima anual do vento esperada para período de retorno de 50 anos para as simulações do período histórico do modelo Eta-HadGEM2-ES-5km pela distribuição GEV. 30
- Figura 7.** Rajada máxima anual do vento esperada para período de retorno de 50 anos para as simulações do período histórico do modelo Eta-HadGEM2-ES-5km pela distribuição Weibull (WBL)..... 30

Figura 8. Rajada máxima anual do vento esperada para período de retorno de 50 anos para as simulações do período histórico do modelo Eta-HadGEM2-ES-5km pela distribuição Gumbel (GUM).	31
Figura 9. Período de retorno da velocidade básica do vento segundo a NBR 5422.	31
Figura 10. Rajada máxima do vento simulado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES (5 km).....	32
Figura 11. Percentil 99º (P99) da Rajada máxima do vento simulado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES.	33
Figura 12. Diferença da rajada máxima anual do vento (m/s) para o período de retorno de 50 anos entre o clima atual (1975-2010) e futuro (2010-2040), simulados pelo modelo Eta-HadGEM2-ES-5km (a) RCP4.5 e (b) RCP8.5.....	36
Figura 13. Diferença do 99 percentil (P99) da Rajada máxima do vento (m/s) simulado pelo modelo Eta-HADGEM2-ES (Projeções – Histórico)...	37
Figura 14. Mapa da variação do indicador de risco de mudanças climáticas FAR, simulado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES (5 km), correspondente ao aumento na probabilidade da rajada de vento ultrapassar os 20 m/s.	39
Figura 15. Projeções futuras de rajada máxima anual de vento para as linhas de transmissão Biguaçu-Blumenau (LT Litoral) (a) e Itá-Salto Santiago (LT Oeste) (b) no cenário RCP4.5 simuladas pelos modelos Eta-HADGEM2-ES (20 km) (curva azul) e Eta-MIROC5 (20 km) (curva vermelha). As áreas hachuradas representam o desvio padrão associado a cada curva e as retas espessas representam a estimativa de tendência obtida pelo método Sen.....	41
Figura 16. Projeções futuras de rajada máxima anual de vento para as linhas de transmissão Biguaçu-Blumenau (LT Litoral) (a) e Itá-Salto Santiago (LT Oeste) (b) no cenário RCP8.5 simuladas pelos modelos Eta-HADGEM2-ES (20 km) (curva azul) e Eta-MIROC5 (20 km) (curva vermelha). As áreas hachuradas representam o desvio padrão associado	

a cada curva e as retas espessas representam a estimativa de tendência obtida pelo método Sen..... 42

Figura 17. Projeções futuras de rajada máxima anual de vento para as linhas de transmissão Biguaçu-Blumenau (LT Litoral) (curva azul) e Itá-Salto Santiago (LT Oeste) (curva Vermelha) nos cenários RCP4.5 (a) e RCP8.5 (b) simuladas pelos modelos Eta-HADGEM2-ES (5 k km). As áreas hachuradas representam o desvio padrão associado a cada curva e as retas espessas representam a estimativa de tendência obtida pelo método Sen..... 44

Figura 18. Mapa da escala de probabilidade (Tabela 1). a) Eta-HADGEM2-ES (5 km) b) Eta-HADGEM2-ES (20 km) e c) Eta-MIROC5 (20 km), período histórico, correspondente ao aumento na probabilidade da rajada de vento ultrapassar os 20 m/s. 46

Figura 19. Mapa da escala de probabilidade (Tabela 1). a) Eta-HADGEM2-ES (5 km) b) Eta-HADGEM2-ES (20 km) e c) Eta-MIROC5 (20 km), cenário RCP4.5, correspondente ao aumento na probabilidade da rajada de vento ultrapassar os 20 m/s. 48

Figura 20. Mapa da escala de probabilidade (Tabela 1). a) Eta-HADGEM2-ES (5 km) b) Eta-HADGEM2-ES (20 km) e c) Eta-MIROC5 (20 km), cenário RCP8.5, correspondente ao aumento na probabilidade da rajada de vento ultrapassar os 20 m/s. 49

Figura 21. Mapa da diferença entre as escalas de probabilidade do período histórico e do cenário RCP4.5 a) Eta-HADGEM2-ES (5 km) b) Eta-HADGEM2-ES (20 km) e c) Eta-MIROC5 (20 km). 51

Figura 22. Mapa da diferença entre as escalas de probabilidade do período histórico e do cenário RCP8.5 a) Eta-HADGEM2-ES (5 km) b) Eta-HADGEM2-ES (20 km) e c) Eta-MIROC5 (20 km). 53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição da escala de probabilidade considerando o período de 30 30 anos para rajada máxima anual acima de 20 m/s.	19
---	----

1. INTRODUÇÃO

Intensos deslocamentos de massas de ar são um dos eventos naturais mais devastadores, as altas velocidades de vento associadas a esses deslocamentos ameaçam a integridade de estruturas como linhas de transmissão de energia, telhados de edificações, pontes, turbinas eólicas, antenas difusoras, entre outras. O correto dimensionamento destas estruturas depende da estimativa de frequência e magnitude de ventos extremos, de tal forma a garantir a segurança e a evitar o superdimensionamento. Devido aos danos aos habitat humanos e às infraestruturas causados por vendavais, análises de extremos de vento formam uma parcela essencial do processo de integração entre programas governamentais contra desastres naturais e objetivos gerais de desenvolvimento (GONÇALVES, 2007).

Eventos extremos são parte integrante da variabilidade climática. De modo que, alterações no clima futuro, de origem antropogênica ou não, podem 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 causam prejuízos diversos à sociedade o que implica em perdas econômicas e riscos à infraestrutura e à segurança pública. Um detalhamento sobre eventos extremos no Brasil pode ser encontrado em (PINTO, 2012).

No Brasil, o cálculo do carregamento provocado pelo vento e da suportabilidade das estruturas de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica é regida pela normatização técnica NBR5422 (ABNT, 1985), que fixa as condições básica para o projeto das linhas aéreas de transmissão de energia elétrica de modo a garantir níveis mínimos de segurança e limitar perturbações em instalações próximas. A velocidade do vendo considerada na NBR 5422 é a velocidade de uma rajada de 3s, com tempo de recorrência de 50 anos, medidas a 10 m de altura em relação a um terreno aberto plano.

Quantificar o risco futuro que ventos extremos podem ocasionar ao setor de energia, especificamente sobre linhas de transmissão, como é o caso da Eletrosul, 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).

Este trabalho é parte do projeto “aprimoramento de serviços climático para investimentos em infraestrutura (CSI)” e visa fornecer informações sobre ameaça de vento extremo para a análise de risco climático para as linhas de transmissão da Eletrosul.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste relatório é avaliar os valores extremos de vento para o período de retorno de 50 anos, obtidos a partir de rodadas históricas e projeções futuras de modelos climáticos regionalizados (HadGEM2-ES, na resolução de 5km) corrigidas por observações de superfície. A escolha do período de retorno de 50 anos é devido a (ABNT, 1985), a qual é usada nos projetos de desenho das torres de linhas de transmissão. Para tal serão utilizadas séries climatológicas de dados de vento do modelo Eta-HadGEM2-ES-5km (Eta) para identificar as características dos ventos extremos em Santa Catarina, na Região Sul do Brasil, a fim de gerar conhecimento científico que auxilie no planejamento de projetos em infraestruturas de linhas de transmissão. As principais aplicações que justificam o interesse na 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. Além da classificação da probabilidade de ocorrência ventos extremos nos modelos Eta-HADGEM2-ES e Eta-MIROC5, na resolução de 20km, (LIMA, 2019a) e no modelo Eta-HADGEM2-ES, na resolução de 5 km (Eta), descritos neste relatório.

2.2. Objetivos Específicos

Este relatório envolve as seguintes etapas de execução:

- Avaliação do modelo Eta em comparação aos dados medidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e *Meteorological Aerodrome Report* (METAR);
- Correção estatística do viés (temporal e espacial) com base na diferença entre os parâmetros da distribuição de Weibull dos dados observacionais e dos dados do modelo Eta, bem como a validação da metodologia;
- Aplicação da técnica para estimar a rajada máxima diária no período histórico e nas projeções do modelo Eta descrita em (LIMA, 2019a);
- Obtenção dos valores extremos máximos de vento e rajada para períodos de retorno de 50 anos a partir das projeções do modelo Eta, representativos para o estado de Santa Catarina;
- Cálculo e mapas de alterações de risco futuro (índice *Fraction Attributable Risk* (FAR)) associado a estes eventos para o estado de Santa Catarina;
- Avaliação de robustez e classificação da probabilidade de ventos extremos oriundos dos modelos usados até agora de acordo com a metodologia *Public Infrastructure Engineering Vulnerability Committee* (PIEVC, ENGINEERS CANADA, 2016)

3. MATERIAL E MÉTODO

3.1. Metodologia

Para o estudo de ventos extremos, serão utilizadas séries climatológicas de vento em superfície ao nível de 10 metros, com séries históricas de dados superiores a trinta anos registradas no aeroporto de

Florianópolis, bem como estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET distribuídas em todo o Estado de SC.

A primeira etapa consiste em corrigir o modelo Eta para o período *baseline* entre 1975 e 2010. O modelo foi rodado com as condições de contorno do modelo global HadGEM2-ES. Foram gerados mapas contendo valores extremos de vento para o período de retorno de 50 anos obtidos a partir de rodadas históricas do modelo Eta corrigidas por observações de superfície.

Na segunda etapa, foram utilizados os resultados das estatísticas obtidas na primeira etapa para os cenários futuros de vento, obtendo assim séries futuras para cada uma das estações em particular, e mapas de tendência e frequência de vento. Isto é, a segunda etapa aborda a análise dos resultados da aplicação dos valores extremos de vento para períodos de retorno de 50 anos em cenários de mudanças climáticas futuras e mapas de alterações de risco futuro (índice FAR) para o Estado de Santa Catarina. Na última etapa é feita a classificação dos critérios de robustez com base na classificação da probabilidade de ventos.

3.2. Área de Estudo e Dados Observacionais

Na região Sul e Sudeste do Brasil o regime dos ventos próximos à superfície é influenciado pelo Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), pela entrada de massas de ar e a Depressão do Nordeste da Argentina – centro de baixa pressão a leste dos Andes. Devido às variações de mesoescala e microescala que ocorrem em função das propriedades da superfície, o perfil de vento em superfície pode ser influenciado, criando condições de ventos locais que podem diferir significativamente do perfil de larga escala da circulação atmosférica (COMPAGNUCCI; SALLES, 1997; MINISTÉRIO DE MINAS ENERGIA, 2001).

Os dados utilizados neste trabalho, para a validação do modelo Eta, serão observações médias horárias de velocidade do vento para um período de nove anos, compreendendo janeiro de 2009 a dezembro de

2017, coletados em estações meteorológicas automáticas de superfície operadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Uma outra fonte de dados observacionais utilizados nesse trabalho, foram dados pertencentes ao Instituto de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). A localização das estações utilizadas pode ser verificada na Figura 1.

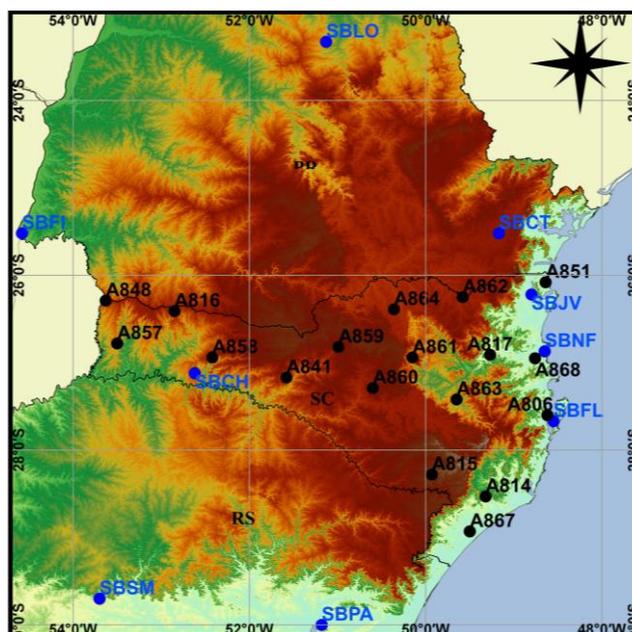


Figura 1. Área de estudo e a localização das estações automáticas do INMET (identificados por pontos pretos) e METAR (identificados por pontos azuis).

3.3. Remoção de Viés do modelo Eta-HadGEM2-ES-5km

Os modelos numéricos possuem um conhecido viés na simulação da velocidade do vento, causados pelas simplificações do modelo e das parametrizações dos processos atmosféricos e das condições iniciais. Estas limitações resultam em erros sistemáticos mais altos que as incertezas de velocidade de vento observados em estações meteorológicas. Este foi um dos fatores que motivaram esta etapa, uma vez que refinamentos e a obtenção de simulações com menores erros são necessários para diversas aplicações.

No produto 03 descrito em LIMA, 2019 foi feita uma correção estatística com base em uma adaptação da metodologia de “mapeamento de quantis” da função de distribuição acumulada (HASHINO; BRADLEY; SCHWARTZ, 2007; SCHAAKE et al., 2007; WOOD; SCHAAKE, 2008). Porém a correção foi feita pontual e nos dados diários, visando uma correção espacial e temporal mais robusta que a anterior, além de fazer uma correção nos dados horários do modelo, optou-se por uma nova metodologia descrita abaixo.

Portanto, os dados de velocidade de vento, do modelo Eta foram corrigidos com base nos parâmetros da distribuição de Weibull, ou seja, foi extraído uma série temporal do modelo Eta, para cada latitude e longitude onde estão localizadas as estações meteorológicas, e com isso foram calculados os parâmetros c e k dos dados simulados e observados. Foi calculada a diferença entre os parâmetros simulados e observados e convertida em porcentagem. A partir desta diferença percentual dos parâmetros c e k foi gerado um mapa de correção a partir de uma interpolação linear dos parâmetros e aplicada a correção em toda a grade do modelo para o 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 a saída do Eta, assegurando a variabilidade horária, diária e interanual realista, foi implementada a correção descrita acima, que é uma abordagem baseada na correção de uma *Cumulative Distribution Function* (CDF), onde corrige-se a frequência do vento. Como resultado desse processo, a técnica removeu o viés nas simulações do Eta. Como todas as abordagens de *downscaling* estatístico, supõe-se que os viés em relação as simulações históricas serão constantes no período futuro da projeção (THRASHER et al., 2012).

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. O método de correção tende a reduzir significativamente o erro sistemático inerente no modelo Eta.

3.4. Distribuição de Probabilidade de Frequência das Séries de Vento Máximo

A análise de valores extremos é empregada rotineiramente para estudo de enchentes, ciências ambientais, finanças e seguros (REISS; THOMAS, 2007). Diferentes métodos de distribuição de probabilidade de eventos extremos são utilizados atualmente para dados observados, e causam discussões entre os estatísticos de qual seria o melhor método a ser empregado. No entanto, alguns deles estão bem consolidados na bibliografia e geram resultados satisfatórios quando comparados entre si.

Alguns autores consideram que o método de análise de extremos mais indicado é a distribuição GEV (*Generalized Extreme Value*) que considera três diferentes métodos de distribuição: Gumbel, Fréchet e Weibull.

Já Hershfield e Kohler (1960) analisando os dados de milhares de estações pluviométricas nos Estados Unidos, concluíram que a distribuição de GUMBEL, (1954) é a mais adequada para estimar as probabilidades de ocorrência de eventos extremos de precipitação de diversas durações. Ainda, o trabalho publicado por Sansigolo (2008) mostrou que o método de distribuição que mais se ajustou aos dados de vento foi a distribuição de Weibull (WEIBULL, 1951).

Dessa forma, com base nas diferentes bibliografias consultadas, serão adotados os três métodos que mais se ajustam ao estudo de ventos extremos, e aplicados para analisar os dados simulado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES-5km e comparado com os dados observados das estações meteorológicas do INMET, METAR e Departamento de controle do Espaço Aéreo (DECEA). Para obter as funções de distribuições de

probabilidade (PDF) foram usados os modelos de Gumbel, Weibull e GEV. A determinação dos parâmetros das distribuições foi obtida através do método da máxima verossimilhança (REISS; THOMAS, 2007).

3.5. Período de Retorno – T

Um dos maiores objetivos da análise de valores extremos é a estimação do período de retorno T (REISS; THOMAS, 2007), sendo ele o período de tempo médio em que um determinado evento é igualado ou superado pelo menos uma vez. Esse parâmetro estatístico é empregado no estudo de eventos extremos, 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 são tempos, e para observações anuais, 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:

$$T(x) = \frac{1}{1-P(x)} \quad (01)$$

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

3.6. Índice FAR

O Conceito de *Fraction Attributable Risk* (FAR) foi primeiro aplicado em 2004 (STOTT et al., 2016), em uma análise de onda de calor na Europa.

Esta 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. Essa abordagem é mostrada esquematicamente na Figura 2. Estas probabilidades foram determinadas a partir de simulações de modelos climáticos ajustados por observações. O estudo concluiu que a influência humana era muito provavelmente (probabilidade > 90%) a causa de um evento de onda de calor. 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.

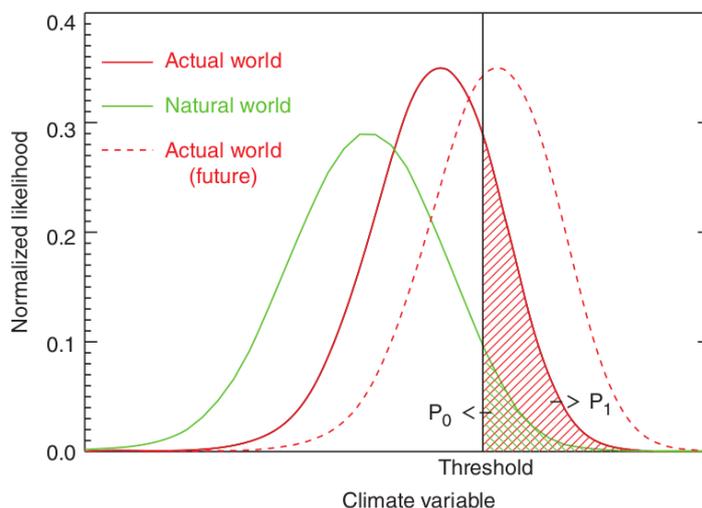


Figura 2. Uma ilustração das funções de densidade de probabilidade (PDFs) de uma variável climática (linha verde) e o efeito da influência humana sobre o clima (linha vermelha). As probabilidades correspondentes de exceder um limiar (P_1 e P_0) são representadas pelas áreas tracejadas da mesma cor. A linha vermelha tracejada ilustra como o PDF do mundo real pode variar com a mudança do clima.

3.7. Análise de Tendência - Teste de Kendall

O teste de Kendall é usado em séries históricas foi proposto por (SNEYERS, 1990) para identificar as possíveis tendências climáticas existentes nas séries de dados. O teste de (KENDALL, 1948) considera que, na hipótese de estabilidade de uma série temporal, a sucessão de valores ocorre de forma independente, e a distribuição de probabilidade deve permanecer sempre a mesma (BACK, 2001).

Segundo Goossens e Berger, (1986) o teste de Kendall é o método mais apropriado para analisar mudanças climáticas em séries climatológicas e permite também a detecção e localização aproximada do ponto inicial de determinada tendência.

Em síntese, o teste criado originalmente por Mann (1945) e reformulado por (KENDALL, 1948) consiste em comparar cada valor da série de dados com o número de vezes em que os termos restantes são maiores que o valor analisado. O teste não paramétrico é usado para avaliar a existência de uma tendência monotônica crescente ou decrescente e é o método mais apropriado para analisar alterações climáticas em séries de dados meteorológicos (GOOSSENS; BERGER, 1986). O teste estatístico de Mann-Kendall é determinado da seguinte forma:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{VAR(S)}} & se \ S > 0 \\ 0 & se \ S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{VAR(S)}} & se \ S < 0 \end{cases} \quad (02)$$

em que,

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n sign(x_j - x_k) \quad (03)$$

onde x_j e x_k são valores (anuais/sazonais/mensais) nos anos j e k (para $j > k$), respectivamente; n é o tamanho da série de dados; e a função $sign$ é a variância de S , denotada por $[VAR(S)]$, assume o valor de 1 quando $x_j - x_k > 0$; 0 quando $x_j - x_k = 0$; e -1 quando $x_j - x_k < 0$, e é definida por:

$$VAR(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (04)$$

e quando há repetições de dados, a variância assume a expressão:

$$VAR(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g (t_p - 1)(2t_p + 5)] \quad (05)$$

onde g é o número de grupos com dados repetidos e t_p é o número de dados no p -ésimo grupo. Para análise da tendência utiliza-se o valor de Z , no qual, o valor positivo ($Z > 0$) refere-se a uma tendência crescente e o valor negativo ($Z < 0$) refere-se a uma tendência decrescente.

Este estudo também estimará a inclinação e magnitude da tendência dos dados observados, utilizando o método não paramétrico de Sen (SEN, 1968; SNEYERS, 1990). Trata-se de um método não-paramétrico que será utilizado por ser insensível aos valores de outliers, provendo uma medida mais realística das tendências em uma série temporal de dados, o que o torna mais rigoroso que a usual regressão linear. O método é determinado por:

$$f(t) = Qt - B \quad (06)$$

onde Q é o valor referente a inclinação da reta e B é uma constante. Para obter a estimativa de inclinação Q , primeiro calculam-se as inclinações de todos os pares de dados, definidos por:

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \quad (07)$$

para $j > k$.

Caso a série temporal seja composta por n valores x_j , obtêm-se $N = n(n-1)/2$ estimativas de inclinação Q_i . Deste modo, a inclinação estimada pelo método Sen é a mediana dos valores N de Q_i de forma que a estimativa Sen é dada por:

$$Q = Q_{[(N+1)/2]}, \text{ se } N \text{ for ímpar e} \\ \text{cc, se } N \text{ for par.} \quad (08)$$

Para obter uma estimativa de B na Equação 06, são considerados n valores da diferença $x_i - Q_{fi}$. Alguns trabalhos apresentam resultados utilizando os métodos de Mann-Kendall e da estimativa de inclinação Sem (DOS SANTOS et al., 2018; SANTOS et al., 2016; SILVA; DERECZYNSKI, 2014; ZHENG; FAN, 2010).

3.8. Classificação da Escala de Probabilidade

Seguindo a metodologia PIEVC (ENGINEERS CANADA 2016), a classificação de probabilidade representa a probabilidade de ocorrência de um evento climático acima de um limite. No caso das rajadas extrema o limite definido nas oficinas foi superior a 20 m/s, podendo variar de 1 (raro) até 5 (Quase certo). Como descrito na Tabela 01. Os riscos são avaliados sobre as condições climáticas atuais para estabelecer uma linha de base (*baseline*). Já os riscos futuros são avaliados considerando futuras mudanças no clima (projetadas) e as condições projetadas da própria infraestrutura.

Tabela 1. Descrição da escala de probabilidade considerando o período de 30 30 anos para rajada máxima anual acima de 20 m/s.

Escala de Probabilidade			Pontuação
Descrição	Valor		
Raro	< 10%	um ou dois eventos a cada 30 anos	1
Pouco provável	10% - 17%	3 a 5 eventos a cada 30 anos	2
Provável	18% - 50%	6 a 15 eventos a cada 30 anos	3
Altamente provável	51% - 100%	16 a 30 eventos a cada 30 anos	4
Quase certo	>100%	Mais de 30 eventos a cada 30 anos	5

A Equação 09 descreve o cálculo do valor de probabilidade descrito na Tabela 01, onde calculamos o número de evento em que a rajada do vento foi superior a 20 m/s e dividimos pelo tamanho da série, em cada ponto de grade dos modelos usados neste produto, e nos anteriores para o período histórico e as projeções futuras.

$$P(\%) = \frac{N^{\circ}_{eventos}}{TamanhoSérie} \times 100$$

(09)

4. RESULTADOS: PERÍODO HISTÓRICO

Neste capítulo são apresentados os resultados da comparação entre os dados observados e o modelo Eta-HadGEM2-ES-5km. Para a remoção do viés do modelo, foi utilizada a técnica descrita no capítulo 3.3. Foi utilizado também o método de regressão linear para encontrar uma relação entre a velocidade do vento observada e a rajada do vento observado com o objetivo de, a partir dessa relação, realizara extrapolação da rajada do vento no modelo, por meio da velocidade do vento horário do modelo. Em seguida, são apresentadas as distribuições de frequência de probabilidade de intensidade do vento e rajada estimados pelos modelos, bem como o ajuste dos modelos de distribuição para definir aquele que melhor representa a distribuição de

frequência de cada série temporal. Identificado o melhor ajuste de distribuição do vento, calculou-se com base nesse modelo, o período de retorno dos máximos de rajada para as projeções futuras, com um nível de confiabilidade de 95%, e em seguida foram desenvolvidos os mapas do índice de riscos (FAR) e a classificação da probabilidade para todos os modelos.

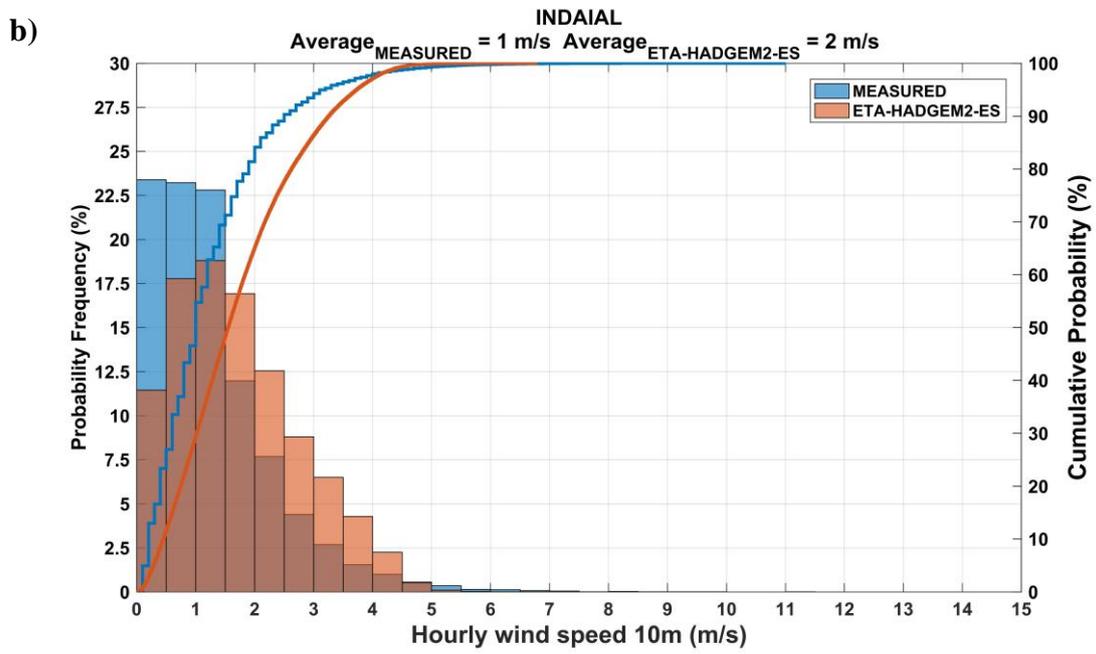
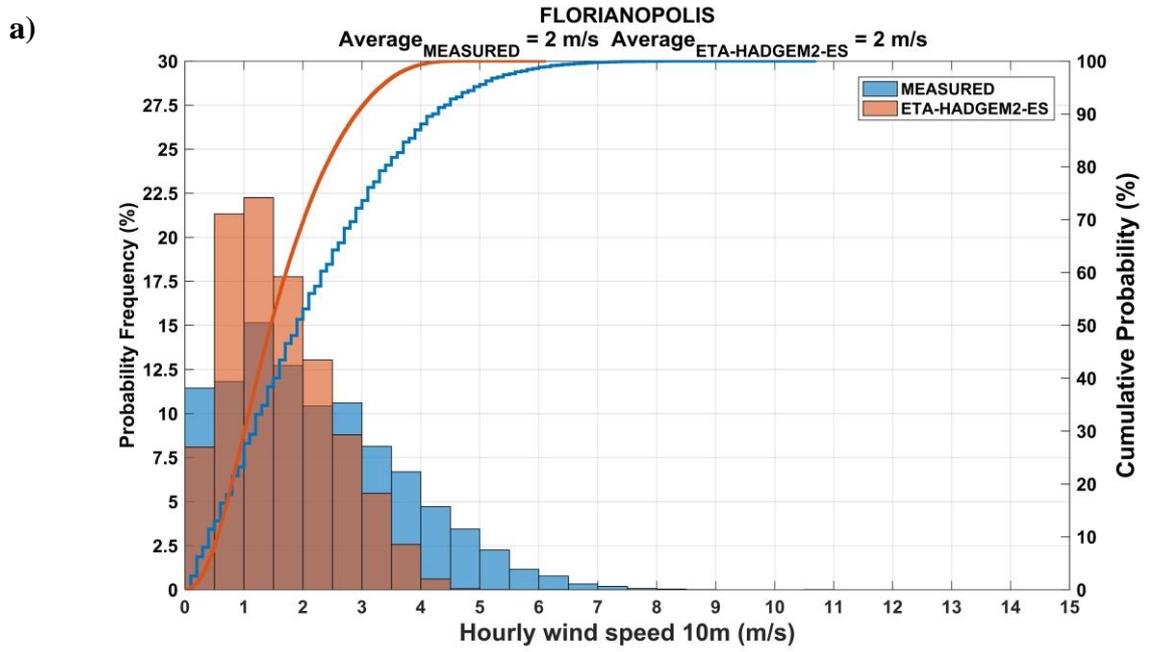
4.1. Resultado das Avaliação dos Modelos Eta-HadGEM2-ES-5km

Uma avaliação das simulações do período histórico dos modelos Eta-HadGEM2-ES-5km é apresentada juntamente com uma descrição das funções de distribuição e discussões sobre os erros. O modelo Eta-HadGEM2-ES-5km foi avaliado em relação aos dados observacionais.

Nas figuras de histogramas e de distribuição e probabilidade acumulada são apresentadas as comparações entre as duas distribuições, a medida e a simulada, em que o modelo Eta (tons em laranja nos gráficos) é comparado com as observações (tons em azul). Nos gráficos são mostrados os dados horários para algumas estações enquanto as demais estações estão em anexo ao produto.

Nos histogramas e nos gráficos de distribuição de probabilidade acumulada do produto 3, descrito em Lima (2019) são diferentes dos gráficos apresentado neste relatório, em virtude de a correção estatística do viés do modelo ter sido realizada na resolução horaria do modelo, enquanto no produto 3 a correção foi realizada na resolução temporal diária.

Verificando a Figura 3, observa-se que o modelo Eta tende a superestimar os dados medidos para as estações das figuras abaixo, exceto para a estação de Florianópolis onde o modelo subestimou os dados medidos. Observa-se ainda que, apesar de o modelo apresentar um viés elevado, ocorre uma concordância entre os dados medidos e modelados nas estações de Florianópolis, Indaial e Dionísio Cerqueira porém um alto viés em Caçador.



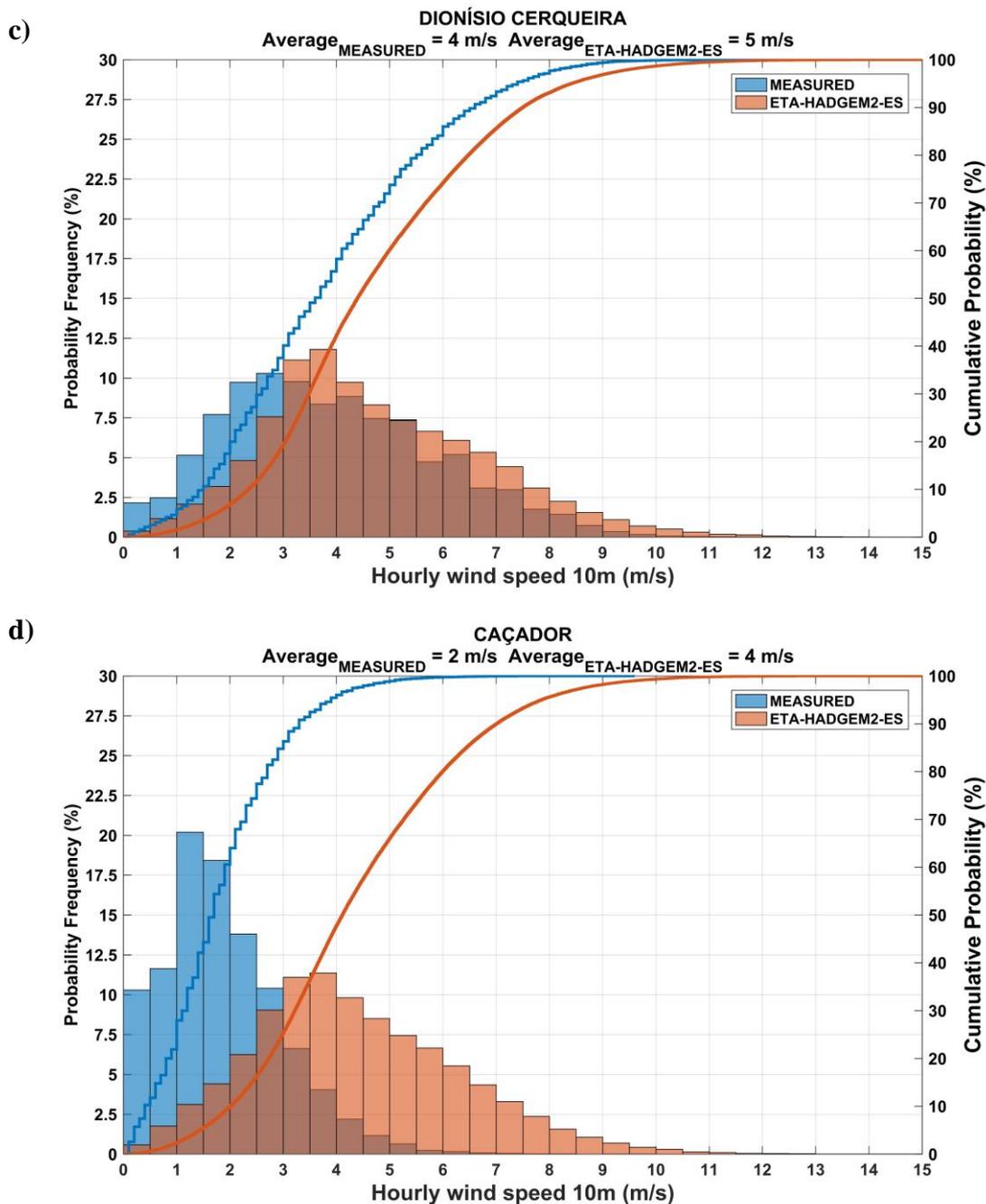
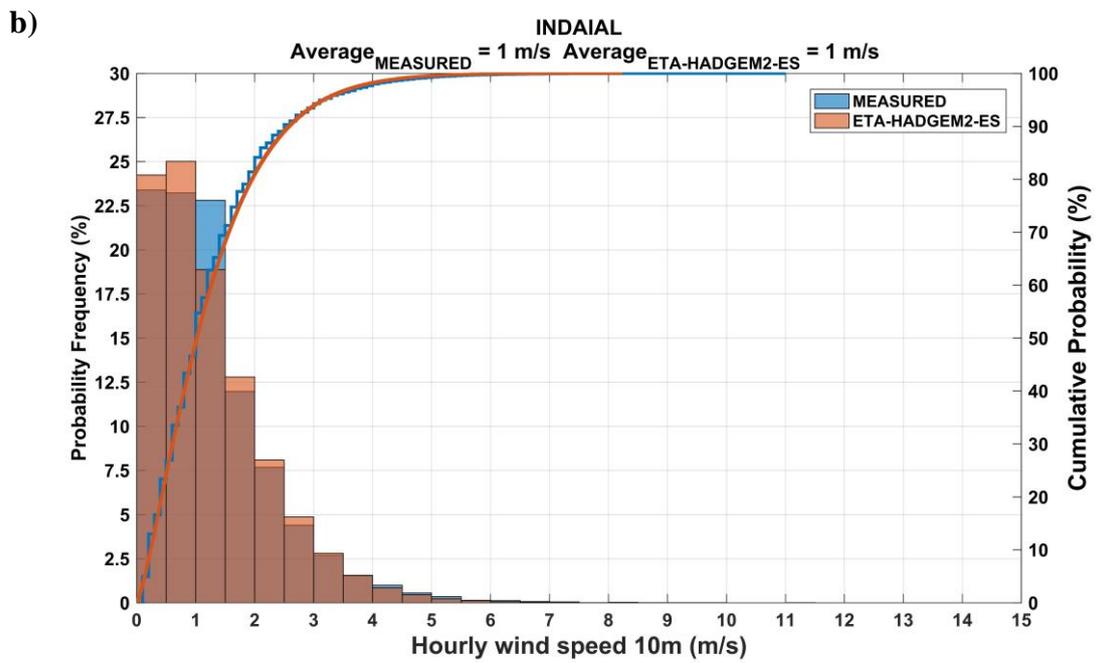
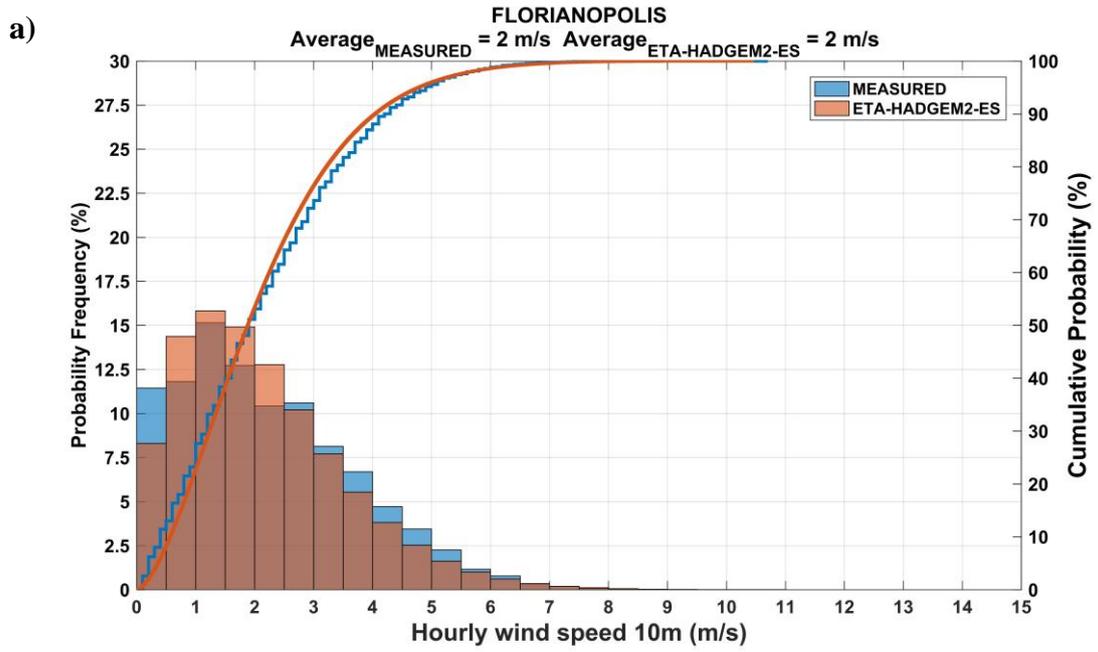


Figura 3. Distribuições de probabilidade de frequência (barras) e probabilidade acumulada (linhas) dos dados medidos (tons em azul) e do modelo Eta-HADGEM2-ES-5km (tons em laranja), período histórico, para a velocidade do vento a 10m de altura.

4.2. Resultados da correção do viés do modelo Eta

Verificou-se na Figura 4, que o modelo Eta-HADGEM2-ES, após corrigidos pelos parâmetros da distribuição de Weibull apresentou

distribuição de frequência similar aos dados medidos para a maior parte das estações de SC. As demais estações estão no arquivo anexo ao produto. Observa-se ainda que os modelos corrigidos apresentam médias semelhantes aos dados medidos. Nota-se uma melhoria na concordância entre os dados medidos e modelados em todas as estações, com destaque para a estação de Caçador, que apresentava elevado viés anteriormente e após a correção, apresentou resultado satisfatório.



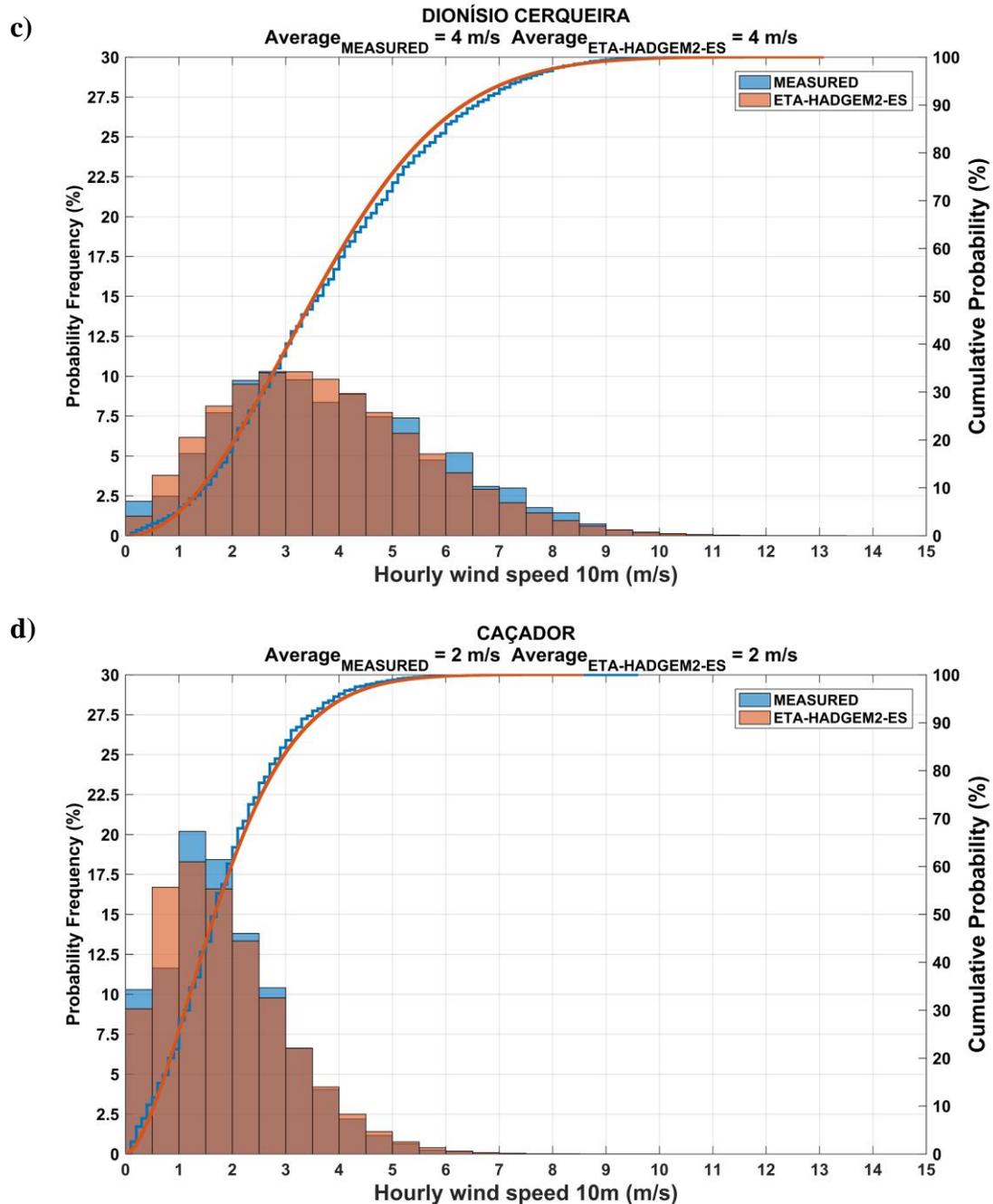


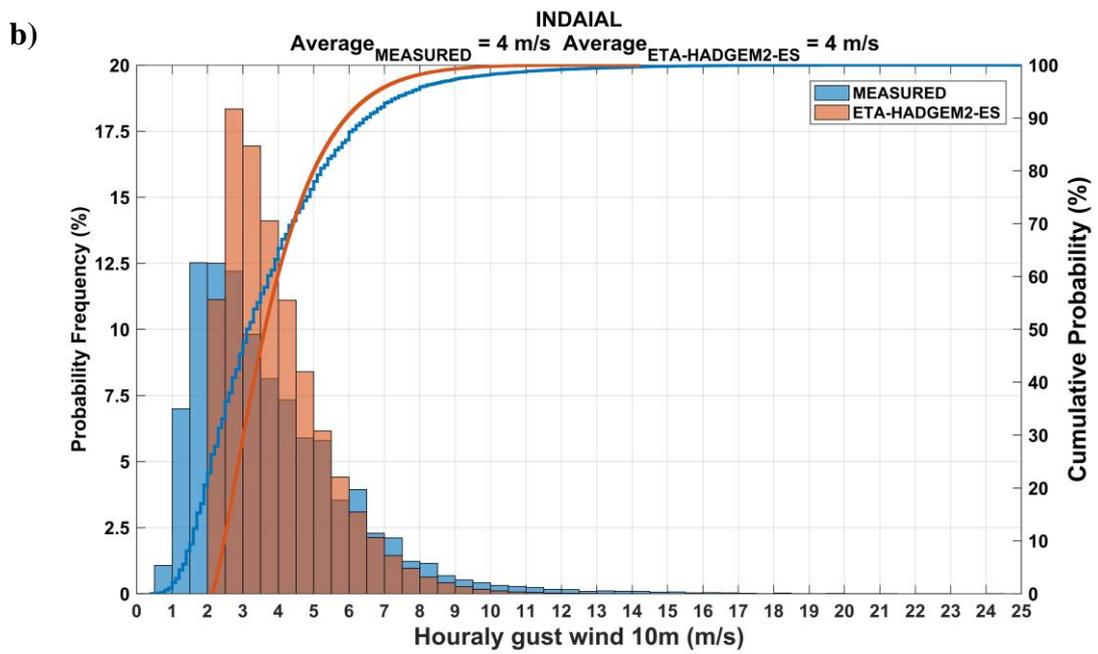
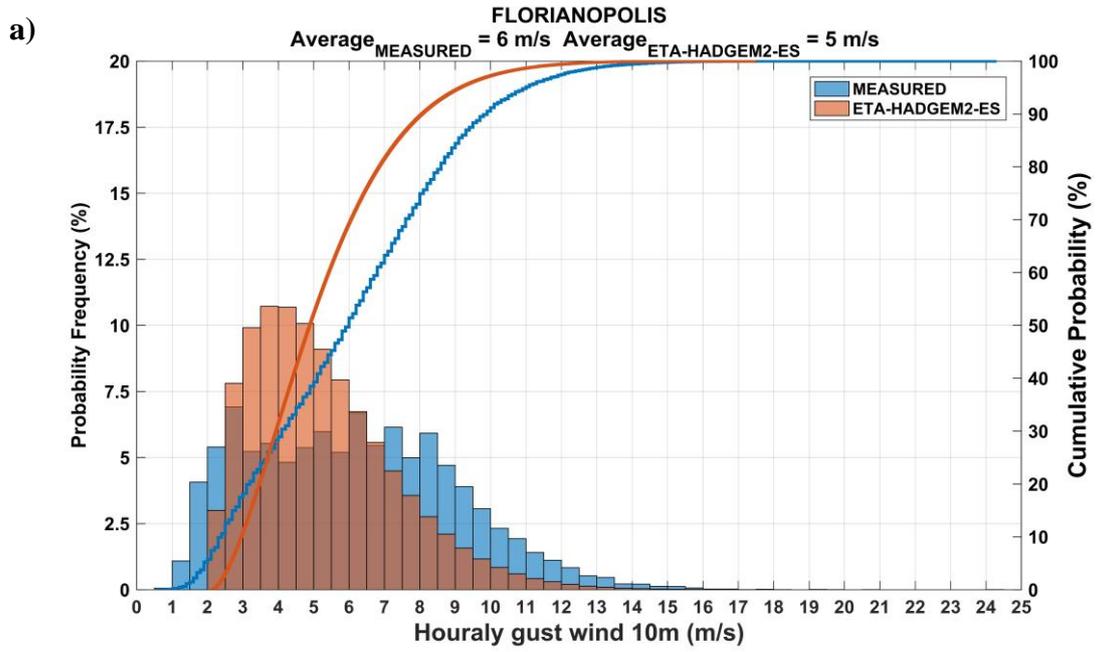
Figura 4. Distribuições de probabilidade de frequência (barra) e probabilidade acumulada (linha) dos dados medidos (tons em azul) e do modelo Eta-HADGEM2-ES-5km (tons em laranja) corrigido pela porcentagem da diferença dos parâmetros da distribuição de Weibull, no período histórico, para a velocidade do vento a 10m de altura.

4.3. Resultado da Relação entre a velocidade do vento horário observado e a rajada do vento horário observados

Na Figura 5 é mostrado o resultado obtido pela comparação entre as simulações de rajada e medidas de rajada de vento a 10 metros de altura. A rajada de vento foi estimada no modelo Eta através de uma regressão linear, descrita em Lima (2019a), calculada em relação a todas estações, comparando a velocidade do vento horário com a máxima rajada no intervalo de uma hora dos dados medidos. Uma avaliação das simulações do período histórico do modelo Eta-HadGEM2-ES é apresentada juntamente com uma descrição das funções de distribuições de probabilidades e discussões sobre os erros.

O modelo Eta foi avaliado em relação aos dados observacionais de rajada de vento. Os modelos numéricos não possuem a capacidade de simular a rajada do vento, com isso, a obtenção de simulações de rajada do vento por método estatístico é necessária para diversas aplicações. Nos gráficos abaixo são mostradas as distribuições horárias para algumas estações. Os demais gráficos estão em anexo ao produto.

Verifica-se na Figura 5 que o modelo Eta tende a simular bem os extremos observados nos dados medidos para a rajada do vento horário nas estações de Florianópolis, Indaial, Dionísio Cerqueira e Caçador para o período histórico. Conclui-se que a correção foi satisfatória, dando suporte ao desenvolvimento de uma metodologia para estimar rajada de vento máximo diária no modelo Eta nas projeções futuras. Possibilita ainda um estudo aprofundado e o desenvolvimento de novas metodologias estatística para simular a rajada do vento em modelos atmosféricos.



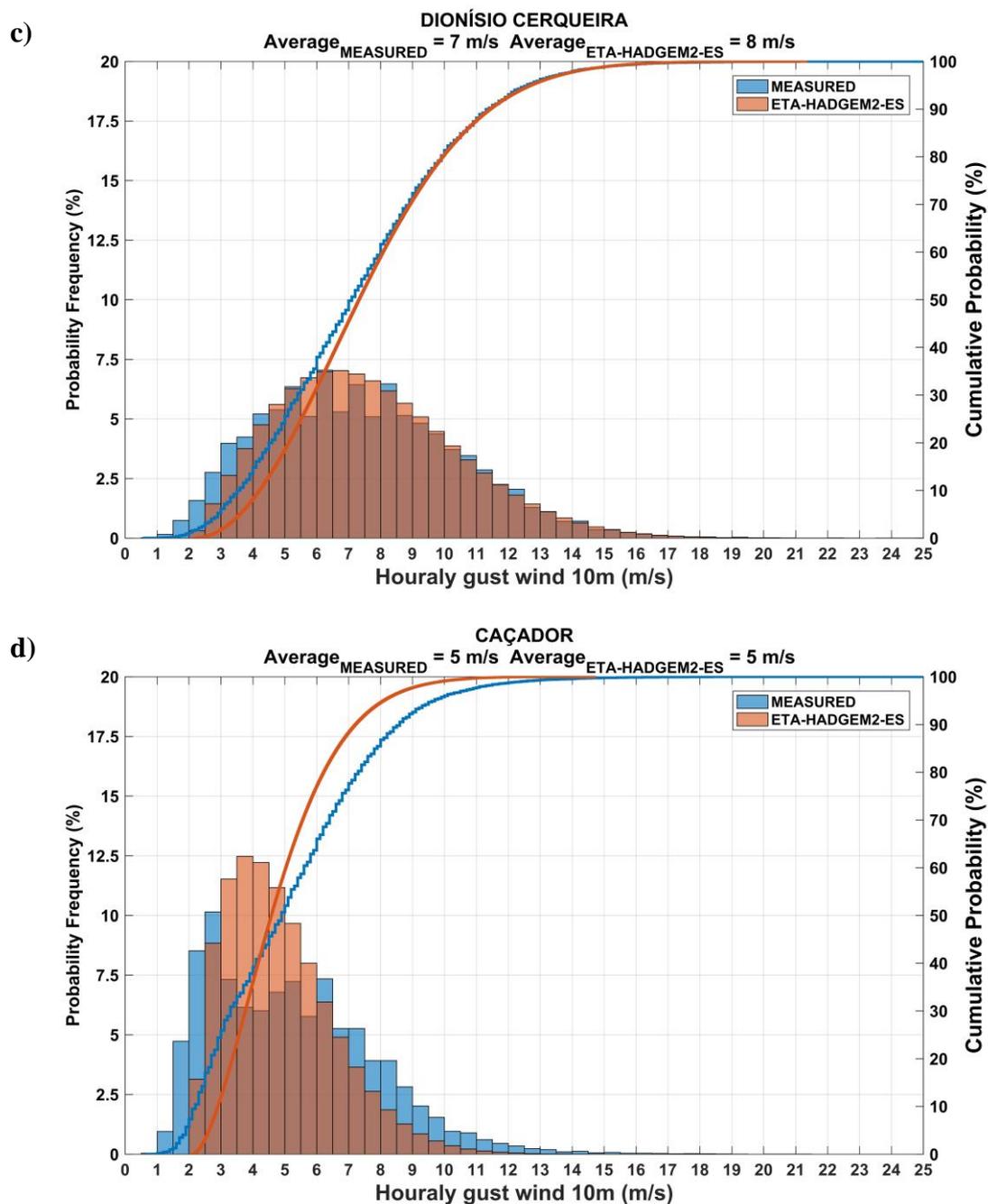


Figura 5. Distribuições de probabilidade de frequência (barra) e probabilidade acumulada (linha) dos dados medidos de rajada de vento (em azul) e do modelo Eta-Hadgem2-ES (em laranja) estimados a partir da regressão linear mostrada na Figura 4, para o período histórico, em vento a 10m de altura.

4.4. Análise Espacial do Período de Retorno de 50 anos com as Distribuições GEV, Weibull e Gumbel para a Rajada do Vento Simulado pelo Modelo ETA

Nas figuras de 6 a 8 têm-se os mapas dos períodos de retorno de 50 anos para o modelo Eta e para as três distribuições estudadas *Generalized Extreme Value (GEV)*, Weibull (WBL) e Gumbel (GUM). Não se observa grandes diferenças entre elas, o que indica que qualquer uma delas pode ser usada para o cálculo dos períodos de retorno. Para efeito de comparação, a Figura 9 mostra o período de retorno de 50 anos para rajada de vento a 10 metros, dada pela NBR 5422 (ABNT, 1985). Devido a divergência de valores, recomenda-se uma atualização dos valores para norma NBR 5422. Uma outra observação a ser feita, é que a norma NBR 5422 foi realizada utilizando a distribuição Gumbel, e apesar de ser uma distribuição bastante utilizada no passado, distribuições como a GEV e WBL se mostraram mais apropriadas para eventos extremos (SANSIGOLO, 2008b). Para a atualização da norma NRB 5422 (ABNT, 1985) é necessária uma maior densidade de estações meteorológica para a medição de rajada de ventos e análise da ajuste de outras distribuições para o cálculo do período de retorno.

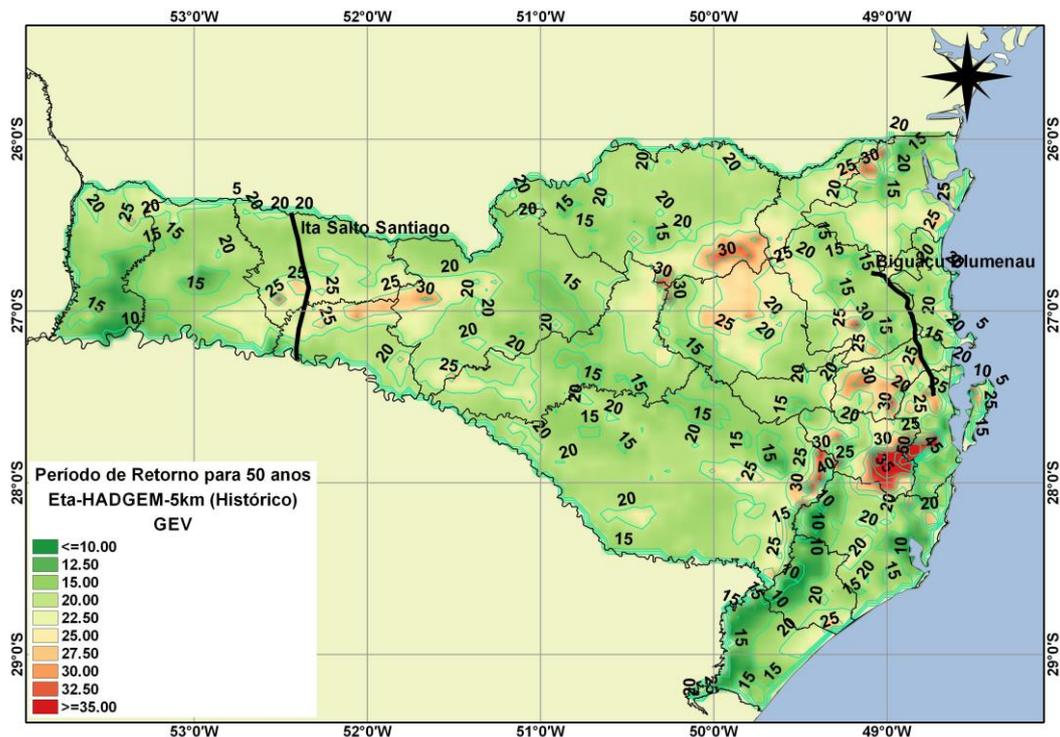


Figura 6. Rajada máxima anual do vento esperada para período de retorno de 50 anos para as simulações do período histórico do modelo Eta-HadGEM2-ES-5km pela distribuição GEV.

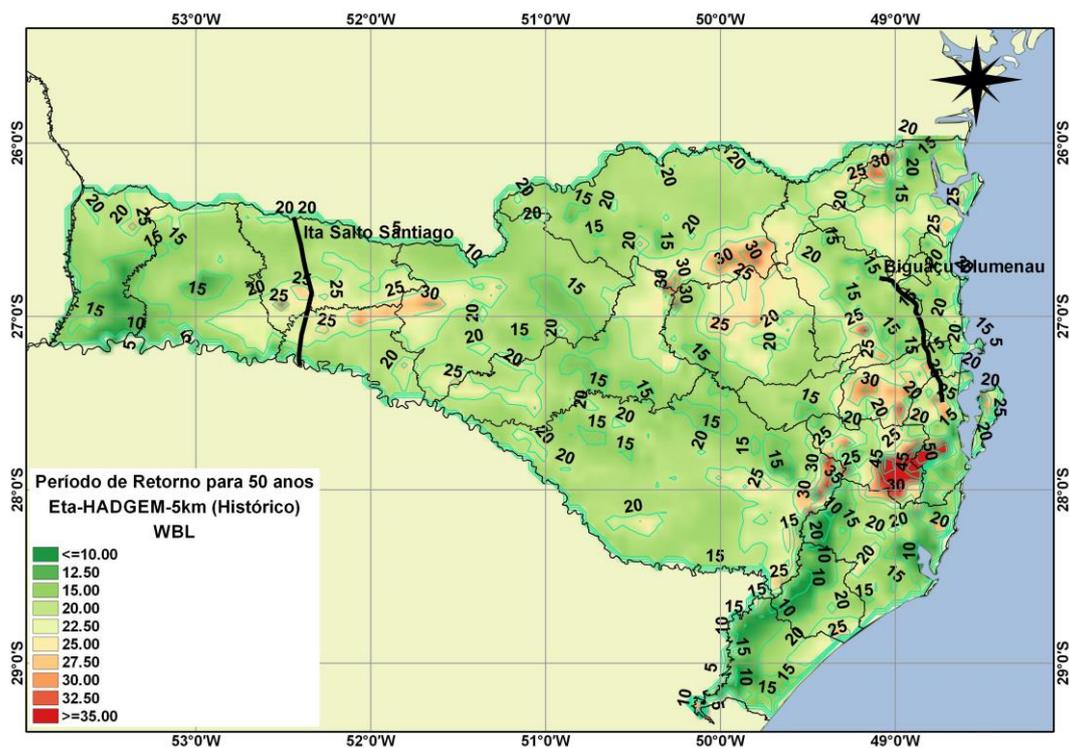


Figura 7. Rajada máxima anual do vento esperada para período de retorno de 50 anos para as simulações do período histórico do modelo Eta-HadGEM2-ES-5km pela distribuição Weibull (WBL).

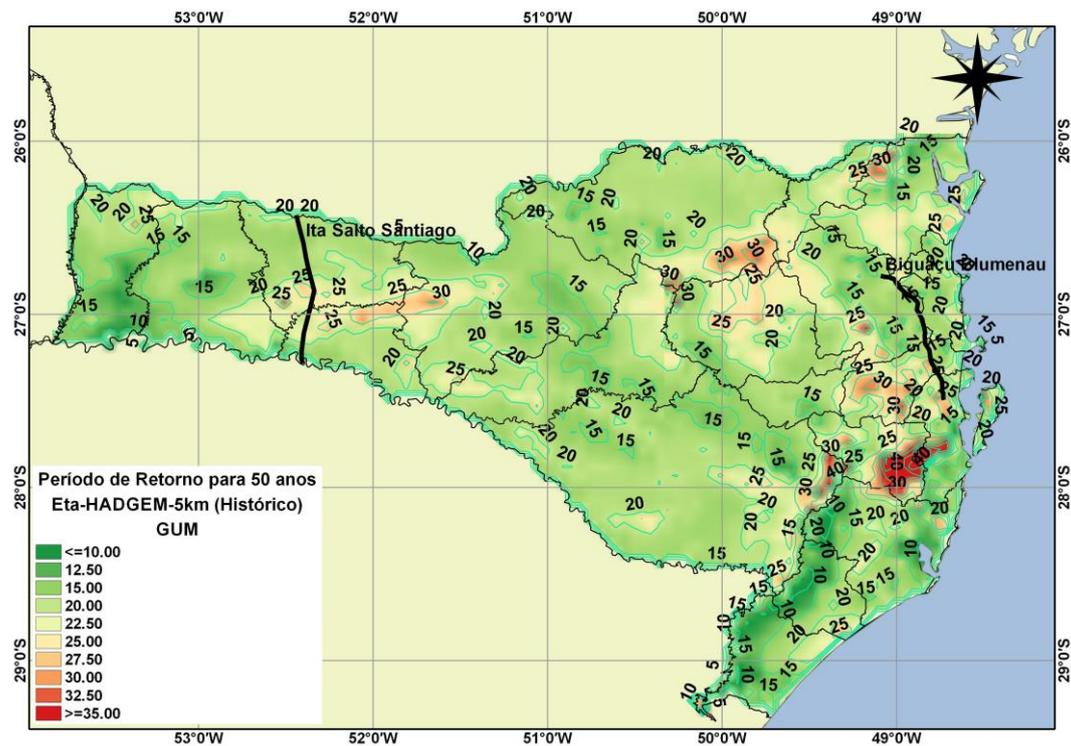


Figura 8. Rajada máxima anual do vento esperada para período de retorno de 50 anos para as simulações do período histórico do modelo Eta-HadGEM2-ES-5km pela distribuição Gumbel (GUM).

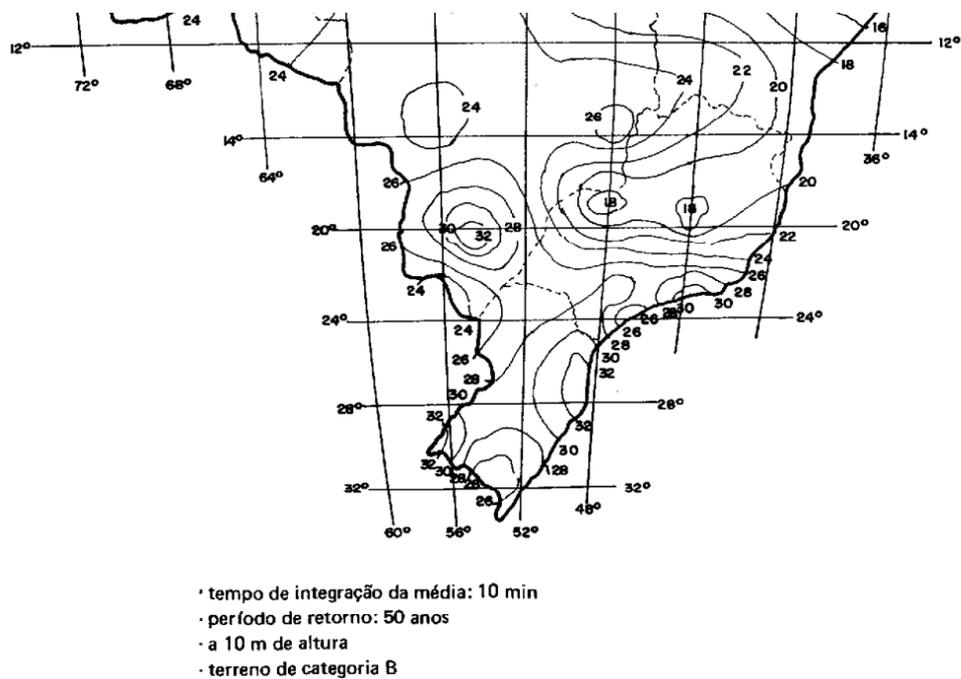


Figura 9. Período de retorno da velocidade básica do vento segundo a NBR 5422.

Nas Figuras 10 e 11 têm-se os mapas da rajada máxima e do Percentil 99° (P99) da rajada máxima, para o Eta-HADGEM2-ES-5km, respectivamente. Observa-se um padrão semelhante entre os dois gráficos, e nas localizações das duas linhas de transmissões. Observa-se que os maiores valores de vento ocorrem no oeste do Estado, onde está localizado a linha de transmissão Ita-Salto Santiago (medias de ~26 m/s, Figura 10) e os menores valores são encontrados no leste do Estado, onde se localiza a linha Biguaçu-Blumenau (médias de ~17 m/s, Figura 11). Porém, observa-se rajadas elevadas de vento em uma pequena porção sudeste do Estado, próximo a região dos cânions (superiores a 38 m/s).

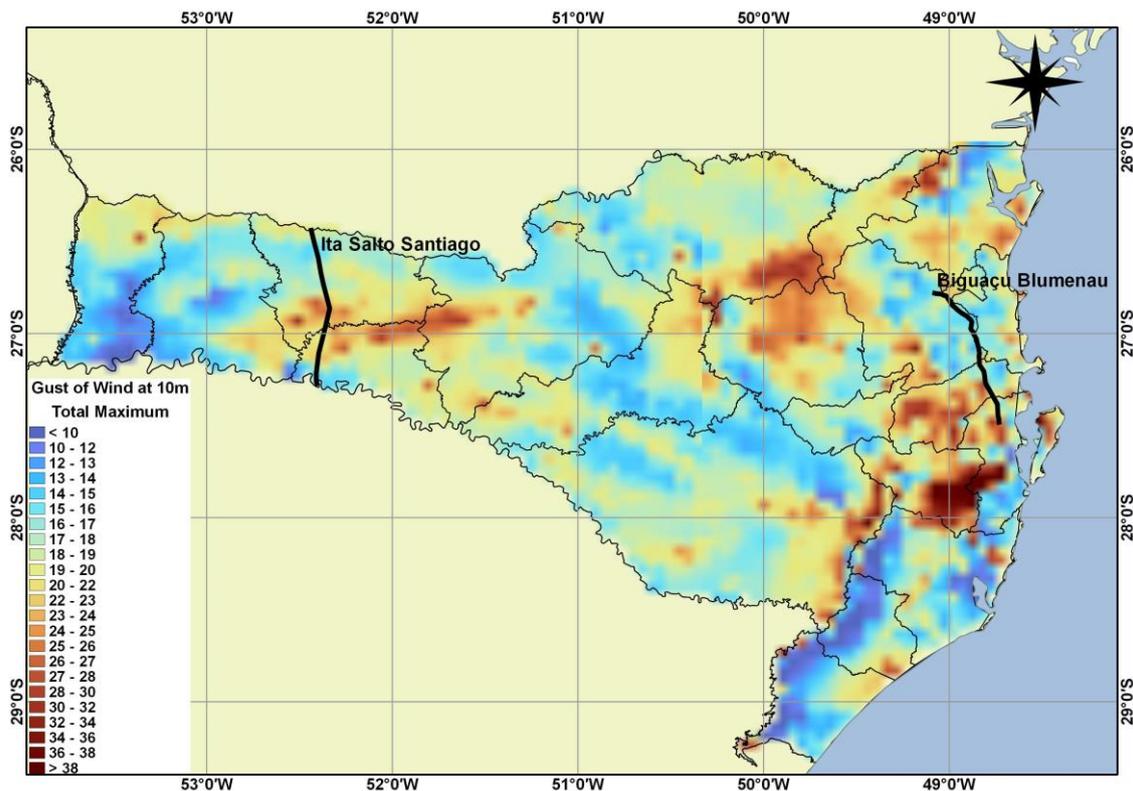


Figura 10. Rajada máxima do vento simulado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES (5 km).

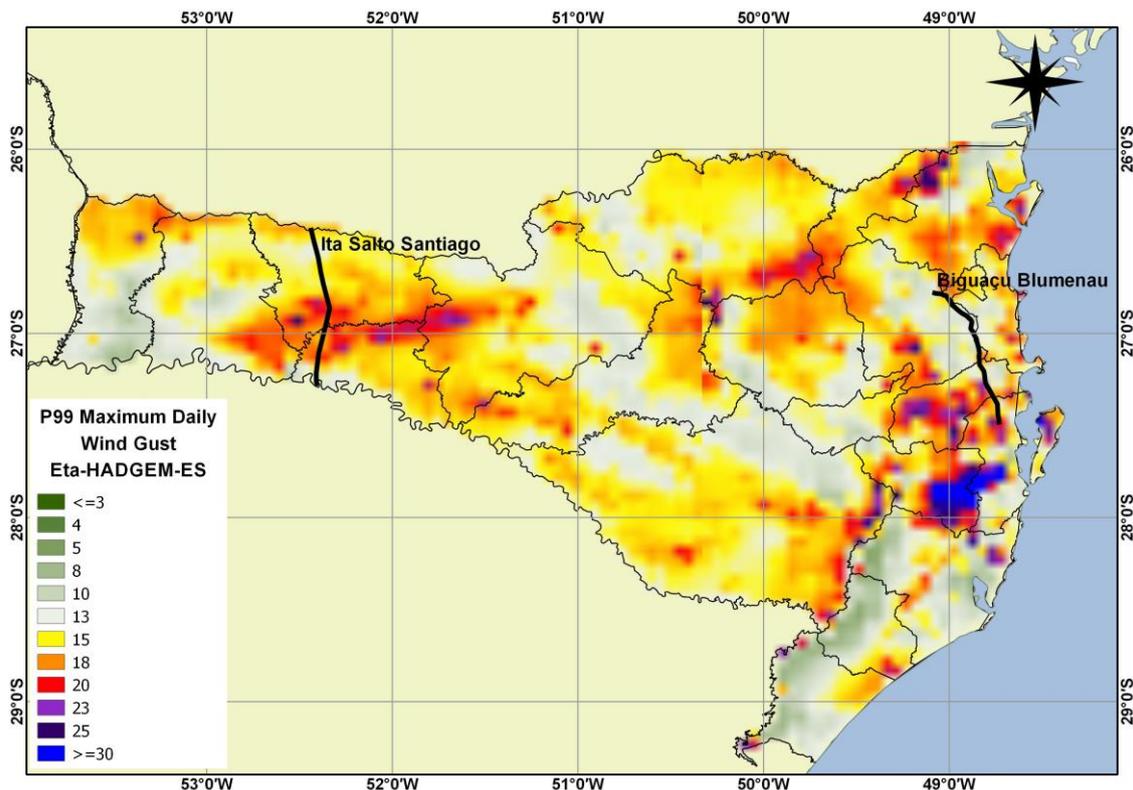


Figura 11. Percentil 99º (P99) da Rajada máxima do vento simulado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES.

5. RESULTADOS DAS PROJEÇÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nas projeções climáticas futuras, derivada do modelo Eta-HadGEM2-ES-5km. Para a remoção do viés do modelo, uma técnica de interpolação do erro médio percentual em escala horaria foi utilizada, conforme já discutido no capítulo anterior. Esta mesma técnica foi utilizada para as projeções futuras. A mesma técnica estatística de regressão linear utilizada no período histórico para encontrar uma relação entre a velocidade do vento observada e a rajada do vento observado foi aplicada sobre as projeções futuras. Com essa relação, foi feito a extrapolação da rajada do vento no modelo Eta-HadGEM2-ES-5km, a partir da velocidade do vento máximo horário do modelo. Assume-se assim que o erro do modelo se mantém estável entre as rodadas históricas e futuras. Com relação ao ajuste às distribuições de valores extremos, não houve grandes diferenças

entre as três distribuições estatísticas testadas no período histórico, sendo assim, neste relatório será apresentada apenas a distribuição GEV. As demais distribuições estão nos arquivos em extensão NETCDF em anexo ao produto.

5.1. Análise Espacial da Diferença entre as Rajadas Máximas para o Período de Retorno de 50 anos do Período Histórico e das Projeções Simuladas pelo Modelo ETA

Nas Figuras 12a e 12b, têm-se os mapas das diferenças das rajadas máximas para os períodos de retorno de 50 anos entre o clima atual (histórico) e o clima futuro (projeções) do modelo Eta-HadGEM2-ES-5km. Valores positivos indicam que no clima futuro a intensidade de rajada do vento será maior que no clima atual, e valores negativos indicam que a intensidade de rajada do vento no clima futuro será menor do que no clima atual. De modo geral, observam-se grandes diferenças entre os modelos, tanto no que tange o aspecto quantitativo, como no que diz respeito ao padrão espacial, principalmente no cenário RCP8.5.

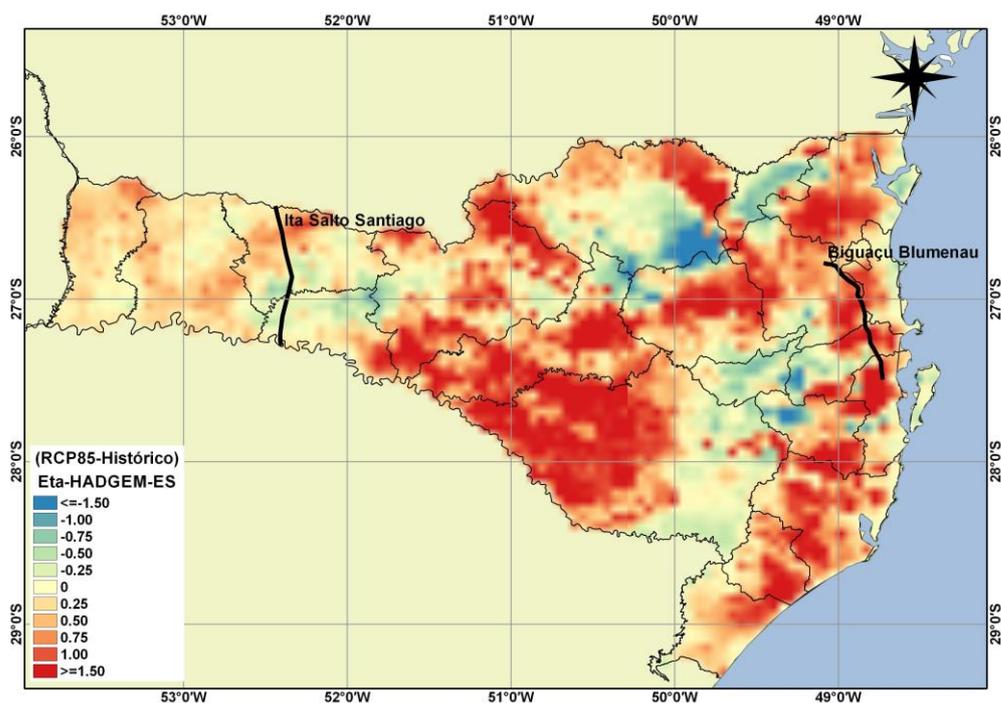
Na Figura 12a, que mostra a projeção do modelo para o cenário RCP4.5, foram observadas diferenças entre o clima futuro e o atual. É possível observar variações positivas na intensidade da rajada máxima no período de 2010-2040. É possível verificar que na região da linha de transmissão Itá-Salto Santiago, o modelo mostra um sinal positivo (~0,5 m/s) de mudança no cenário RCP4.5. Já na região da linha Biguaçu-Blumenau, o modelo mostra um aumento significativo (superiores ~1,50 m/s) na rajada máxima para o período de 50 anos.

Na Figura 12b, é mostrada a projeção futuras estimada pelo modelo para o cenário RCP8.5, onde foi observado um padrão espacial com tendência significativa, de aumento do valor da rajada correspondente ao período de retorno de 50 anos, no oeste da Região Sul do Brasil, e um significativo aumento a leste desta região. Isto pode ser mais claramente observado no cenário pessimista (RCP8.5), onde a rajada tende a ficar

mais intensa à medida que se aproxima do final de 2040. Verificadas entre os dois cenários analisados uma preponderância de alterações mais acentuadas da intensidade da rajada no RCP8.5 em relação ao RCP4.5.

Os resultados sugerem que a Região de Santa Catarina pode ser susceptível à ocorrência de rajadas mais intensas em um cenário futuro com maiores níveis de emissões de gases do efeito estufa. Uma diferença entre o Eta-HADGEM-ES-5km e os demais modelos (Eta-HADGEM-ES e Eta-MIROC5, na resolução de 20 km) descritos em (LIMA, 2019a) é que os outros modelos não mostraram um aumento significativo na linha de Biguaçu-Blumenau, enquanto o modelo, na resolução de 5 km, mostrou um aumento significativo em ambos os cenários.

a)



b)

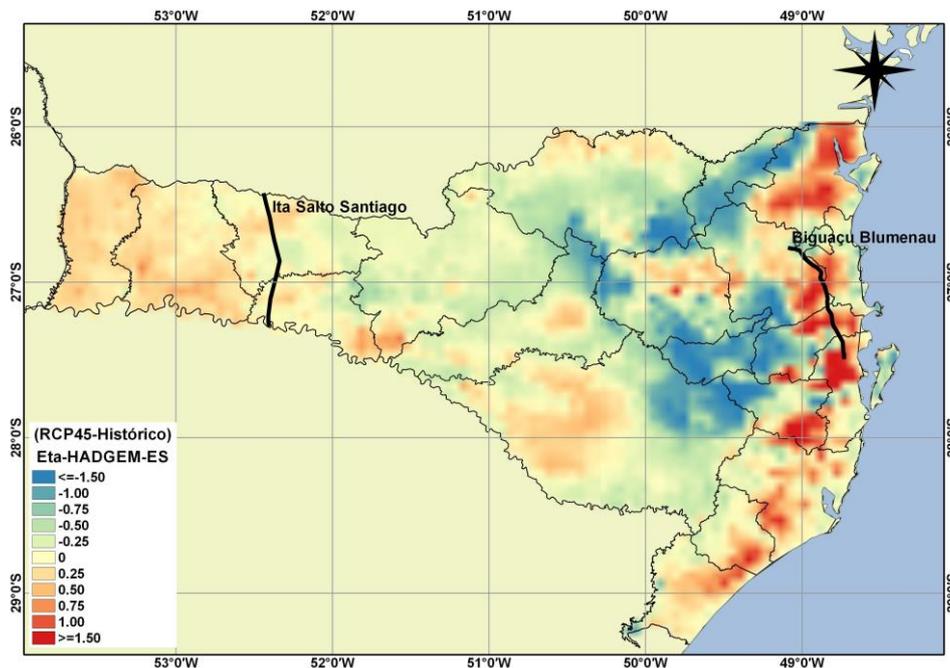


Figura 12. Diferença da rajada máxima anual do vento (m/s) para o período de retorno de 50 anos entre o clima atual (1975-2010) e futuro (2010-2040), simulados pelo modelo Eta-HadGEM2-ES-5km (a) RCP4.5 e (b) RCP8.5.

Nas Figuras 13a e 13b têm-se o mapa da diferença entre o 99º percentil (P99) da rajada máxima do vento (em m/s), do período histórico e das projeções futuras (Figura 13a, RCP4.5 e Figura 13b, RCP8.5). Ainda nestas Figuras, é mostrada a localização das duas linhas de transmissão foco deste projeto: no oeste de Santa Catarina, a linha Itá-Salto Santiago e no leste a linha Biguaçu-Blumenau. Observou-se no cenário RCP8.5 um leve aumento da rajada a oeste, e um significativo aumento a leste do Estado de Santa Catarina ao longo deste século. No cenário RCP4.5 este padrão espacial também pode ser observado, porém em menor intensidade que no RCP8.5.

Ainda nestas Figuras, e em comparação com o Produto 3 e 4 (LIMA, 2019a, 2019b), os modelos na resolução de 20 km concordam com um aumento da rajada no oeste, porém mostram uma diminuição no leste,

enquanto, o modelo de 5 km mostrou um aumento significativo nesta mesma região. Isto pode ser explicado pelo fato de o modelo de maior resolução apresentar uma melhor definição da topografia do local, que é um importante fator no cálculo da velocidade do vento.

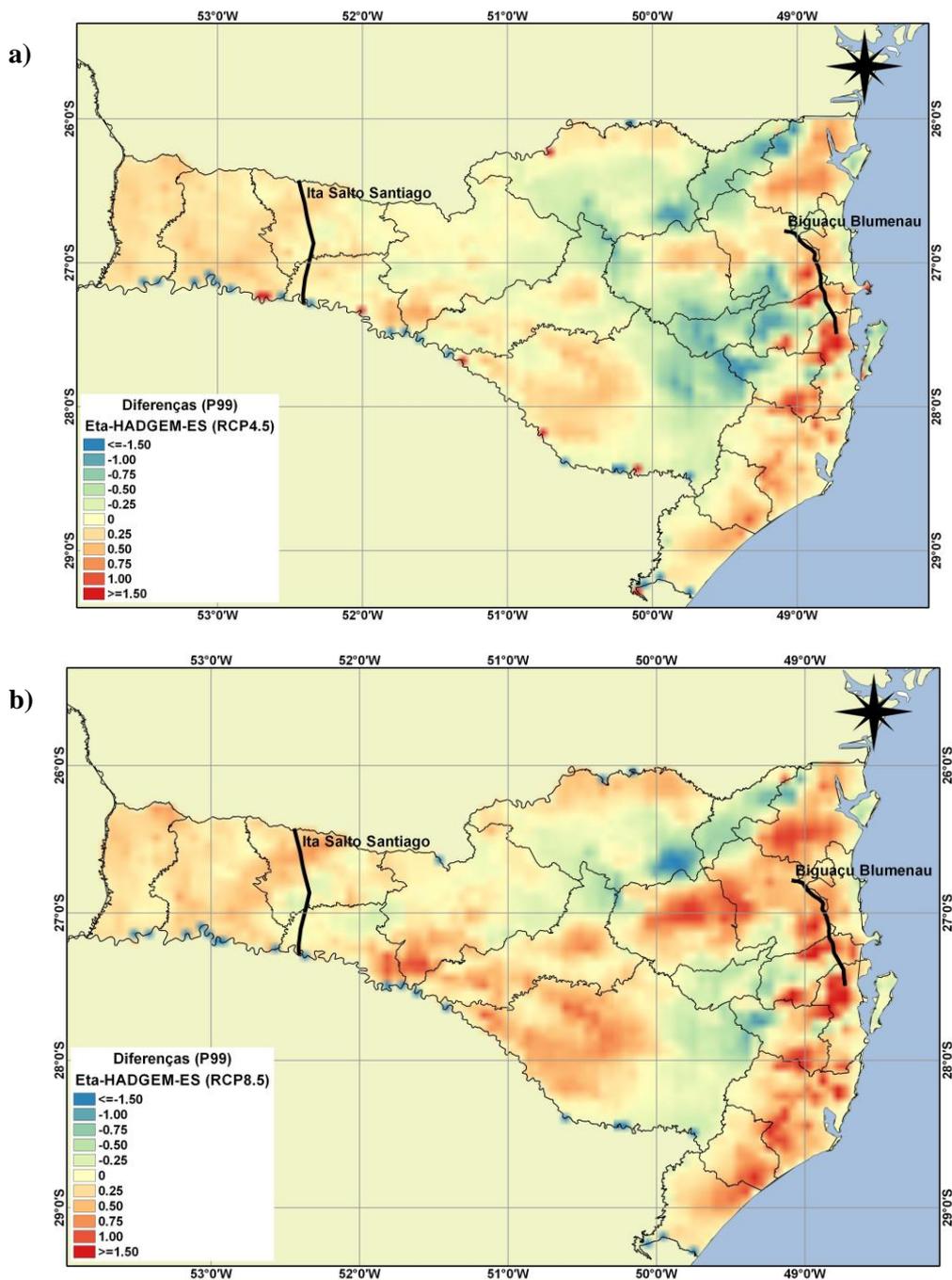


Figura 13. Diferença do 99 percentil (P99) da Rajada máxima do vento (m/s) simulado pelo modelo Eta-HADGEM2-ES (Projeções – Histórico).

Nas Figuras 14a e 14b têm-se o mapa da distribuição do índice *FAR* da rajada máxima 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 (5 km). O limite de referência utilizado neste trabalho foi de 20 m/s, esse limiar foi definido junto com os técnicos da Eletrosul em uma oficina realizada no dia 25 de junho de 2019, tendo em vista que os registros de rajadas acima de 25 m/s foram escassos nos dados simulados pelo modelo. Foi calculada a probabilidade de ocorrência da rajada de 20 m/s no período histórico e nas projeções, e com isso, calculou-se os valores de *FAR* indicados nas figuras abaixo. Ainda nestas figuras, são indicadas as localizações das duas linhas de foco deste projeto. A Figura 14, ilustra os resultados para o modelo Eta-HadGEM2-ES-5km, onde valores de *FAR* maiores que zero sugerem que o evento se tornou mais provável devido as alterações climáticas. Analisou-se aqui apenas valores de *FAR* positivo, porém os mesmos argumentos são válidos para valores negativos, que indicam diminuição de valores extremos.

Observaram-se nos dois cenários RCP4.5 e RCP8.5 um valor de *FAR* alto no oeste do Estado, que vai aumentando significativamente ao longo do período entre 2010 a 2040. Verificando o cenário mais pessimista (RCP8.5) a alteração do índice *FAR* fica mais evidente, que apresentando um aumento em comparação ao cenário mais otimista (RCP4.5).

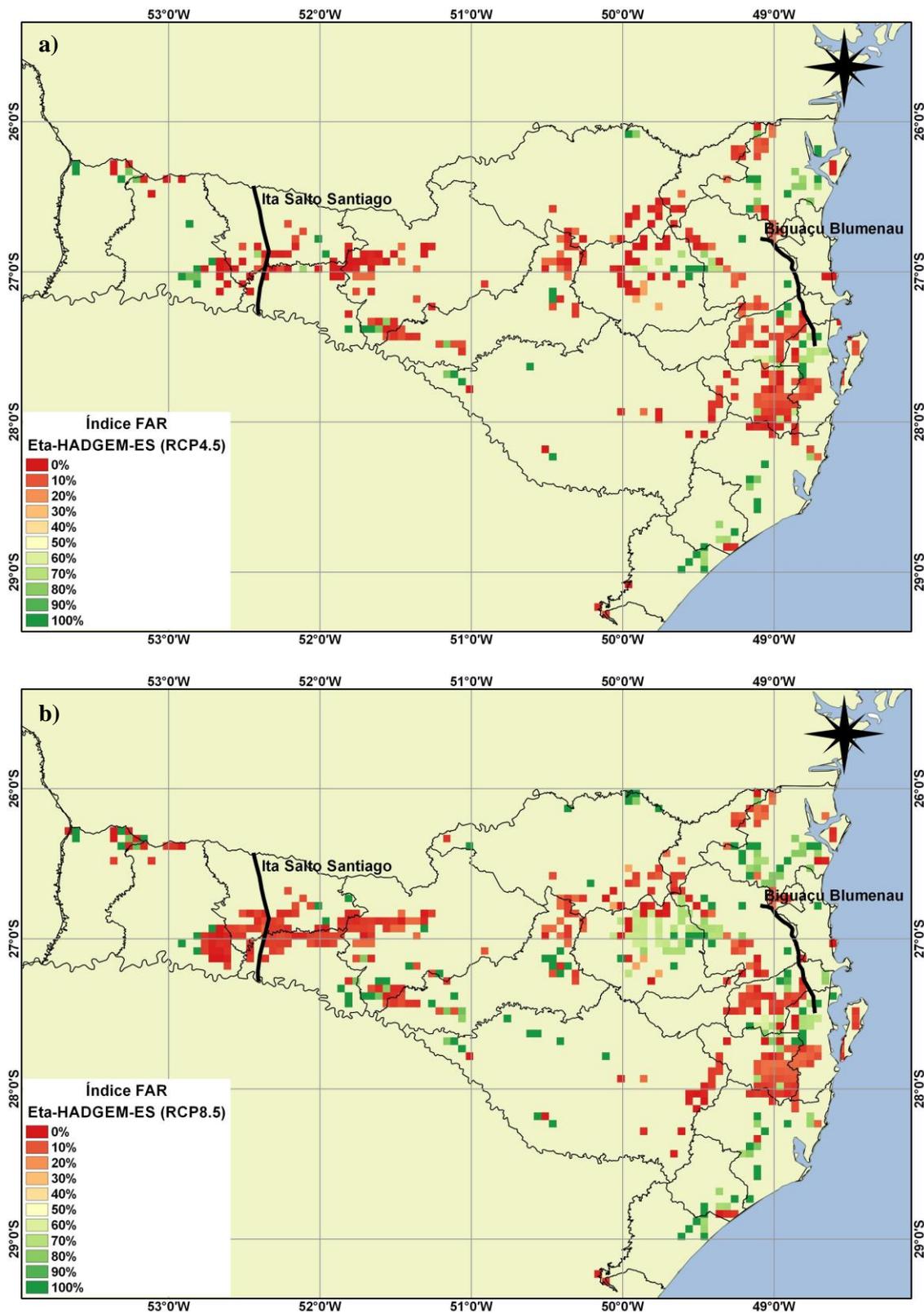


Figura 14. Mapa da variação do indicador de risco de mudanças climáticas FAR, simulado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES (5 km), correspondente ao aumento na probabilidade da rajada de vento ultrapassar os 20 m/s.

5.2. Resultado do Teste de Tendência para os Modelos Eta-HADGEM2-ES (5 km), Eta-HADGEM2-ES (20 km) e Eta-MIROC5 (20 km) para o Período Histórico e Projeções

As Figuras de 15 a 16 mostram as tendências das rajadas máximas anuais ao longo do período de estudo, utilizando os métodos de Mann-Kendall (KENDALL, 1948; MANN, 1945) e Sem (SEN, 1968). Referem-se às projeções futuras de rajadas do vento para o Estado de Santa Catarina obtidas pelos modelos Eta-HADGEM2-ES (de 20 km) e Eta-MIROC5 (de 20 km), considerando os cenários RCP4.5 e RCP8.5. Para o cálculo das tendências sobre as linhas de transmissão, foi realizado a média dos pontos de grade, dos modelos, ao longo da extensão das linhas de transmissão. As Figuras 15 e 16 apresentam as projeções futuras de rajada máxima anual do vento para a linha de transmissão Biguaçu-Blumenau (LT Litoral) e Itá-Salto Santiago (LT Oeste), considerando os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

Na Figura 15a, LT Litoral, verificou-se que há uma tendência de diminuição da rajada do vento em todo o período, para o Eta-HADGEM2-ES, de $-0,06$ m/s/ano, $-0,07$ m.s⁻¹ e $-0,04$ m.s⁻¹, com significância estatística de 1%, 0,01% e 5%, respectivamente, para todos os três períodos em estudo. Enquanto para o Eta-MIROC5 apresenta um aumento da rajada do vento no período de 2006-2040, $+0,04$ m.s⁻¹ e significância estatística de 1% e no período de 2041-2070 um aumento de $+0,01$ m.s⁻¹ sem significância estatística, já no intervalo de 2071-2099 um aumento de $+0,01$ m.s⁻¹ com significância de 1%. Na Figura 15b, LT Oeste, verificou-se um aumento em todos os cenários, exceto no período de 2006-2040 (Eta-MIROC5) que mostra uma diminuição de $-0,01$ m.s⁻¹, mas sem significância estatística para todos os intervalos. Já o Eta-HADGEM2-ES mostrou significância estatística de aumento em todos os períodos.

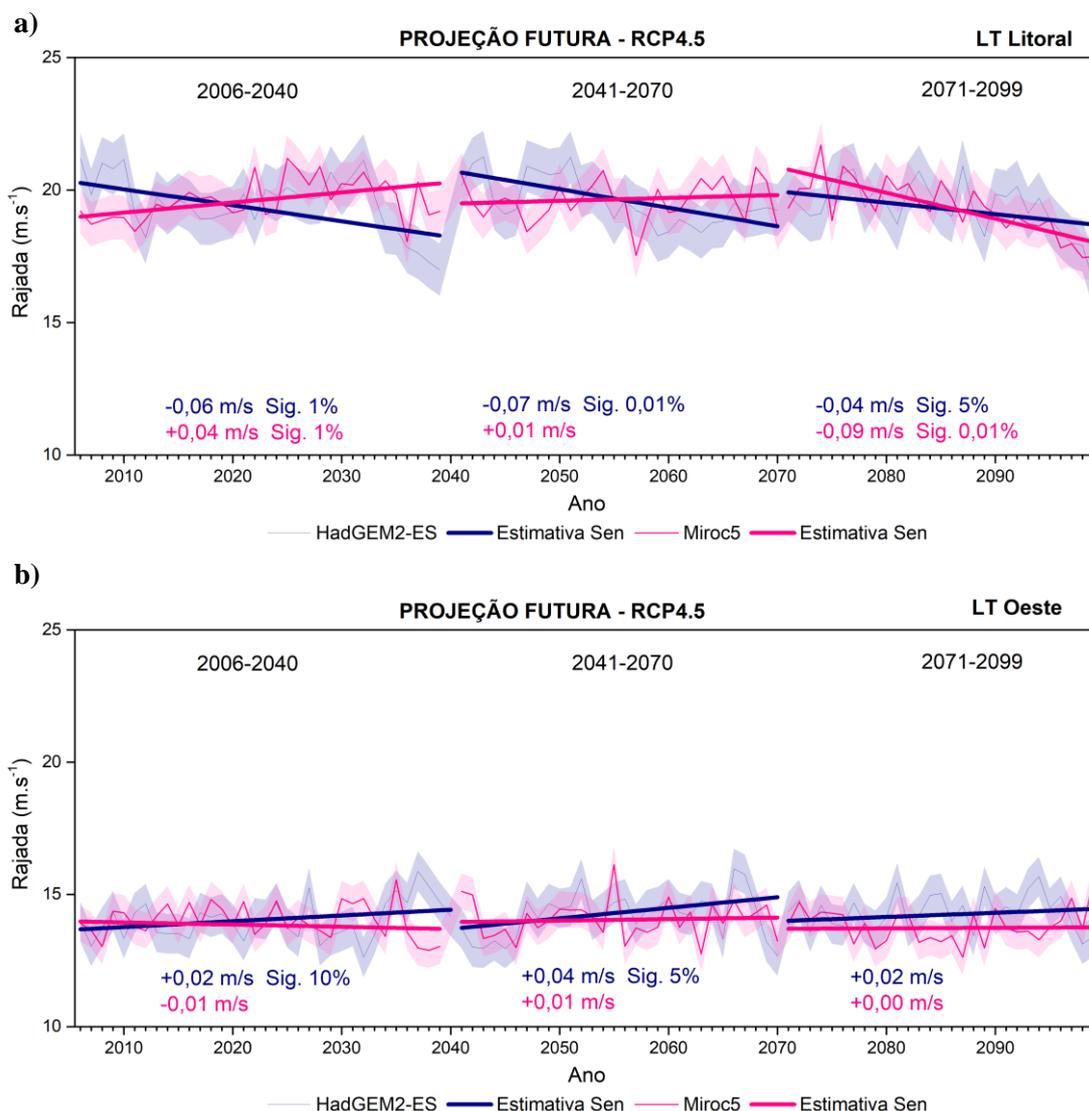


Figura 15. Projeções futuras de rajada máxima anual de vento para as linhas de transmissão Biguaçu-Blumenau (LT Litoral) (a) e Itá-Salto Santiago (LT Oeste) (b) no cenário RCP4.5 simuladas pelos modelos Eta-HADGEM2-ES (20 km) (curva azul) e Eta-MIROC5 (20 km) (curva vermelha). As áreas hachuradas representam o desvio padrão associado a cada curva e as retas espessas representam a estimativa de tendência obtida pelo método Sen.

Na Figura 16a, LT Litoral (RCP8.5), verifica-se que haverá uma tendência de diminuição da rajada do vento em todo o período, para o Eta-HADGEM2-ES, de $-0,01 \text{ m.s}^{-1}$, $-0,09 \text{ m.s}^{-1}$ e $-0,08 \text{ m.s}^{-1}$, com confiabilidade estatística de 99%, 99,9% e 99,9%, respectivamente. Enquanto para o Eta-MIROC5 verifica-se uma diminuição da rajada do

vento, no período de 2006-2040, de $-0,03 \text{ m.s}^{-1}$ e confiabilidade estatística de 99% e nos períodos de 2041-2070 e 2071-2099 um aumento de $+0,01 \text{ m.s}^{-1}$ sem confiabilidade estatística e $+0,06 \text{ m.s}^{-1}$ com confiabilidade estatística de 95%, respectivamente. Na Figura 16b, LT Oeste (RCP8.5), não se verifica significância estatística para o modelo Eta-HADGEM2-ES. Já o Eta-MIROC5 mostra uma diminuição de $-0,03 \text{ m.s}^{-1}$ com confiabilidade estatística de 99,9% para o período de 2006-2040, aumento de $+0,01 \text{ m.s}^{-1}$ para 2041-2070 sem confiabilidade estatística e um aumento de $+0,03 \text{ m.s}^{-1}$ com confiabilidade de 95% para 2071-2099.

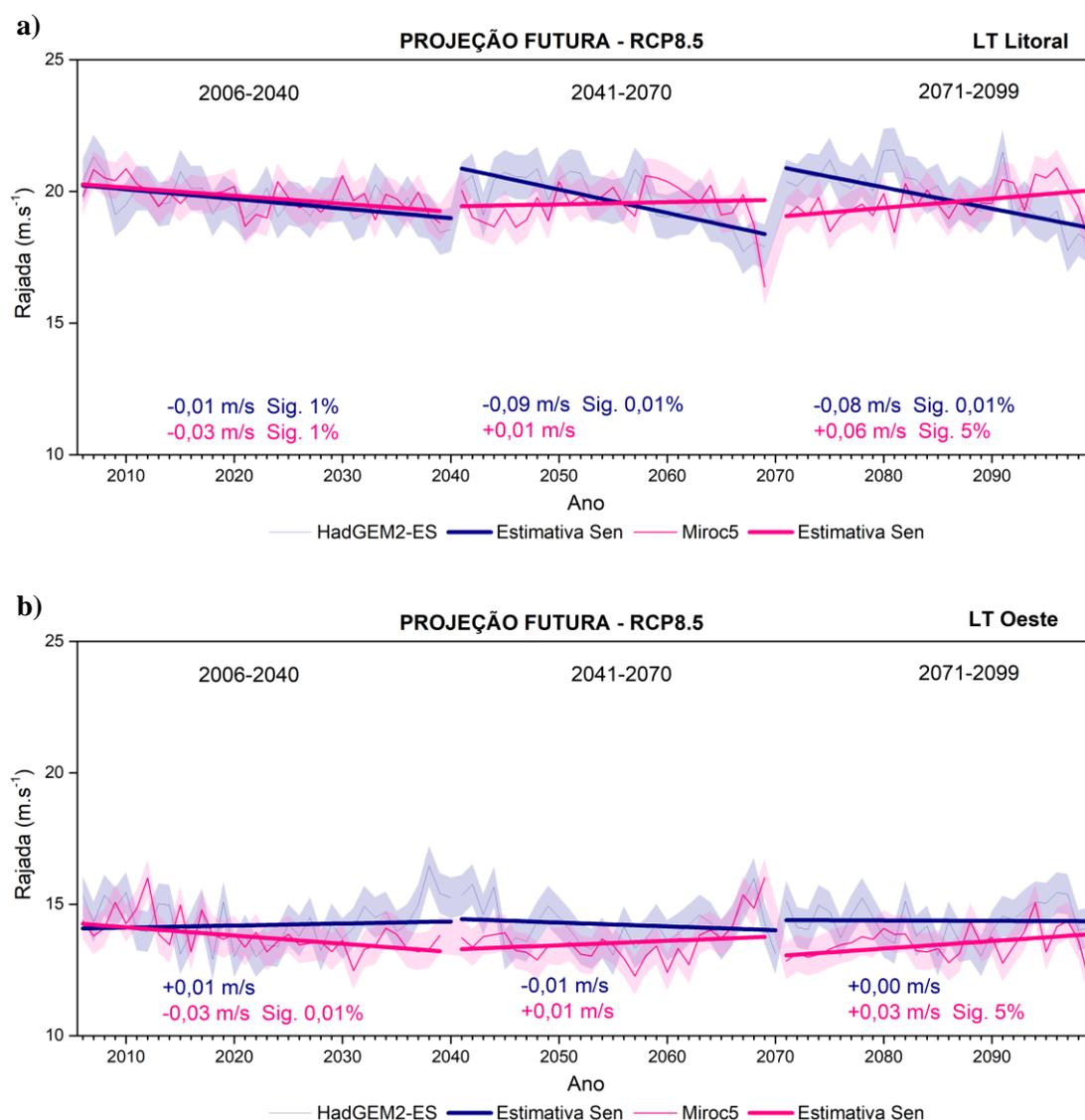
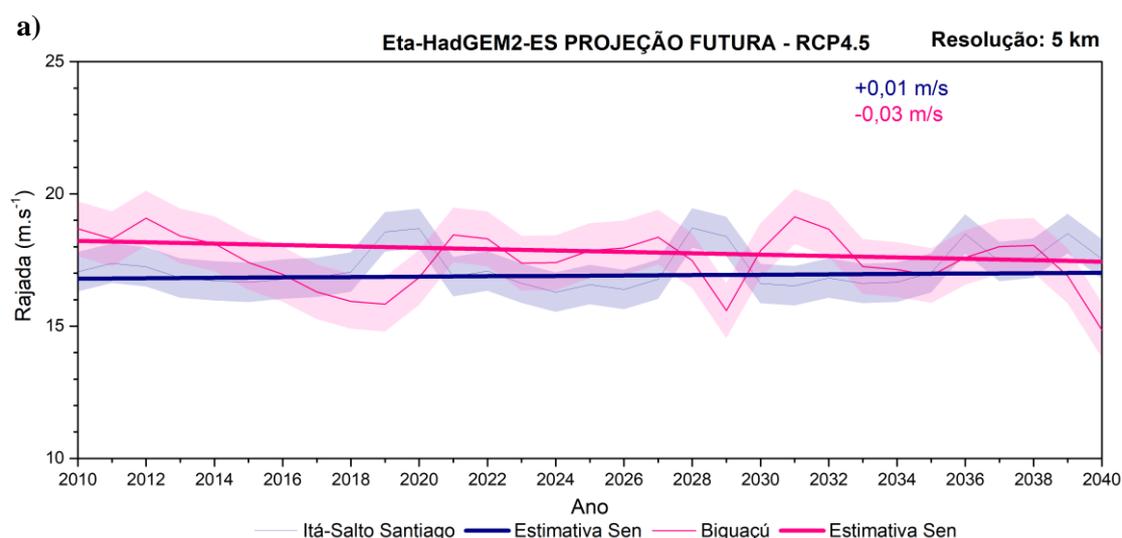


Figura 16. Projeções futuras de rajada máxima anual de vento para as linhas de transmissão Biguaçu-Blumenau (LT Litoral) (a) e Itá-Salto

Santiago (LT Oeste) (b) no cenário RCP8.5 simuladas pelos modelos Eta-HADGEM2-ES (20 km) (curva azul) e Eta-MIROC5 (20 km) (curva vermelha). As áreas hachuradas representam o desvio padrão associado a cada curva e as retas espessas representam a estimativa de tendência obtida pelo método Sen.

A Figura 17 mostra as tendências das rajadas máximas anuais das projeções futuras para o Estado de Santa Catarina obtidas pelos modelos Eta-HADGEM2-ES (de 5 km), considerando os cenários RCP4.5 e RCP8.5. Na Figura 17a apresenta as projeções futuras para as linhas de transmissões de Itá-Salto Santiago (LT Oeste) e Biguaçu-Blumenau (LT Litoral), considerando o cenário RCP4.5, enquanto a Figura 17b mostra o cenário RCP8.5.

Na Figura 17a verifica-se uma tendência de aumento de $+0,01 \text{ m.s}^{-1}$ e uma diminuição de $-0,03 \text{ m.s}^{-1}$, para LT Oeste e LT Leste, respectivamente, porém sem significância estatística para ambas. Na Figura 17b, RCP8.5, as duas linhas de transmissão mostram uma tendência de aumento de $+0,05 \text{ m.s}^{-1}$ em LT Oeste e $+0,01 \text{ m.s}^{-1}$ em LT Leste, mas com confiabilidade estatística de 99,9% apenas na linha de transmissão LT Oeste.



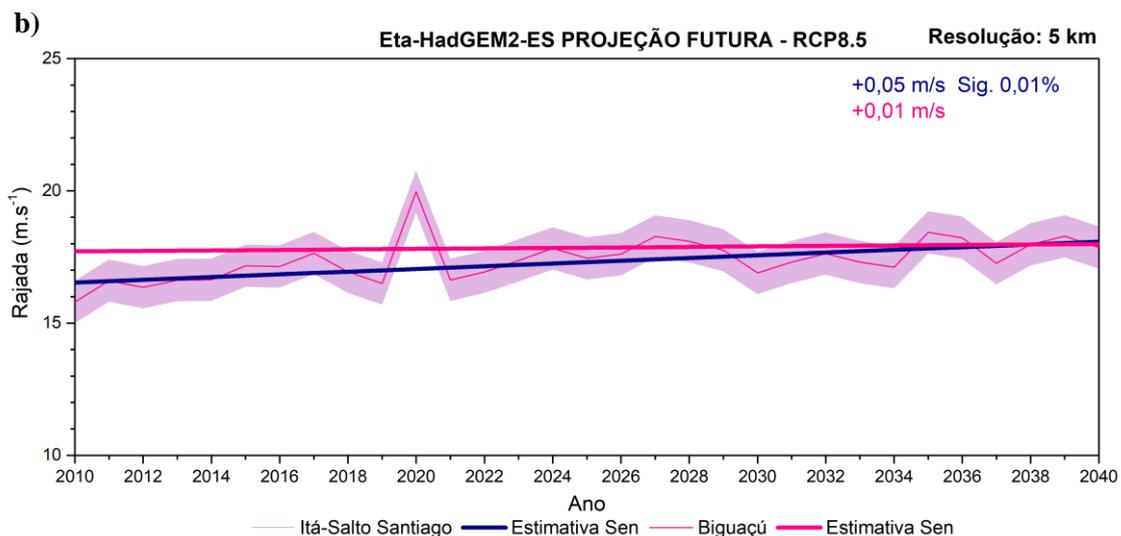


Figura 17. Projeções futuras de rajada máxima anual de vento para as linhas de transmissão Biguaçu-Blumenau (LT Litoral) (curva azul) e Itá-Salto Santiago (LT Oeste) (curva Vermelha) nos cenários RCP4.5 (a) e RCP8.5 (b) simuladas pelos modelos Eta-HADGEM2-ES (5 k km). As áreas hachuradas representam o desvio padrão associado a cada curva e as retas espessas representam a estimativa de tendência obtida pelo método Sen.

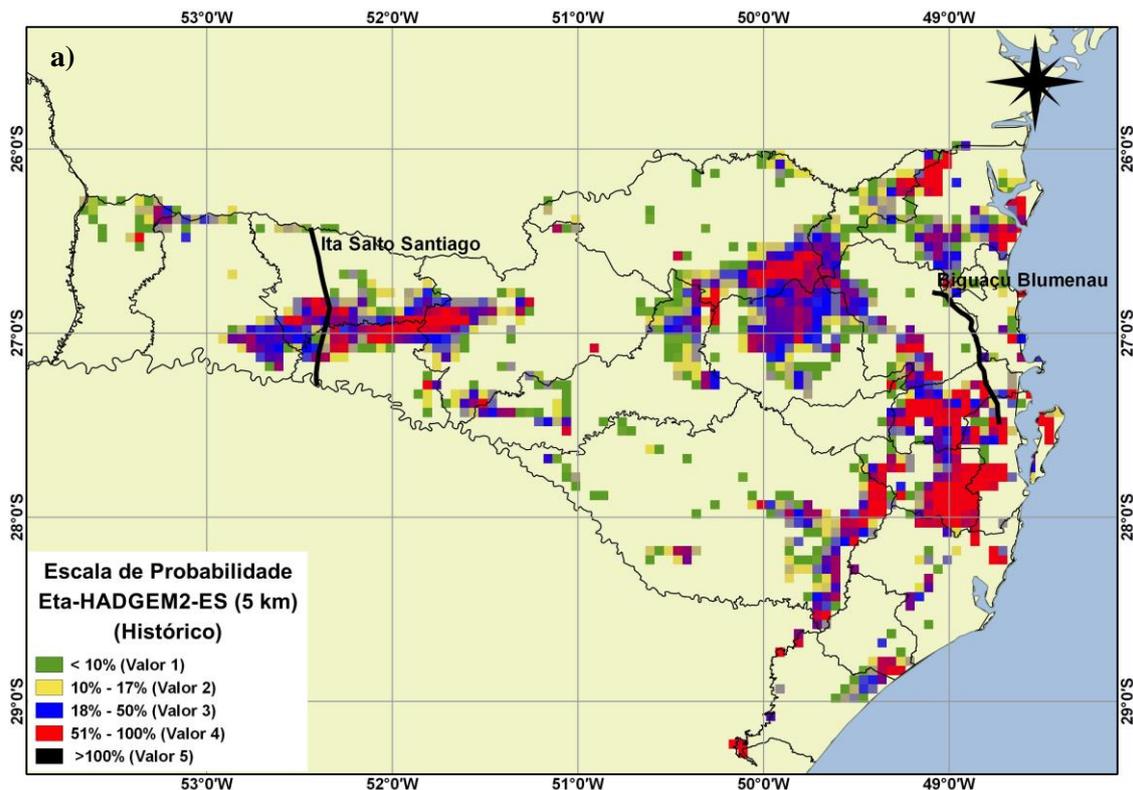
5.3. Classificação da probabilidade de ventos extremos oriundos do histórico e projeções climáticas dos modelos Eta-HADGEM2-ES (5 km), Eta-HADGEM2-ES (20 km), Eta-MIROC5 (20 km)

Nas Figuras de 18 a 20 tem-se a classificação de probabilidade que representa a probabilidade de ocorrência de um evento climático acima de um limite, no caso das rajadas extrema o limite definido nas oficinas foi superior a 20 m/s, podendo variar de 1 (raro) até 5 (Quase certo). Os riscos são avaliados sobre as condições climáticas atuais para estabelecer uma linha de base (*baseline*). Já os riscos futuros são avaliados considerando futuras mudanças no clima (projetadas) e as condições projetadas da própria infraestrutura.

Na Figura 18 tem-se o período histórico para a) Eta-HADGEM2-ES (5 km), b) Eta-HADGEM2-ES (20 km) e c) Eta-MIROC5 (20 km). Pode-se observar uma maior probabilidade de eventos no oeste do Estado de Santa Catarina, principalmente nos modelos de 20 km, embora o modelo

de 5 km apresente resultados significativos para a localização das duas linhas de transmissão. Todos esses mapas estarão em anexo ao produto, em arquivos *NETCDF*, que podem ser abertos em qualquer programa em *GIS* e cruzados com as localizações das linhas de transmissões para saber a escala de probabilidade de qualquer ponto dentro do domínio dos modelos.

Na Figura 19 tem-se o cenário RCP4.5 para a) Eta-HADGEM2-ES (5 km), b) Eta-HADGEM2-ES (20 km) e c) Eta-MIROC5 (20 km). Pode-se observar uma tendência parecida com o período histórico, porém com mais probabilidade em todos os modelos. Na Figura 20, tem-se o cenário RCP8.5, para a) Eta-HADGEM2-ES (5 km), b) Eta-HADGEM2-ES (20 km) e c) Eta-MIROC5 (20 km). Observou-se a mesma tendência que o cenário RCP4.5, mas com maiores valores de probabilidade, o que já era esperado no cenário mais pessimista.



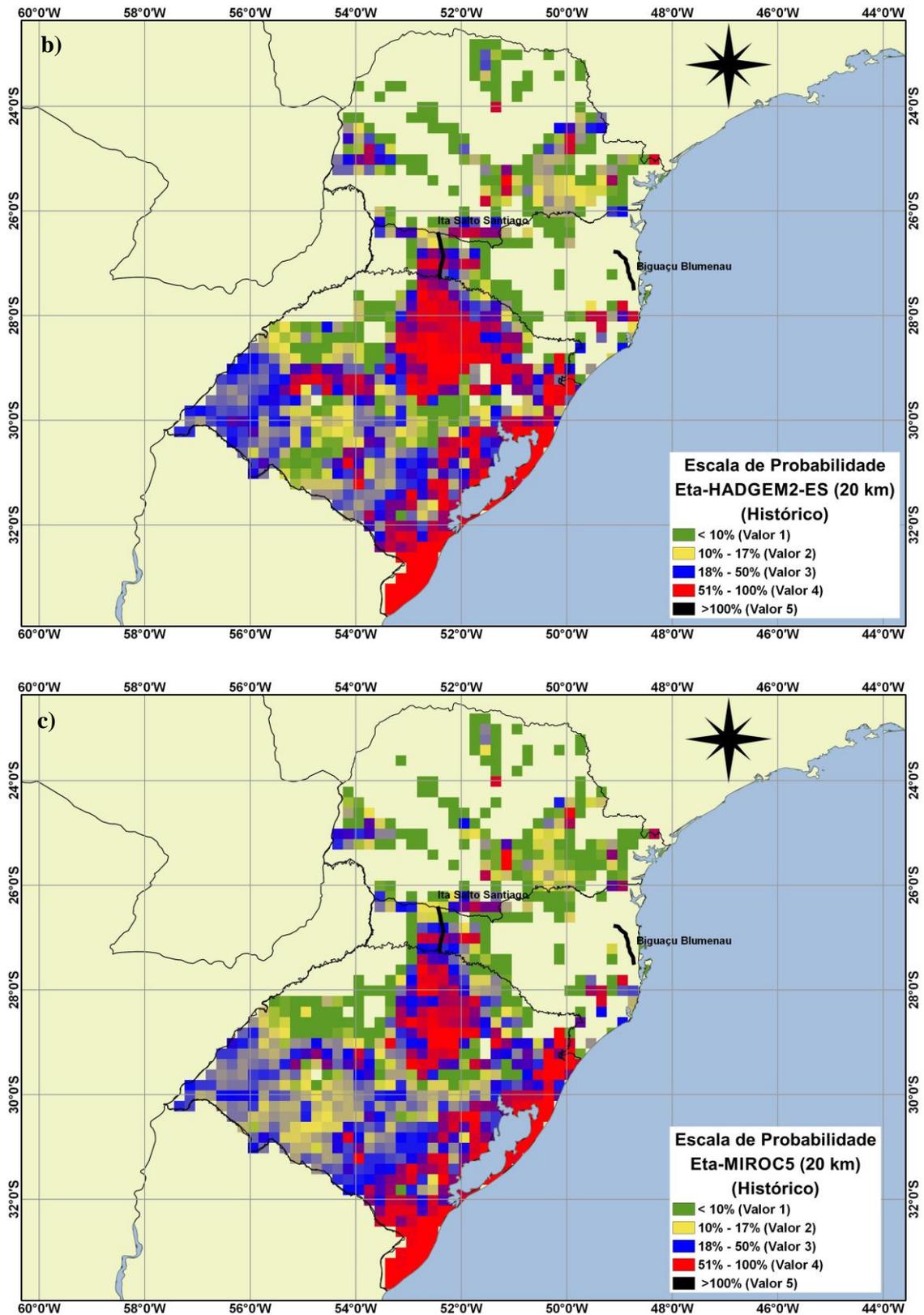
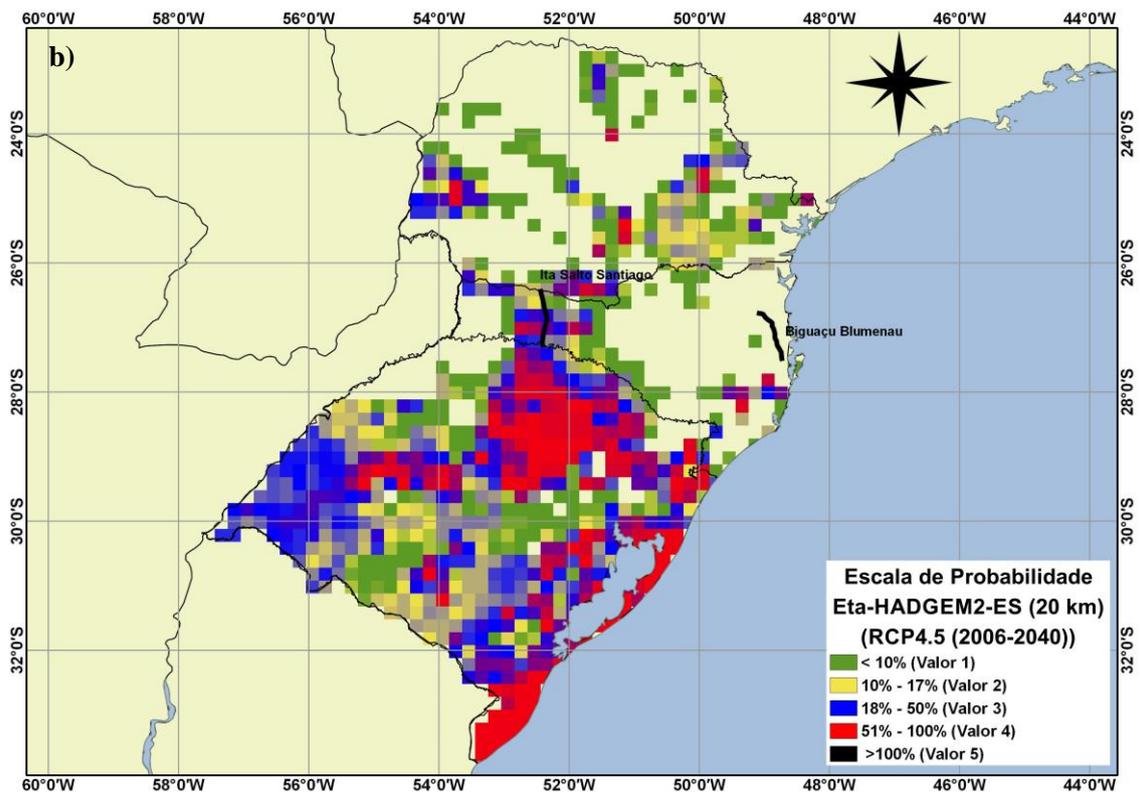
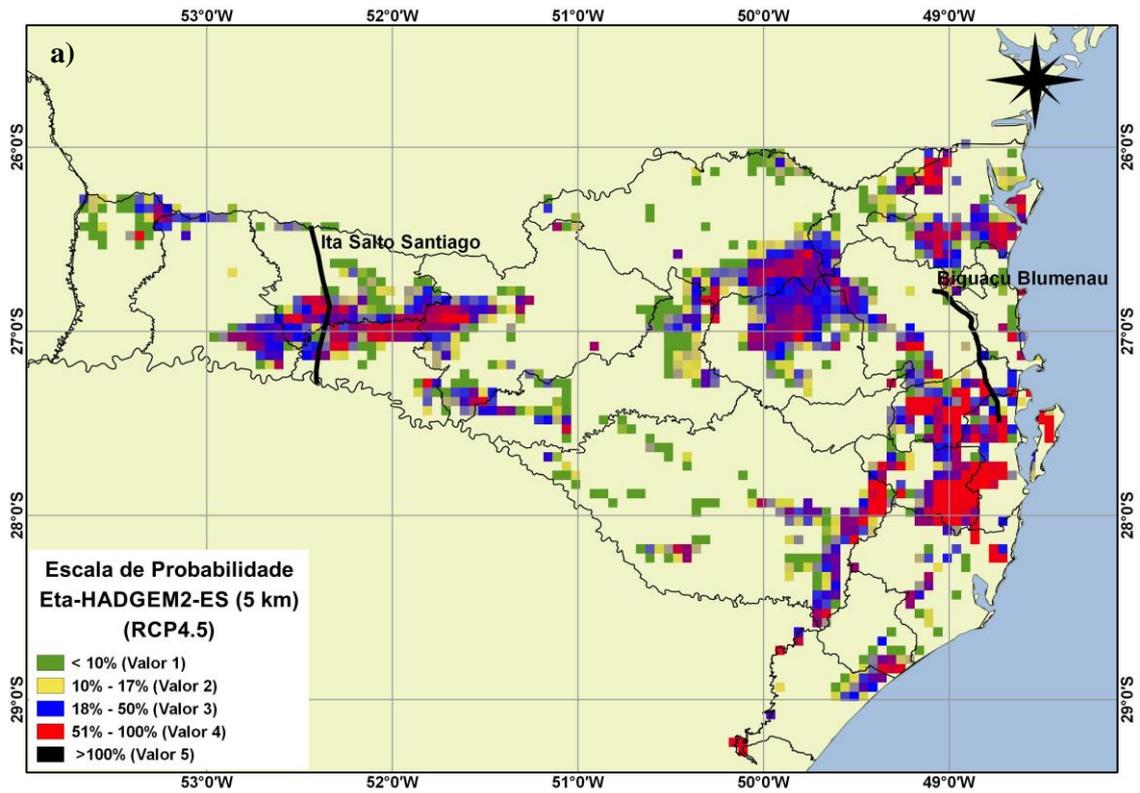


Figura 18. Mapa da escala de probabilidade (Tabela 1). a) Eta-HADGEM2-ES (5 km) b) Eta-HADGEM2-ES (20 km) e c) Eta-MIROC5 (20 km), período histórico, correspondente ao aumento na probabilidade da rajada de vento ultrapassar os 20 m/s.



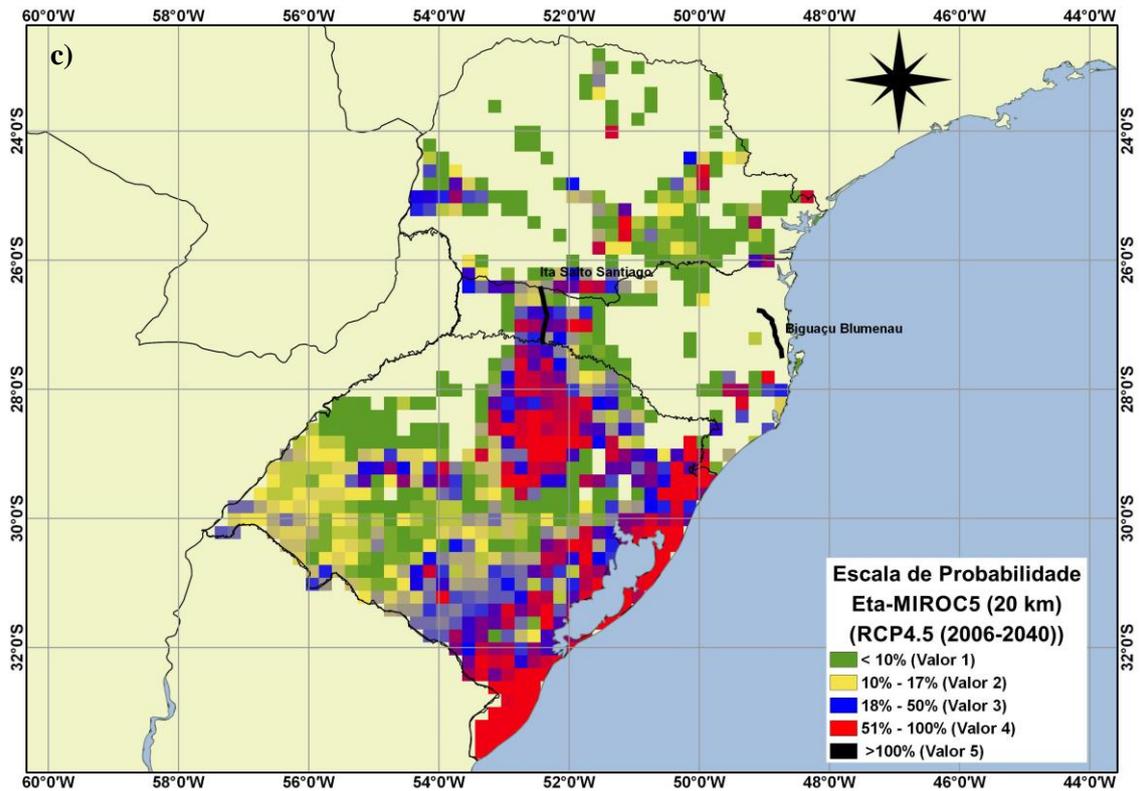
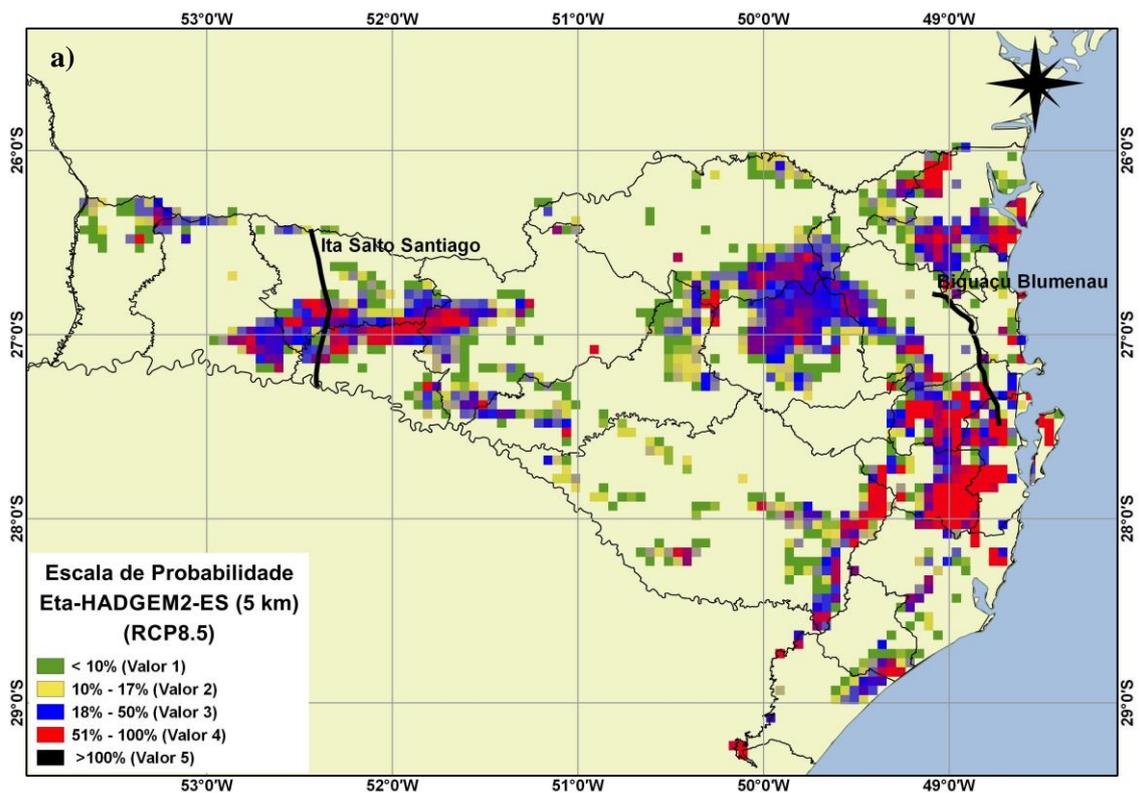


Figura 19. Mapa da escala de probabilidade (Tabela 1). a) Eta-HADGEM2-ES (5 km) b) Eta-HADGEM2-ES (20 km) e c) Eta-MIROC5 (20 km), cenário RCP4.5, correspondente ao aumento na probabilidade da rajada de vento ultrapassar os 20 m/s.



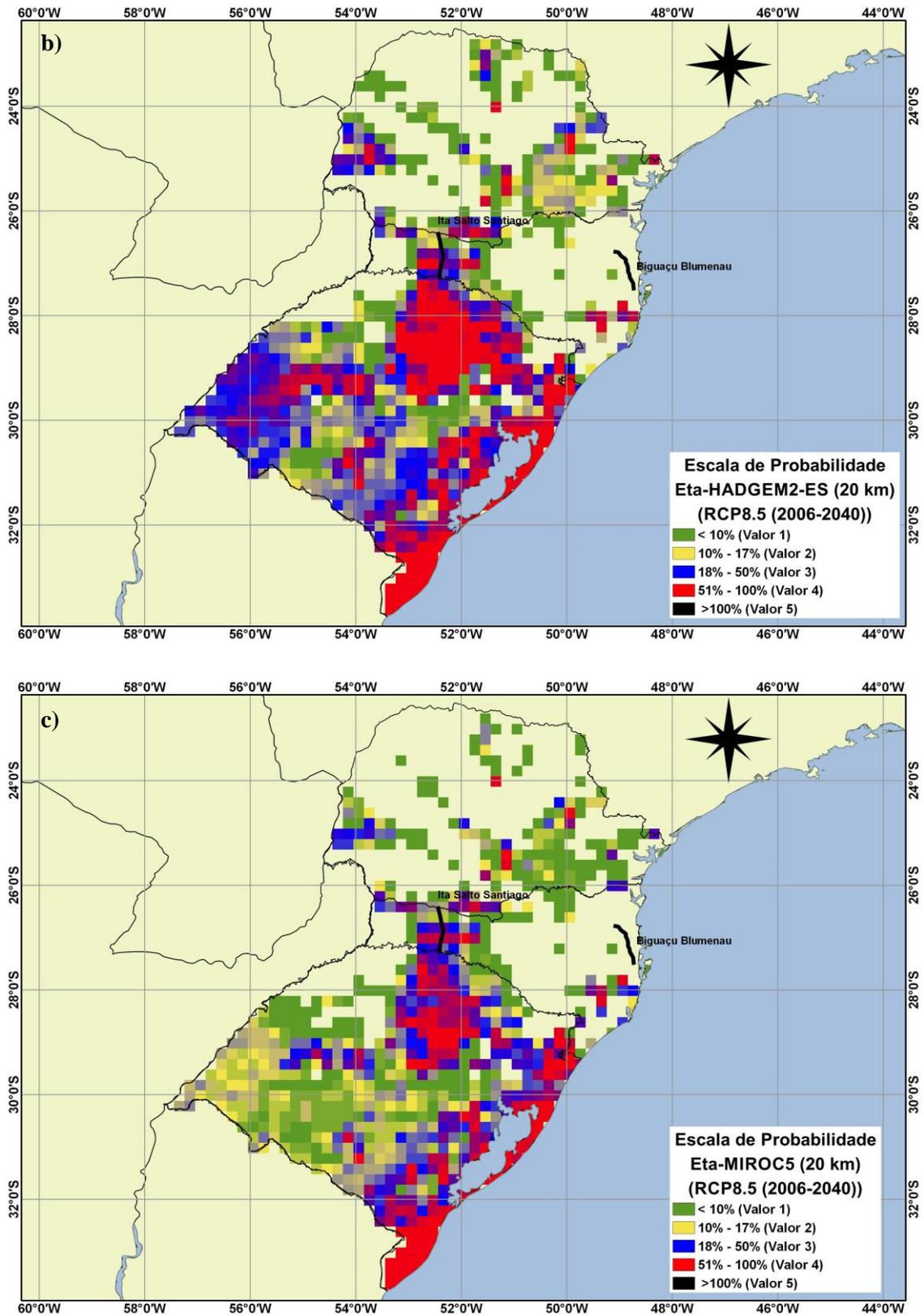
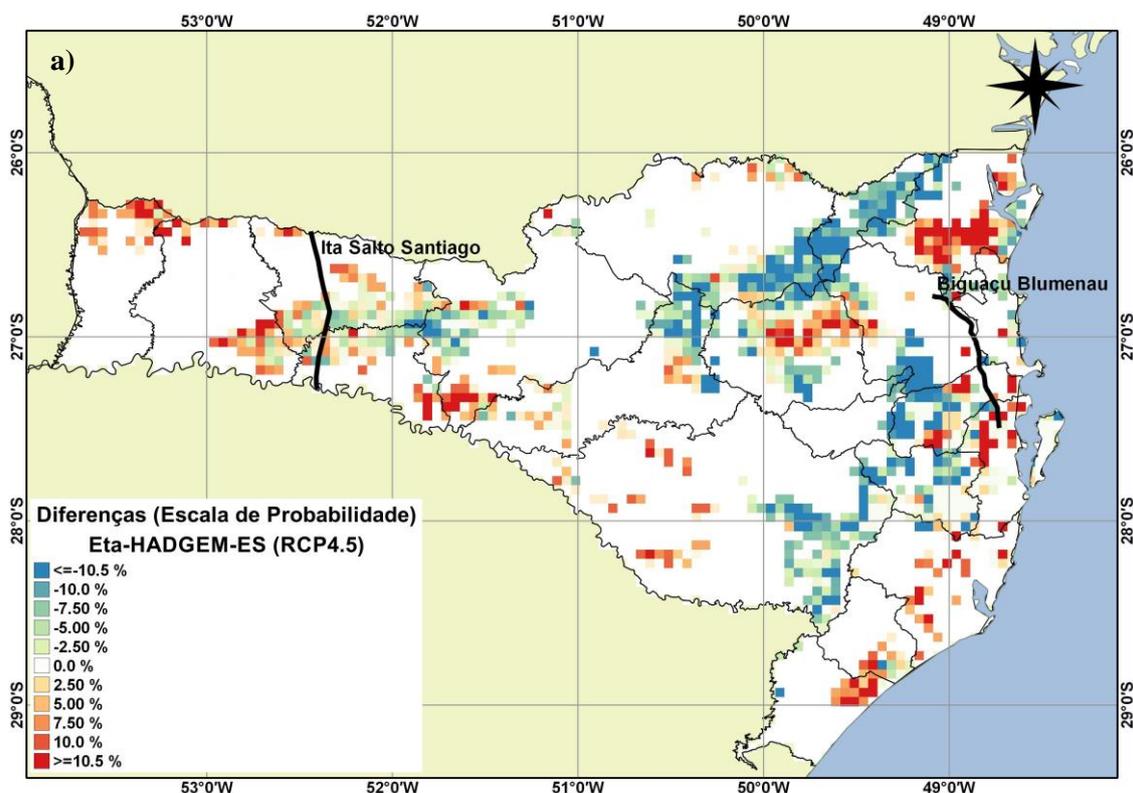


Figura 20. Mapa da escaia de probabilidade (Tabela 1). a) Eta-HADGEM2-ES (5 km) b) Eta-HADGEM2-ES (20 km) e c) Eta-MIROC5 (20 km), cenário RCP8.5, correspondente ao aumento na probabilidade da rajada de vento ultrapassar os 20 m/s.

Nas Figuras de 21 a 22 tem-se as diferenças dos mapas de probabilidade, aos quais representam as diferenças entre os cenários do clima futuro e o clima atual, que evidência onde há aumento ou diminuição da escala de probabilidade. Valores em vermelho indicam um aumento da escala de probabilidade e valores em azul representam uma diminuição. Na Figura 21 têm-se as diferenças para o cenário RCP4.5 para a) Eta-HADGEM2-ES (5 km), b) Eta-HADGEM2-ES (20 km) e c) Eta-MIROC5 (20 km).

A Figura 21a mostra um ligeiro aumento da escala de probabilidade nas linhas de transmissão. Na Figura 22b não se observa nenhum evento sobre a linha de LT Leste, enquanto observa-se aumento na linha de LT Oeste. Tem-se o mesmo padrão na Figura 21c, exceto pelo fato de observar-se uma diminuição na linha do Oeste. Na Figura 22a mostra um ligeiro aumento da escala de probabilidade em ambas as linhas de transmissão. A mesma tendência é observada na Figura 22.



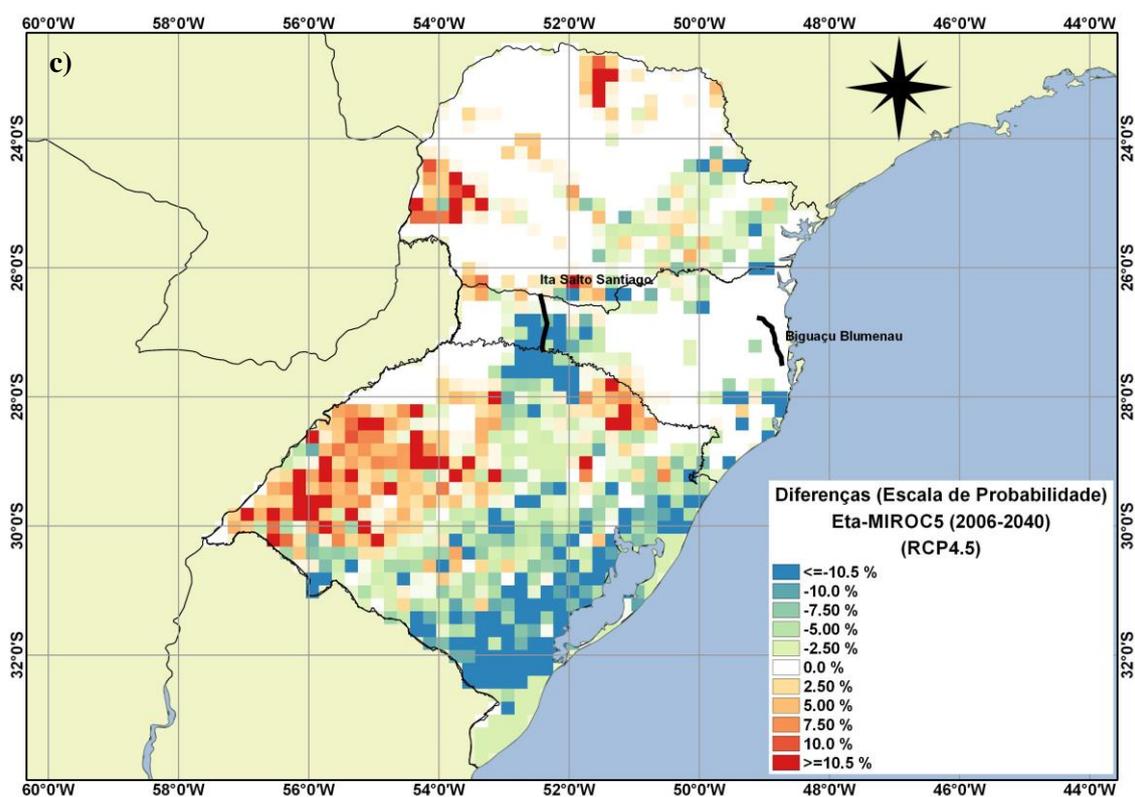
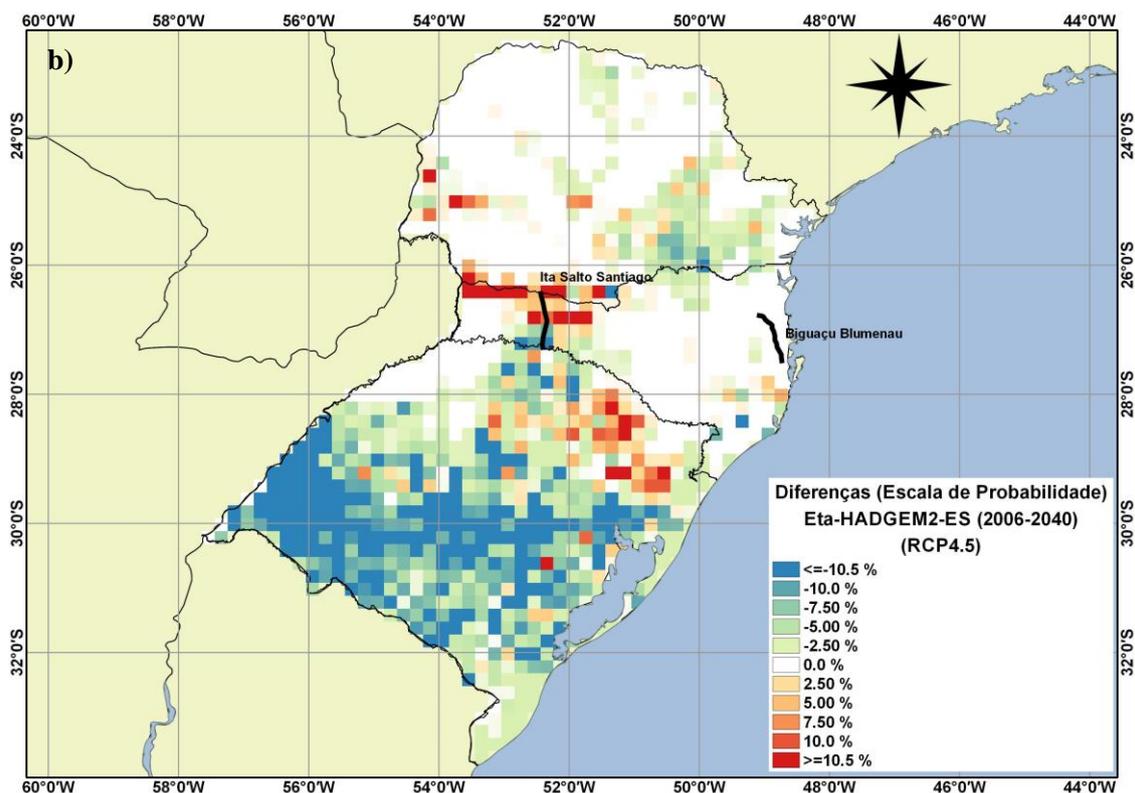
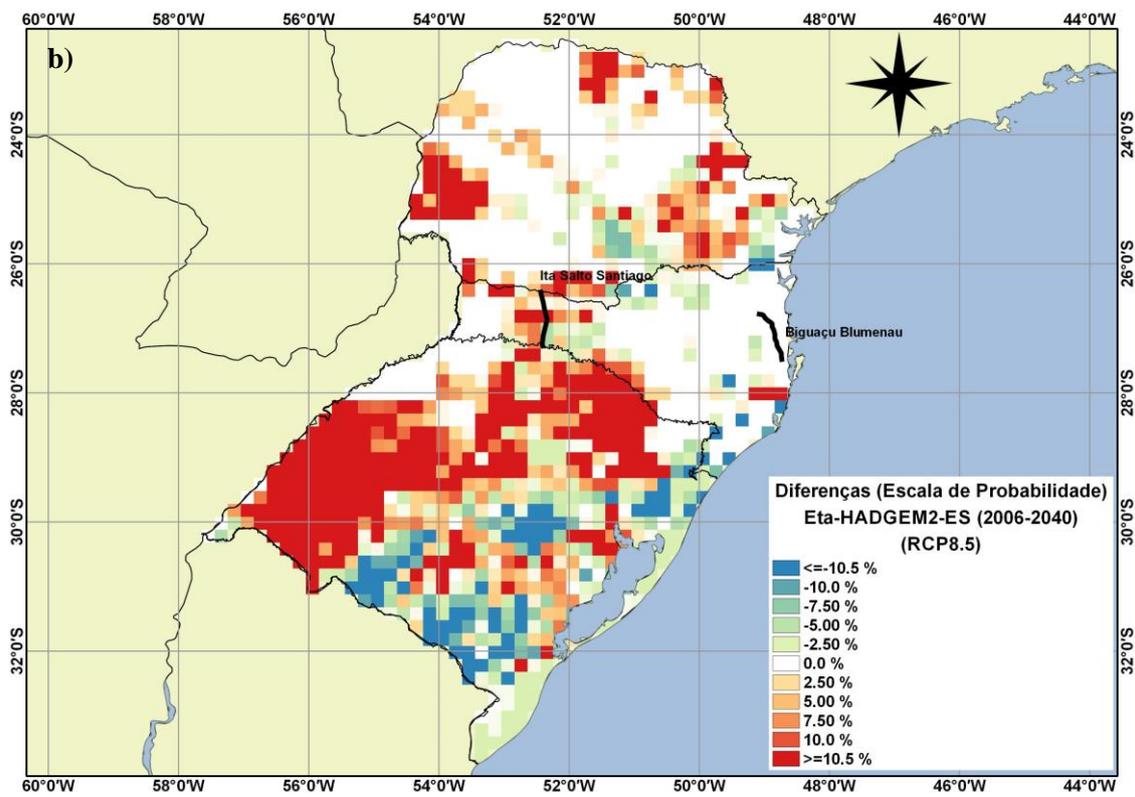
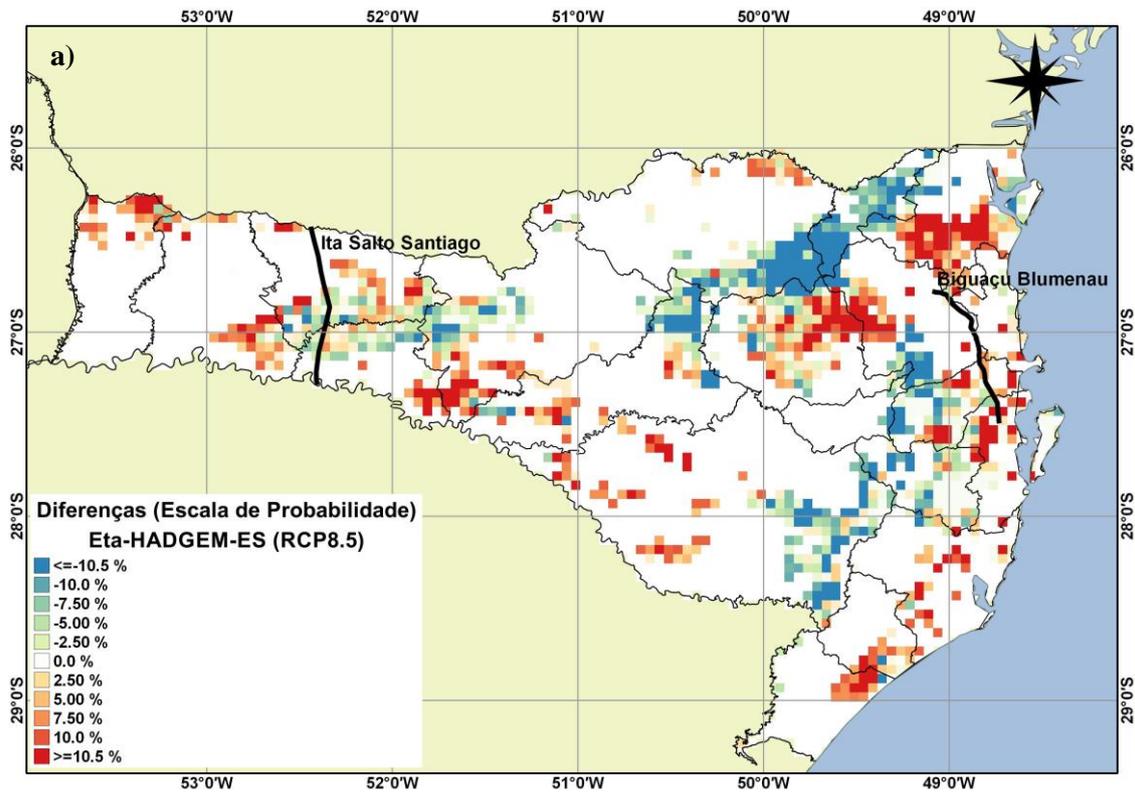


Figura 21. Mapa da diferença entre as escalas de probabilidade do período histórico e do cenário RCP4.5 a) Eta-HADGEM2-ES (5 km) b) Eta-HADGEM2-ES (20 km) e c) Eta-MIROC5 (20 km).



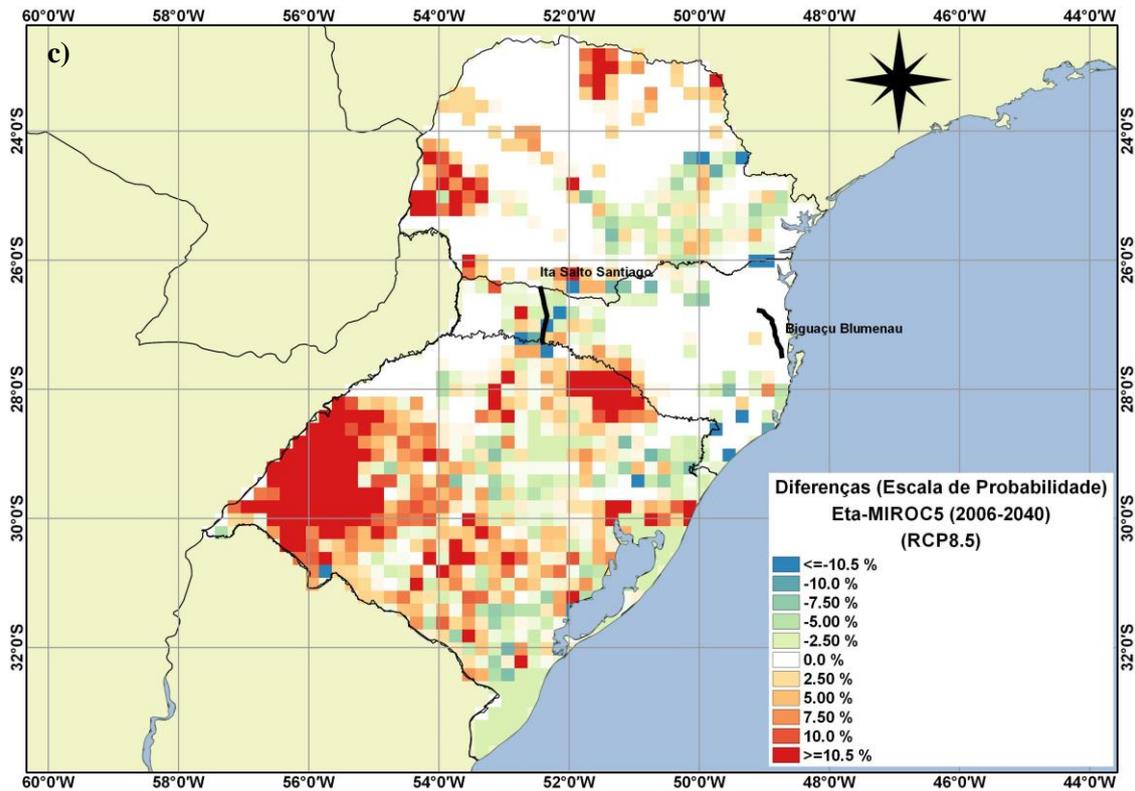


Figura 22. Mapa da diferença entre as escalas de probabilidade do período histórico e do cenário RCP8.5 a) Eta-HADGEM2-ES (5 km) b) Eta-HADGEM2-ES (20 km) e c) Eta-MIROC5 (20 km).

6. CONCLUSÕES

No Brasil, o cálculo do carregamento provocado pelo vento e da suportabilidade das estruturas de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica é regida pela normatização técnica NBR5422 (ABNT, 1985), que fixa as condições básica para o projeto das linhas aéreas de transmissão de energia elétrica de modo a garantir níveis mínimos de segurança e limitar perturbações em instalações próximas. A velocidade do vento considerada na NBR 5422 é a velocidade de uma rajada de 3s, com tempo de recorrência de 50 anos, medidas a 10 m de altura em relação a um terreno aberto plano. Devido os resultados encontrados neste trabalho apresentarem valores diferente da norma NBR 5422 sugere-se

uma atualização da norma ou o desenvolvimento de uma nova norma que possibilite valores mais próximos do real.

O presente relatório investigou os aspectos relativos à ocorrência de ventos extremos máximos no estado de Santa Catarina a partir do período histórico e das projeções climáticas do modelo Eta-HADGEM2-ES (5 km). Este estudo compreendeu desde a validação das rodadas históricas, correção do viés do modelo, ajuste de uma relação entre o vento médio e a rajada do vento, distribuição de eventos extremos e método estatísticos de ajuste. Os métodos de distribuição de frequência adotados apresentaram um bom ajuste às séries de rajada horária e de velocidade máxima da rajada simulado. Encontrou-se uma relação estatística preliminar entre o vento médio e o vento de rajada, o que possibilitou estimar valores mais intensos de rajada, conseqüentemente possibilitando um cálculo mais realista do período de retorno simulado pelo modelo. As projeções mostraram um aumento da rajada máxima no Oeste do estado, onde está localizado a linha Ita Salto Santiago, e uma diminuição no Leste, onde está localizado a linha de Biguaçu Blumenau. O aumento pode ser comprovado pelos índices FAR, P99 e a frequência da rajada do vento. Foram gerados mapas da classificação de probabilidade que representa a probabilidade de ocorrência de um evento climático acima de um limite, 20 m/s, para avaliar os riscos as condições climáticas. Todos esses mapas estarão em anexo ao produto, em arquivos *NETCDF*, que podem ser abertos em qualquer programa em *GIS* e cruzados com as localizações das linhas de transmissões para saber a escala de probabilidade de qualquer ponto dentro do domínio dos modelos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR 5422/1985. projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. **Tecnical Report, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro**, 1985.

BACK, Á. J. Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 2001.

CANADA, E. **PIEVC Engineering Protocol For Infrastructure Vulnerability Assessment and Adaptation to a Changing Climate**. [s.l.: s.n.].

COMPAGNUCCI, R. H.; SALLES, M. A. Surface Pressure Patterns During The Year Over Southern South America. **International Journal of Climatology**, v. 17, n. 6, p. 635–653, 1997.

DOS SANTOS, A. P. P. et al. Climatic diagnostics associated with anomalous lightning incidence during the summer 2012/2013 in Southeast Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 2, p. 996–1009, 10 Fev. 2018.

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

GONÇALVES, R. C. **Análise de Freqüência Regional de Ventos Extremos no Paraná**. [s.l.: s.n.].

GOOSSENS, C.; BERGER, A. Annual and seasonal climatic variations over the northern hemisphere and Europe during the last century. **Annales Geophysicae**, v. 4, n. 4, p. 385, 1986.

GUMBEL, E. J. **Statistics of extremes**. [s.l.] Dover Publications, 2004.

GUMBEL, E. J.; LIEBLEIN, J. Some Applications of Extreme-Value Methods. **American Statistician**, 1954.

HASHINO, T.; BRADLEY, A. A.; SCHWARTZ, S. S. Evaluation of bias-correction methods for ensemble streamflow volume forecasts. **Hydrology and Earth System Sciences**, 2007.

HERSHFIELD, D. M.; KOHLER, M. A. An empirical appraisal of the Gumbel extreme-value procedure. **Journal of Geophysical Research**, v. 65, n. 6, p. 1737–1746, 1 Jun. 1960.

- KENDALL, M. G. **Rank correlation methods**. [s.l: s.n.].
- LIMA, F. **MMA e GIZ. Produto 4: ANÁLISE DE VENTO EXTREMO A PARTIR DE PROJEÇÕES DE MODELOS CLIMÁTICOS REGIONALIZADOS (ETA-CPTEC)**. [s.l: s.n.].
- LIMA, F. J. DE L. **MMA e GIZ. Produto 3: Análise de vento extremo a partir de rodadas históricas de modelos climáticos regionalizados (Eta-CPTEC) corrigidas. Ampliação dos Serviços Climáticos para Investimentos em Infraestrutura (CSI)**. Brasília, DF: [s.n.].
- MANN, H. B. Nonparametric Tests Against Trend. **Econometrica**, 1945.
- 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.
- MINISTÉRIO DE MINAS ENERGIA. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. **Ministério de Minas Energia**, p. 44, 2001.
- 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 extremos de precipitação diária, temperatura máxima e mínima e velocidade do vento em Piracicaba, SP (1917-2006). **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2008a.
- SANSIGOLO, C. A. Distribuições de extremos de precipitação diária, temperatura máxima e mínima e velocidade do vento em Piracicaba, SP (1917-2006). **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2008b.
- SANTOS, A. P. P. DOS et al. Precipitação na Cidade de Salvador: Variabilidade Temporal e Classificação em Quantis. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 4, p. 454–467, Dez. 2016.
- SCHAAKE, J. C. et al. HEPEX: The hydrological ensemble prediction experiment. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 2007.
- SEN, P. K. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. **Journal of the American Statistical Association**, 1968.

SILVA, W. L.; DEREZYNSKI, C. P. Caracterização Climatológica e Tendências observadas em extremos climáticos no Estado do Rio de Janeiro. **Anuario do Instituto de Geociencias**, 2014.

SNEYERS, R. **On the statistical analysis of series of observations**. [s.l.] Secretariat of the World Meteorological Organization, 1990.

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.

WEIBULL, W. A statistical distribution function of wide applicability. **J. Appl. Mech.**, 1951.

WOOD, A. W.; SCHAAKE, J. C. Correcting Errors in Streamflow Forecast Ensemble Mean and Spread. **Journal of Hydrometeorology**, 2008.

ZHENG, Y.; FAN, L. Moving object detection based on running average background and temporal difference. **Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering, ISKE 2010**, p. 270–272, 2010.