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

Relatório 3/5 - Impactos das Variações e Mudanças Climáticas sobre o regime de ventos extremos

Francisco Lima

Por ordem do Ministério Federal do Meio Ambiente, Proteção da Natureza e Segurança Nuclear da República Federal da Alemanha
Por meio da giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
INPE
DEFESA CIVIL SANTA CATARINA
Eletrobras Eletrosul
MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
PÁTRIA AMADA BRASIL GOVERNO FEDERAL

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 Madruga

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 Maffezzolli
Márcio 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

Brasília, Janeiro de 2020

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS 2

LISTA DE TABELAS 4

1. INTRODUÇÃO 5

1.1. Objetivos 6

1.2. Atividades 7

2. MATERIA E MÉTODO 7

2.1. Metodologia 7

2.2. Área de Estudo e Dados Observacionais 8

2.3. O Modelo Regional Eta-HadGEM2-ES 9

2.5. Distribuição de Probabilidade de Frequência das Séries de Vento Máximo 12

2.5.1. Distribuição de Gumbel 13

2.5.2. Distribuição GEV 13

2.5.3. Distribuição Weibull 15

2.6. Período de Retorno – T 16

2.7. Análise de Tendência - Teste de Kendall 17

3. RESULTADOS 20

3.1. Resultado das Avaliação do Modelo Eta-HadGEM2-ES 20

3.3. Resultados Distribuição de Frequência 26

3.4. Resultados do Período de retorno – T 32

3.5. Análise Espacial do Período de Retorno de 50 anos com as Distribuições GEV, Weibull e Gumbel 35

3.6. Resultado do Teste de Tendência para as Linha de Transmissão de Ita - Salto Santiago e Biguaçu - Blumenau. 38

4. CONCLUSÕES 41

5. DISCUSSÕES SOBRE OS ANEXOS AO PRODUTO 42

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudo e a localização das estações automáticas do INMET e METAR. 9

Figura 2. Exemplo do método QMAPP para a remoção do erro sistemático do modelo Eta-HadGEM2-ES para o máximo diário da velocidade do vento a 10m de altura da superfície. 11

Figura 3. Distribuições de probabilidade de frequência e probabilidade acumulada dos dados medidos e do modelo Eta, período histórico, para a velocidade do vento a 10m de altura. Para as estações a) Florianópolis, b) Indaial, c) Dionísio Cerqueira e d) Caçador..... 22

Figura 4. Distribuições de probabilidade acumulada dos dados medidos, do modelo Eta, do modelo Eta corrigido pelo método QMAPP para a velocidade do vento a 10m de altura. Para as estações a) Florianópolis, b) Indaial, c) Dionísio Cerqueira e d) Caçador..... 24

Figura 5. Distribuições de probabilidade de frequência e probabilidade acumulada dos dados medidos e do modelo Eta corrigido pelo método QMAPP, período histórico, para a velocidade do vento a 10m de altura. Para as estações a) Florianópolis, b) Indaial, c) Dionísio Cerqueira e d) Caçador. 26

Figura 6. Distribuições de Weibull, GEV e Gumbel ajustada para a velocidade máxima diária do vento simulado pelo modelo Eta. Para as estações a) Florianópolis, b) Indaial, c) Dionísio Cerqueira e d) Caçador.....28

Figura 7. Distribuições de Weibull, GEV e Gumbel ajustada para a velocidade máxima anual do vento simulado pelo modelo Eta. Para as estações a) Florianópolis, b) Indaial, c) Dionísio Cerqueira e d) Caçador.....31

Figura 8. Período de retorno da velocidade máxima anual do vento para as simulações do período histórico do modelo Eta. Para as estações a) Florianópolis, b) Indaial, c) Dionísio Cerqueira e d) Caçador..... 34

Figura 9. Período de retorno da velocidade máxima anual do vento para as simulações do período histórico do modelo Eta (Distribuição GEV)... 36
Figura 10. Período de retorno da velocidade máxima anual do vento para as simulações do período histórico do modelo Eta (Distribuição Gumbel). 37
Figura 11. Período de retorno da velocidade máxima anual do vento para as simulações do período histórico do modelo Eta (Distribuição Weibull). 37
Figura 12. Período de retorno da velocidade básica do vento segundo a NBR 5422. 38
Figura 13. Velocidade média do vento para o máximo anual simulado pelo modelo Eta. 39
Figura 14. Variabilidade dos valores máximos anuais de velocidade do vento (m/s) para as linhas de transmissão de (a) Ita Salto Santiago e (b) Biguaçu Blumenau, apresentando o valor máximo anual, a inclinação e magnitude da tendência pelo método Sen, significância estáticas. 40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores dos parâmetros de distribuição, GEV, WEIBULL e GUMBEL das séries temporais de velocidade máxima diária do vento a 10m, onde k é o parâmetro de forma, β é o parâmetro de escala, a é o parâmetro de posição..... 29

Tabela 2. Valores dos parâmetros de distribuição, GEV, WEIBULL e GUMBEL das séries temporais de velocidade máxima anual do vento a 10m, onde k é o parâmetro de forma, β é o parâmetro de escala, a é o parâmetro de posição..... 32

Tabela 3. Período de retorno da velocidade máxima anual do vento simulado pelo modelo Eta..... 35

1. INTRODUÇÃO

Estudos têm sido desenvolvidos para a identificação dos regimes de ventos, focados na sua variabilidade e em sua caracterização. No Brasil, estes estudos são focados principalmente nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste. Quanto a sua magnitude, é importante mencionar que ventos extremos de grande magnitude impactam na produção eólica, nas linhas de transmissão de energia, dentre outras, podendo causar desgaste prematuro e danos estruturais. Assim sendo, também é fundamental identificar as características dos ventos extremos, tais como distribuição de frequência, valores máximos de vento, período de retorno, entre outras características, fornecendo aos tomadores de decisão mais subsídio para o planejamento estratégico referente à geração e distribuição de energia elétrica.

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.

Alguns trabalhos científicos publicados recentemente sugerem que devido às Mudanças Climáticas Globais (GILLILAND; KEIM, 2018; MARTINS; PEREIRA, 2011; PES et al., 2017), o regime dos ventos de algumas regiões pode sofrer variações. Especificamente sobre eventos extremos de vento, Pes et al., (2017) que mostra indícios de alterações na frequência de ocorrência com base na avaliação de simulações de 45 anos para modelo Eta. Desta forma, a motivação para este relatório é quais as regiões de Santa Catarina que possuem a maior incidência de ventos extremos máximos e qual o período de retorno desses eventos? Estão

ocorrendo ou ocorrerão mudanças na magnitude do vento máximo em detrimento das Mudanças Climáticas Globais.

Conhecer o regime de ventos extremos é um dos fatores a serem estudados, identificando a magnitude e frequência com que esses eventos ocorrem. Identificar as características dos ventos extremos possibilita aos tomadores de decisão e administradores das linhas de transmissão mais subsídio para o planejamento de infraestruturas. Além disso, existem outras áreas de aplicações que dependem dessas informações, tais como engenharia civil, agricultura, aeroportos, defesa civil entre outras (DUKES; PALUTIKOF, 1995; GONÇALVES, 2007).

1.1. Objetivos

O objetivo deste relatório é a análise dos resultados provenientes dos valores extremos de vento para períodos de retorno de 50 anos obtidos a partir de rodadas históricas de modelos climáticos regionalizados (HadGEM2-ES) corrigidas por observações de superfície, ou seja, estudar a ocorrência de ventos extremos máximos próximos à superfície, utilizando séries climatológicas de dados de vento do modelo Eta para identificar as características dos ventos extremos em Santa Catarina, na Região Sul do Brasil, a fim de gerar conhecimento que auxilie no planejamento de projetos em linhas de transmissão.

A justificativa para a análise de ventos extremo usando modelos atmosféricos é a baixa densidade de dados de ventos observados no Brasil, em especial no Estado de Santa Catarina. Isto permite definir posteriormente o quanto o clima futuro afetaria as linhas aérea de transmissão de energia elétrica; para detalhar os critérios de severidade de vento que devem ser usados para garantir a segurança das edificações e das torres de distribuições de energia, em complemento aos requisitos impostos pelas normas técnicas brasileira.

1.2. Atividades

Este relatório envolve as seguintes etapas de execução:

- Avaliação do modelo Eta em comparação aos dados medidos do INMET e METAR;
- Calculo dos parâmetros das distribuições de frequências a partir dos dados do modelo Eta e comparado com os dados observados do *Meteorological Aerodrome Report* - METAR e Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. Bem como alguns dados do Departamento de Controle do Espaço Aéreo – DECEA, que seriam o mesmo METAR, porém com períodos de dados maiores e de melhor qualidade;
- Obtenção dos valores extremos máximos de vento para períodos de retorno de 25 e 50 anos a partir do modelo Eta, corrigidos pelas medições, representativos para o estado de Santa Catarina.
- Cálculo das tendências do vento extremo máximo em cima das linhas de transmissões de Itá – Salto Santiago (oeste) e Biguaçu – Blumenau (litoral).

2. MATERIA E MÉTODO

2.1. Metodologia

Para o estudo de ventos extremos, serão utilizadas séries vento em superfície, ao nível de 10 metros de altura, do período histórico do modelo Eta compreendendo quarenta e cinco anos, entre 1961 e 2005. Esses dados foram validados em estações meteorológicas do METAR, no aeroporto de Florianópolis, e em alguns aeroportos próximo a Santa Catarina. Bem como estações meteorológicas no Instituto Nacional de Meteorologia – INMET.

Este relatório é a segunda parte desse trabalho e compreende o estudo detalhado dos ventos extremos em superfície, a partir de dados de modelos numéricos. Incluindo a validação do modelo com as estações observacionais e aplicação das distribuições de probabilidade de ventos extremos para os períodos de retorno de 25 e 50 anos obtidos do modelo Eta. Foi feito a análise das distribuições de probabilidade de ventos extremos. Para isso, foram utilizadas as distribuições GEV, Gumbel e Weibull escolhidas com base nas bibliografias consultadas.

Para estudar as tendências climáticas nas séries de dados, isto é, buscar identificar nas longas séries de dados aumentos ou diminuições da velocidade do vento, será utilizado um teste não paramétrico denominado Teste de Mann-Kendall (SNEYERS, 1990). Este teste é o mais adequado para identificar mudanças climáticas a partir de séries observacionais (GOOSSENS; BERGER, 1986). Esta análise poderia identificar tendências relativas às mudanças climáticas, confirmando o que alguns modelos climáticos vêm apontando

2.2. Área de Estudo e Dados Observacionais

Na região Sul e Sudeste o regime dos ventos próximos a 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 que podem influenciar nos perfis de vento em superfície, 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 a serem utilizados nesse trabalho são dados pertencentes ao Instituto de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). A localização das estações utilizadas pode ser verificada na Figura 1.

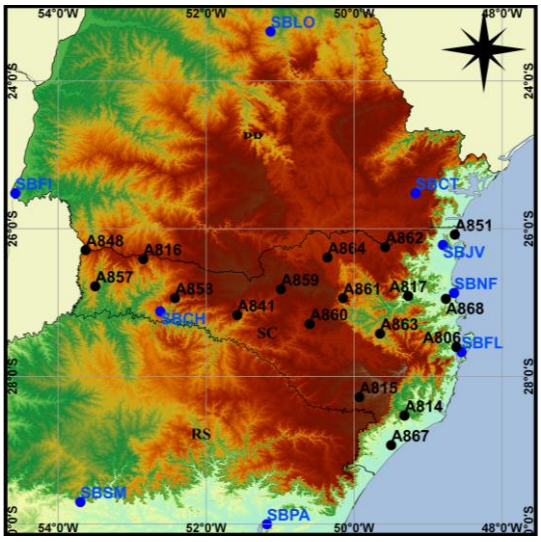


Figura 1. Área de estudo e a localização das estações automáticas do INMET e METAR.

2.3. O Modelo Regional Eta-HadGEM2-ES

Os dados de modelo são provenientes do modelo regional Eta o qual foi configurado e integrado com as condições de contorno fornecidas pelo modelo global HadGEM2-ES do UK Met Office Hadley Centre.

Dessa forma, o modelo Eta é modificado para realizar integrações decadais de longo tempo e reproduzir o clima entre 1961 e 2005, clima presente, (CHOU et al., 2012; PESQUERO et al., 2010). O modelo Eta foi configurado para o prazo de integração de 45 anos e gerou séries temporais com frequência de saída de três horas. A resolução horizontal é de 20 km (CHOU et al., 2012, 2014a, 2014b; LYRA et al., 2018). O modelo Eta possui representação complexa dos processos físicos e dinâmico da atmosfera. Esse modelo foi desenvolvido pela Universidade de Belgrado

em conjunto com o Instituto de Hidrometeorologico da Iugoslávia (MESINGER et al., 1988). Estas simulações e projeções do clima futuro foram utilizadas pelo (MCTI - MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, 2016) e têm sido usadas para dar suporte em diversos estudos de impactos no Brasil (TAVARES et al., 2018; VIOLA et al., 2015). A versão do modelo utilizado na realização deste relatório consiste do Eta alimentado pelo modelo climático global HadGem2-ES, na resolução de 20 km. A escolha do modelo HadGEM2-ES foi por apresentar boa representação das condições sobre a América do Sul. O modelo representa de maneira satisfatória a variabilidade do clima presente dos campos de precipitação, temperatura e ventos sobre a América do Sul (CAVALCANTI; SHIMIZU, 2012).

2.4. Remoção de Viés do modelo Eta-HadGEM2-ES

O modelo Eta possui um conhecido viés na simulação da velocidade do vento, causados pelas simplificações do modelo e das parametrizações dos processos atmosféricos e das condições iniciais, que resultam erros sistemáticos. Para estimativas de vento estes erros são tipicamente mais altos que os observados em estações meteorológicas. Este foi um dos fatores que motivaram esta seção, uma vez que, refinamentos e a obtenção de simulações com menores erros são necessários para diversas aplicações, portanto, os dados de velocidade de vento foram corrigidas 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).

A fim de ajustar adequadamente a saída do Eta-HadGEM2-ES para os máximos diários, assegurando a variabilidade diária e interanual realista, implementou-se a abordagem de *Quantile Mapping* (QMAPP). A técnica de QMAPP remove o viés nas simulações do Eta-HadGEM2-ES. Como todas as abordagens de refinamento estatístico, assume-se que o

viés nas simulações histórica serão constantes também no período de projeção (THRASHER et al., 2012).

O princípio do método consiste na utilização da função de distribuição acumulada de velocidade do vento para identificar a diferença sistemática entre os ventos observados e simulados para cada intervalo de probabilidade dentro de um determinado período no clima passado, e posteriormente, corrigir estas diferenças na velocidade do vento das projeções climáticas. Como as distribuições têm tamanhos diferentes (devido ao período mais curto dos dados observados) a CDF (*Cumulative Distribuition Function*) dos dados medidos foram extrapolados para o tamanho da CDF dos dados modelos. E a partir das CDFs foi feito a correção do viés, usando as diferenças entre as duas distribuições, usando algumas estações em superfície como referência.

A Figura 2 mostra um exemplo para uma estação específica, onde os máximos diários para cada mês foram corrigidos. Pode-se observar que o modelo Eta (linha azul) tende a superestimar os dados máximos diários observados (linha cinza), em todos os meses. A linha vermelha tracejada mostra a correção do modelo usando o método do QMAPP descrito em (BROCCA et al., 2011), que tende a reduzir significativamente o erro sistemático inerente no modelo Eta-HadGEM2-ES.

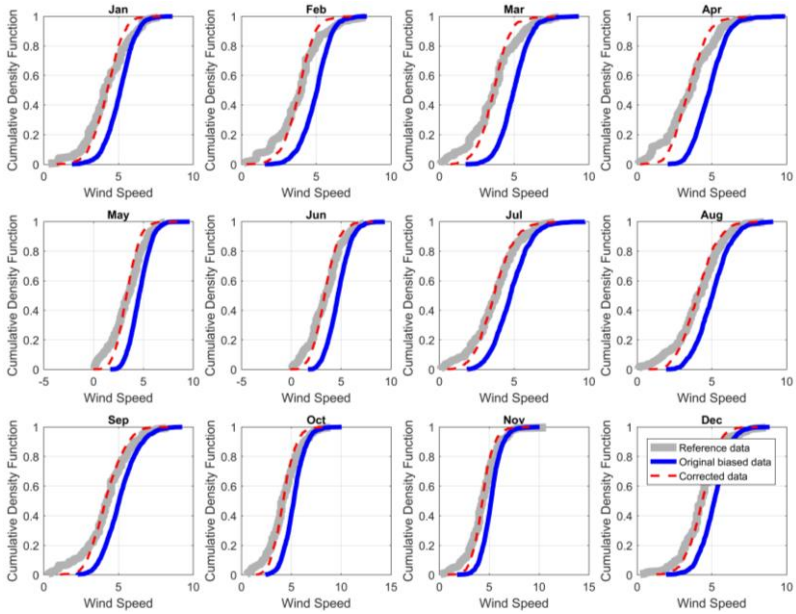


Figura 2. Exemplo do método QMAPP para a remoção do erro sistemático do modelo Eta-HadGEM2-ES para o máximo diário da velocidade do vento a 10m de altura da superfície.

2.5. 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 sobre 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; 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, 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 simulados pelo modelo Eta-HadGEM2-ES e comparado com os dados observados das estações meteorológicas do INMET, METAR e 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).

2.5.1. Distribuição de Gumbel

A distribuição de Gumbel pode ser descrita como uma função de densidade de probabilidade, da seguinte forma:

$$f(x) = \frac{1}{\beta} e^{-\frac{x-\propto}{\beta}} e^{-e^{-\frac{x-\alpha}{\beta}}} \quad (01)$$

e a função cumulativa de probabilidade (CDF) é dada por

$$F(x) = e^{-e^{\pm\frac{x-\alpha}{\beta}}} \quad (02)$$

$$X(F) = \alpha - \beta ln(-lnF) \quad (03)$$

onde a e β são os parâmetros de posição e escala, respectivamente. O sinal de mais e menos no segundo expoente é referente aos sinais de máximo (positivo) e mínimo (negativo) dos valores extremos.

2.5.2. Distribuição GEV

A distribuição de probabilidade generalizada de valores extremos (GEV) foi introduzida por (JENKINSON, 1955). Esse método combina os três possíveis tipos de distribuição de valores extremos em uma única forma, vem sendo utilizada para representar a distribuição de valores extremos em diferentes campos principalmente para modelar uma extensa variedade de extremos naturais, como cheias, chuvas, velocidade do vento, temperaturas e outros extremos (QUEIROZ; CHAUDHRY, 2006).

Segundo (SANSIGOLO, 2008a) a teoria GEV, fundamental para a modelagem de eventos extremos, foi desenvolvida por Fisher e Tippett, (1928), que definiram os três tipos possíveis de distribuições assintóticas de

valores extremos, conhecidas como de Gumbel (Tipo I), Fréchet (Tipo II) e Weibull (Tipo III), casos especiais da Distribuição Generalizada de Valores.

$$F(x) = exp\left[-\left(1 - k\frac{x-\propto}{\beta}\right)^{\frac{1}{k}}\right] \text{ para } k \neq 0 \quad (04)$$

$$F(x) = exp\left[-exp\left(-\frac{x-\propto}{\beta}\right)\right] \text{ para } k \equiv 0 \quad (05)$$

sendo,

$-\infty < x < +\infty, k = 0$ Distribuição tipo I (Gumbel)

$\varepsilon \leq x < +\infty, k < 0$ Distribuição Tipo II (Fréchet)

$-\infty < x \leq \omega, k > 0$ Distribuição Tipo III (Weibull)

A distribuição generalizada de valores extremos (GEV) de três parâmetros: *a* parâmetro de posição com $-\infty < \alpha < +\infty$, β parâmetro de escala com $0 < \beta < +\infty$ e *k* parâmetro de forma com $-\infty < k < +\infty$. Quando $k > 0$, o limite superior da distribuição assintótica Tipo III torna-se $\omega = \alpha + \frac{\beta}{k}$, e quando $k < 0$ o limite inferior da distribuição assintótica Tipo II torna-se $\varepsilon = \alpha + \frac{\beta}{k}$.

O p-ésimo quantil da distribuição GEV é dado pela seguinte relação, decorrente da Equação 01:

$$X(F) = \alpha + \frac{\beta}{k}\left[1 - \left(-ln(p)\right)^{k}\right], 0 < p < 1 \quad (06)$$

Combinando a distribuição de Gumbel com a sua variável reduzida z (DE QUADROS; DE QUEIROZ; BOAS, 2011), temos:

$$z = \frac{(x-\alpha)}{\beta} \tag{07}$$

Obtendo-se $F(x) = exp[-exp(-z)]$ que resulta na equação:

$$z = ln\left[-ln\left(F(x)\right)\right] \tag{08}$$

Assim a Função 05 pode ser usada para definir z com respeito às distribuições Tipo I, II e III. Em um gráfico de intensidade *z versus* x, pode-se observar o comportamento das três formas de distribuição de valores extremos.

2.5.3. Distribuição Weibull

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). Essa distribuição fornece dois parâmetros denominados parâmetro de forma *k* e um fator de escala β.

A partir dos dados de velocidade do vento são determinados histogramas expressando as frequências de ocorrência de cada faixa de velocidade. Os histogramas permitem estimar o potencial de geração de energia do sítio eólico. A forma geral para a distribuição de Weibull é a seguinte:

$$f(x) = \frac{k}{\beta}\left(\frac{x}{\beta}\right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{k}} \tag{09}$$

e sua forma como função de densidade de probabilidade acumulada é dada por:

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left\{\frac{(x-\alpha)}{\beta}\right\}^{k}\right],\ \alpha \leq x < \infty \tag{10}$$

O quantil da distribuição de Weibull é dado por:

$$X(F) = \alpha + \beta[-\ln(1-F)]^{\frac{1}{k}} \tag{11}$$

Onde x representa a velocidade do vento. Os fatores de escala β e o de forma *k* são os parâmetros que estão relacionados, respectivamente à velocidade média do vento e à forma da curva (MARTINS; GUARNIERI; PEREIRA, 2008).

2.6. 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:

$$T(x) = \frac{1}{1-P(x)} \quad (12)$$

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

2.7. 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, 1948a) 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; 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, 1948b) 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:

$$Z = \begin{cases} \dfrac{S-1}{\sqrt{VAR(S)}} & se \quad S > 0 \\ 0 & se \quad S = 0 \\ \dfrac{S+1}{VAR(S)} & se \quad S < 0 \end{cases} \tag{13}$$

em que,

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^{n} sign(x_j - x_k) \tag{14}$$

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:

$$VAR(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \tag{15}$$

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

$$VAR(S) = \frac{1}{18}[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^{g}(t_p - 1)(2t_p + 5)] \tag{16}$$

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:

$$f(t) = Qt - B \tag{17}$$

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:

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \tag{18}$$

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

$Q = Q_{[(N+1)/2]}$, se *N* for impar e

$$Q = \frac{1}{2}(Q_{[N/2]} + Q_{[(N+2)/2]}) \text{, se } N \text{ for par.} \tag{19}$$

Para obter uma estimativa de *B* na Equação 5, são considerados *n* valores da diferença x_i-Q_{ti}. Alguns trabalhos apresentam resultados utilizando os métodos de Mann-Kendall e da estimativa de inclinação Sen (SANTOS et al., 2017; FAN; WANG, [s.d.]; SILVA; DERECZYNSKI, 2014).

3. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados da comparação entre os dados observados e o modelo Eta-HadGEM2-ES. Verificado o erro sistemático do modelo, uma técnica de remoção de viés foi utilizada para a remoção do erro inerente no modelo. Em seguida, são apresentadas as distribuições de frequência de probabilidade do vento observado a 10m, bem como o ajuste dos modelos de distribuição para escolher aquele que melhor representa a distribuição de frequência de cada série temporal, usando o modelo Eta-HadGEM2-ES. Identificado o melhor ajuste de distribuição do vento, calcula-se com base nesse modelo, o período de retorno dos máximos de velocidade do vento com um nível de confiança de 95%.

3.1. Resultado das Avaliação do Modelo Eta-HadGEM2-ES

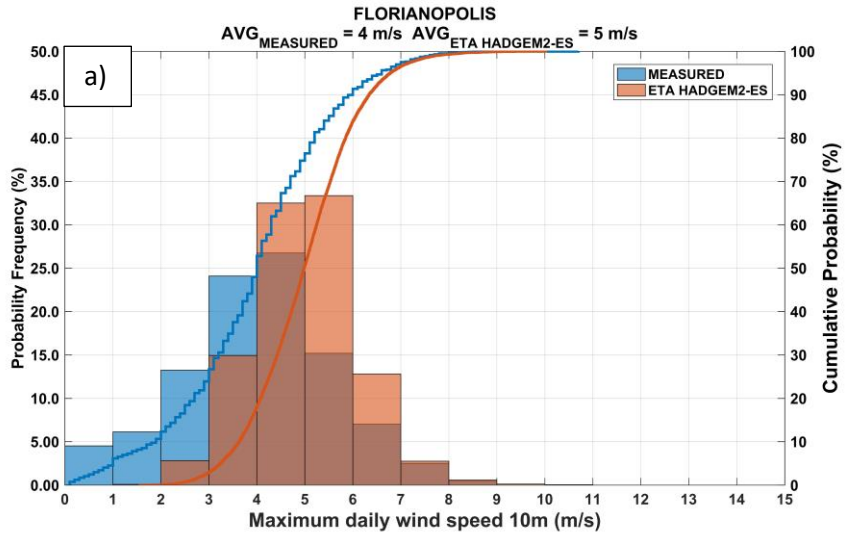
Neste tópico são mostrados os resultados obtidos pela comparação entre as simulações e medidas de velocidade de vento a 10 metros de altura. Uma avaliação das simulações do período histórico do modelo Eta-HadGEM2-ES, a partir de agora chamado apenas de Eta, é apresentada juntamente com uma descrição das distribuições de frequência e discussões sobre os erros.

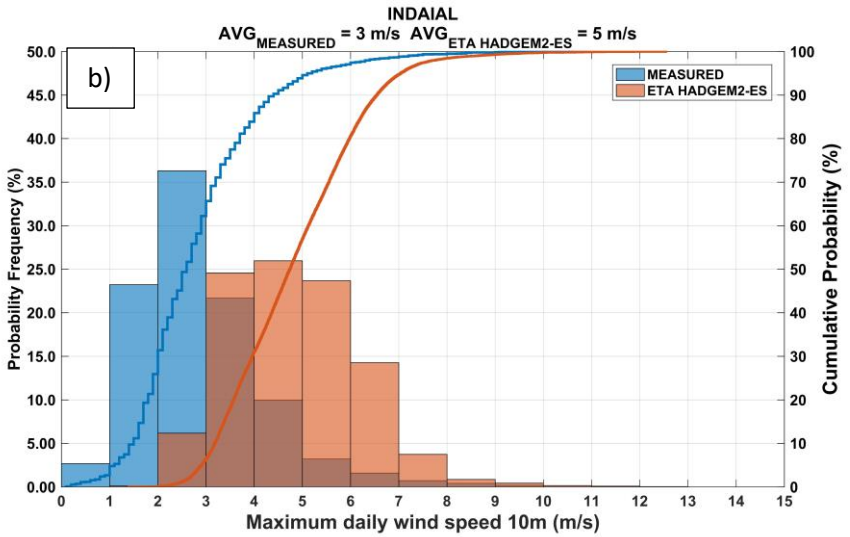
O modelo Eta foi avaliado contra dados observacionais. Como mencionado nos capítulos anteriores, os modelos numéricos possuem um significativo viés na simulação de velocidade do vento, com isso a correção de simulações é necessária para diversas aplicações.

Nas figuras de distribuição de probabilidade de frequência e acumulada são apresentadas as comparações entre as duas distribuições, a medida e a simulada, em que o modelo Eta (laranja) é comparado com as observações (azuis). Nos gráficos são mostrados os

máximos diários para algumas estações, as demais estações constam em anexo a este relatório.

Por meio da Figura 3 verifica-se que o modelo Eta tende a superestimar os dados medidos para as estações analisadas. Observa-se ainda que, apesar de o modelo apresentar, em geral um viés elevado, há uma concordância maior nas estações de Florianópolis e Dionísio Cerqueira. Porém, houve um alto viés em Indaial e Caçador. Verifica-se que em todas as estações o modelo superestima a intensidade do vento, embora se observe uma boa concordância nas dispersões observadas e simulada.





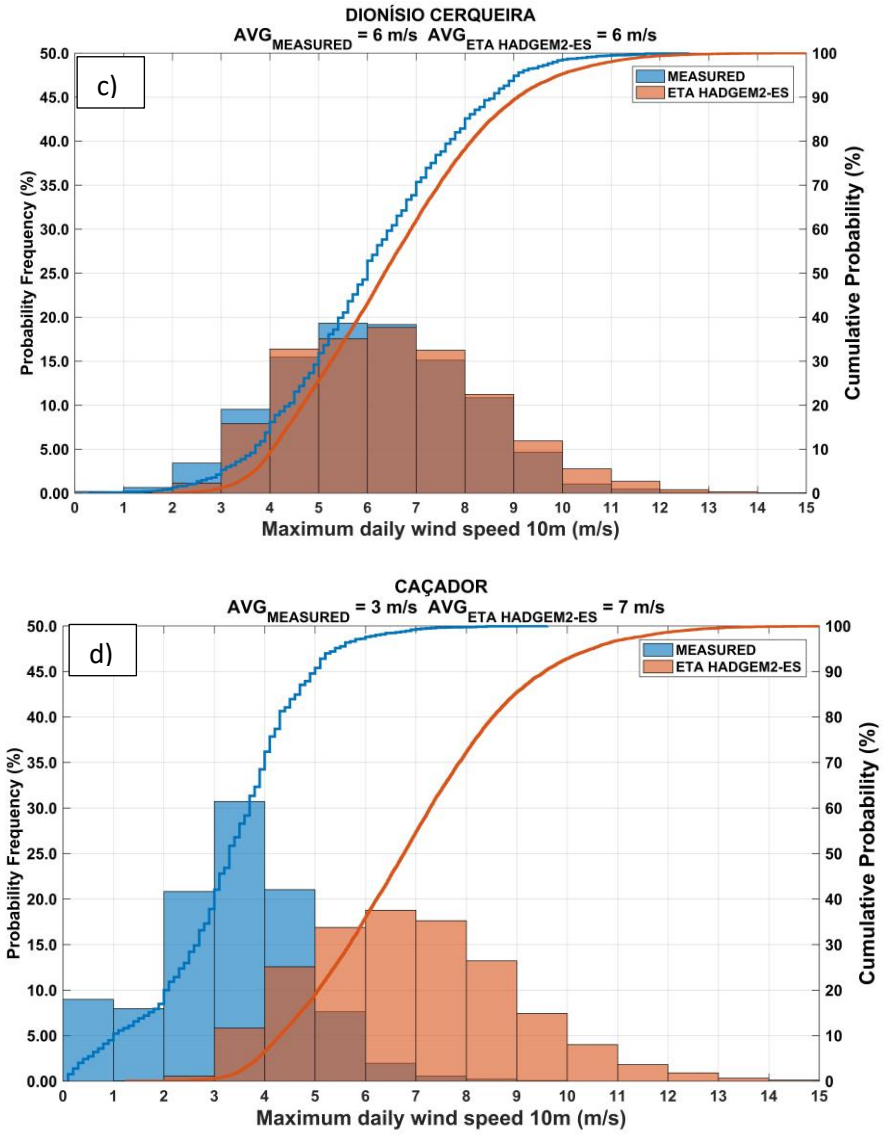
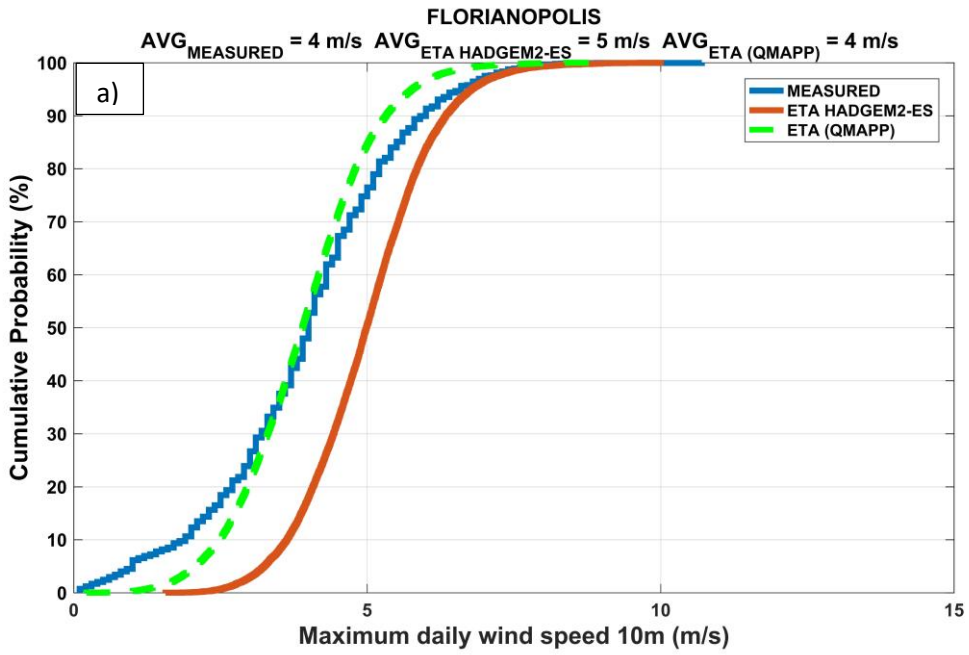


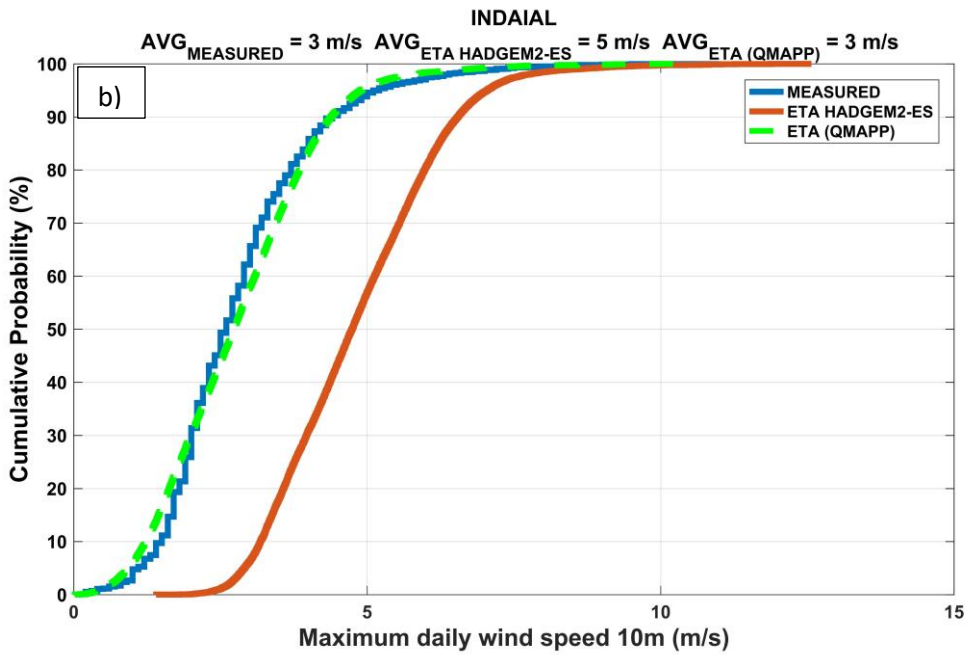
Figura 3. Distribuições de probabilidade de frequência e probabilidade acumulada dos dados medidos e do modelo Eta, período histórico, para a velocidade do vento a 10m de altura. Para as estações a) Florianópolis, b) Indaial, c) Dionísio Cerqueira e d) Caçador.

3.2. Resultados da correção do viés do modelo Eta

Verificou-se em todas as estações que o método QMAPP apresenta uma redução do erro sistemático das saídas originais de velocidade do vendo no modelo Eta. Na Figura 4, pode-se analisar as probabilidades acumuladas dos dados medidos (em azul), do modelo Eta (em laranja) e da correção QMAPP usada neste trabalho, (linha tracejada em verde). Observa-se que a correção reduziu

significativamente o erro do modelo, aproximando os dados do modelo Eta, aos dados observados nas estações. As médias das 3 distribuições podem ser vista na parte superior da figura. Destaca-se que os gráficos das demais estações estão em anexo. Observou-se que o método foi expressivamente satisfatório na tarefa de redução do viés das simulações de velocidade do vento do modelo Eta.





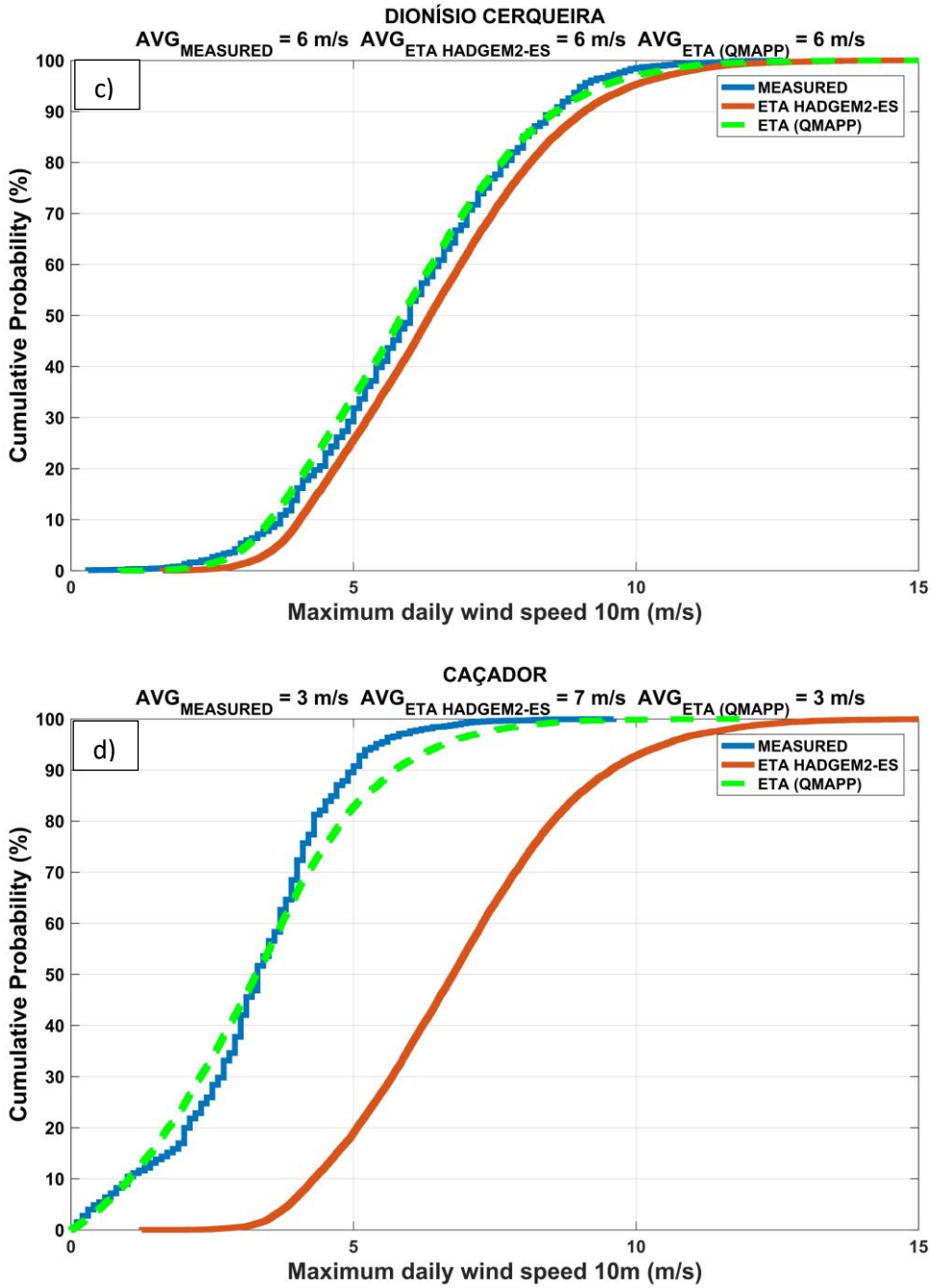
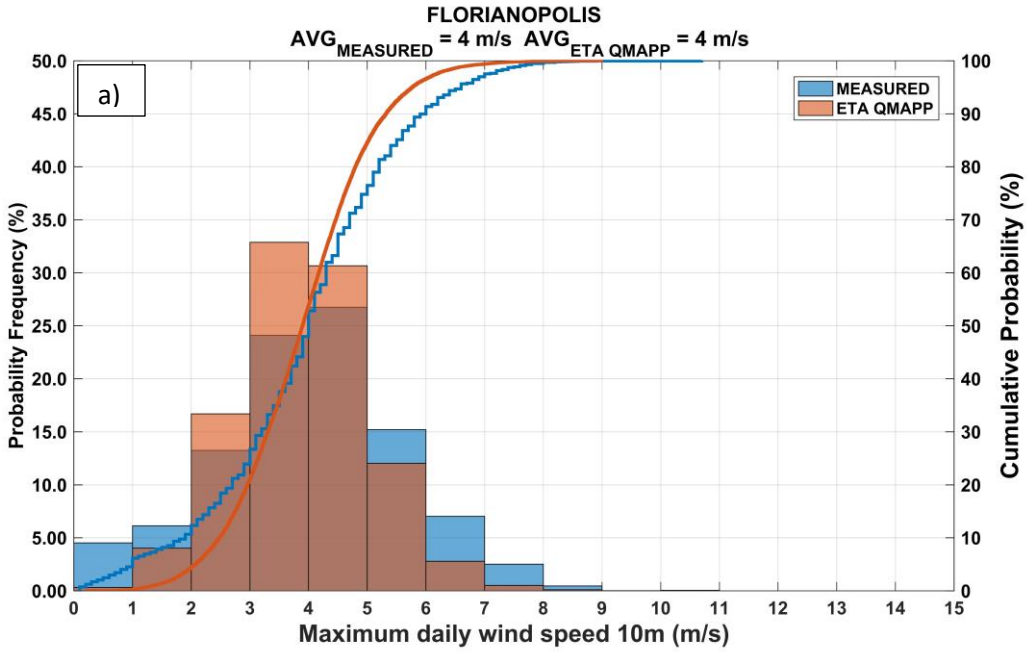
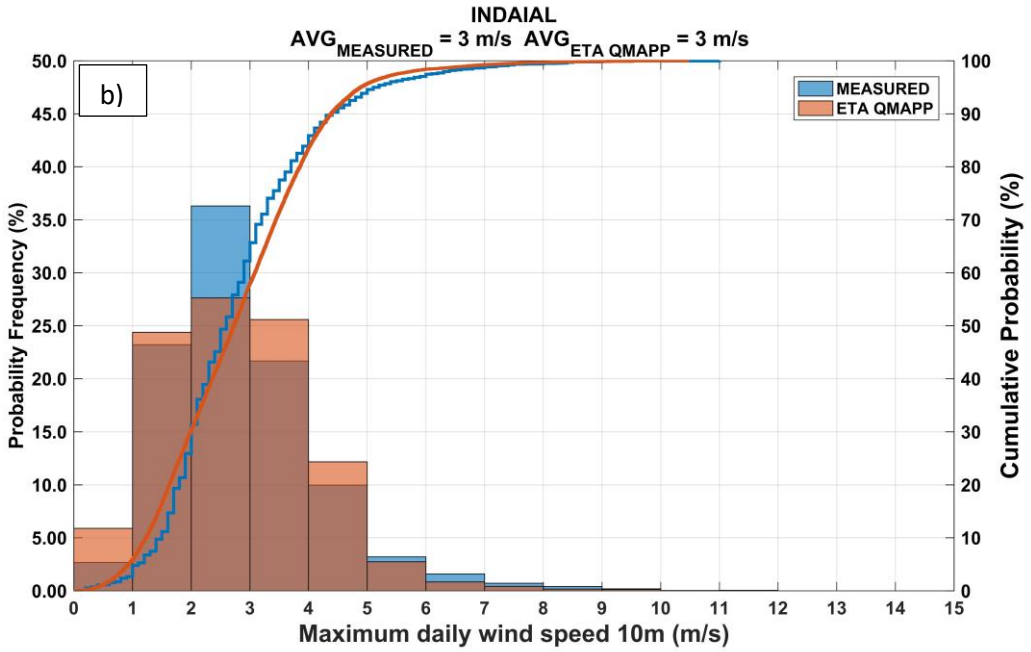


Figura 4. Distribuições de probabilidade acumulada dos dados medidos, do modelo Eta, do modelo Eta corrigido pelo método QMAPP para a velocidade do vento a 10m de altura. Para as estações a) Florianópolis, b) Indaial, c) Dionísio Cerqueira e d) Caçador.

A Figura 5 apresenta uma comparação entre o modelo Eta corrigido e os dados medidos. Nota-se, que o modelo Eta corrigido pele método QMAPP tende a concordar com os dados medidos para as estações da figura abaixo. O mesmo ocorre com as demais estações que

estão no arquivo anexo ao relatório. Observa-se ainda que o modelo Eta-QMAPP apresentou médias iguais aos dados medidos, porém com dispersões ligeiramente diferentes.





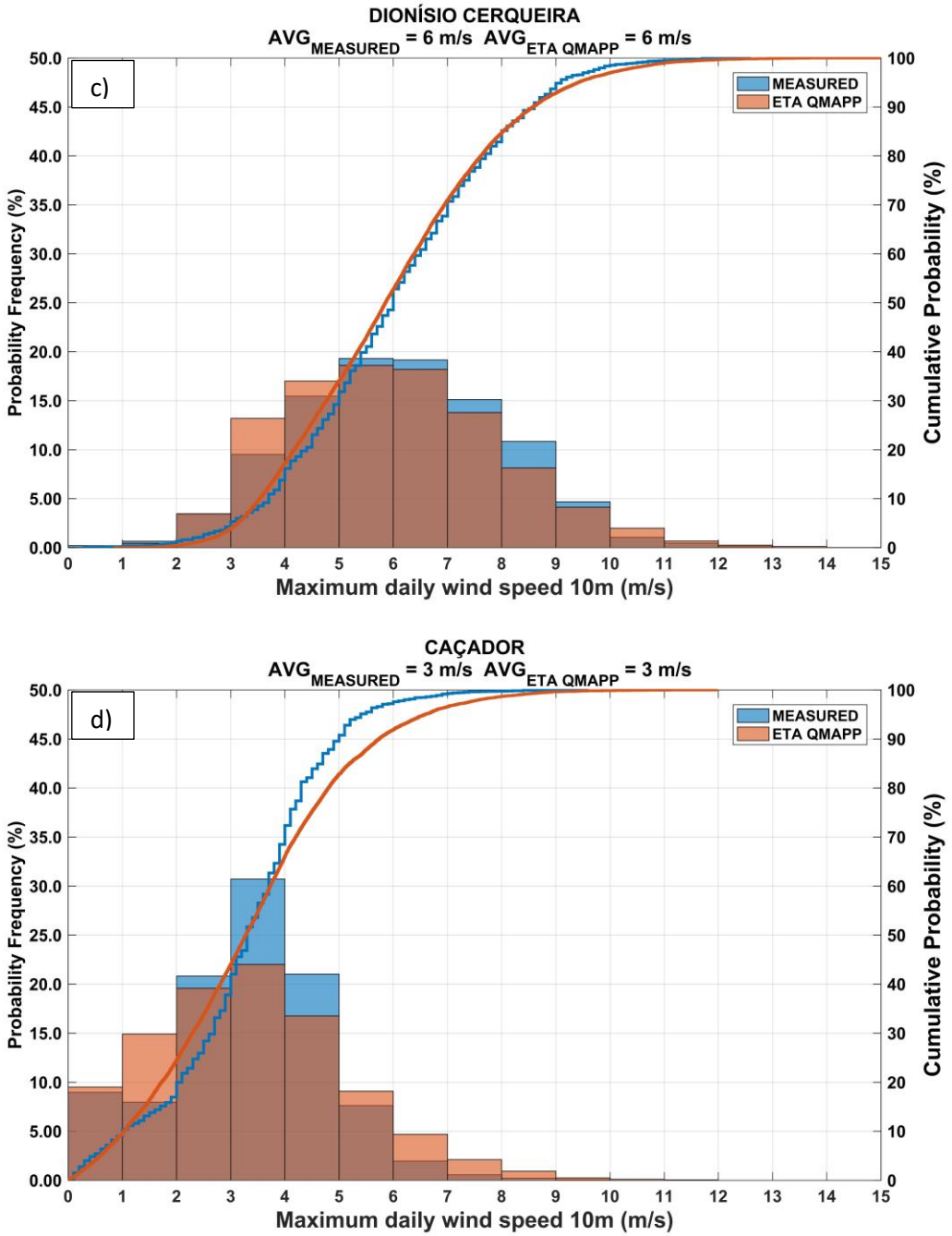


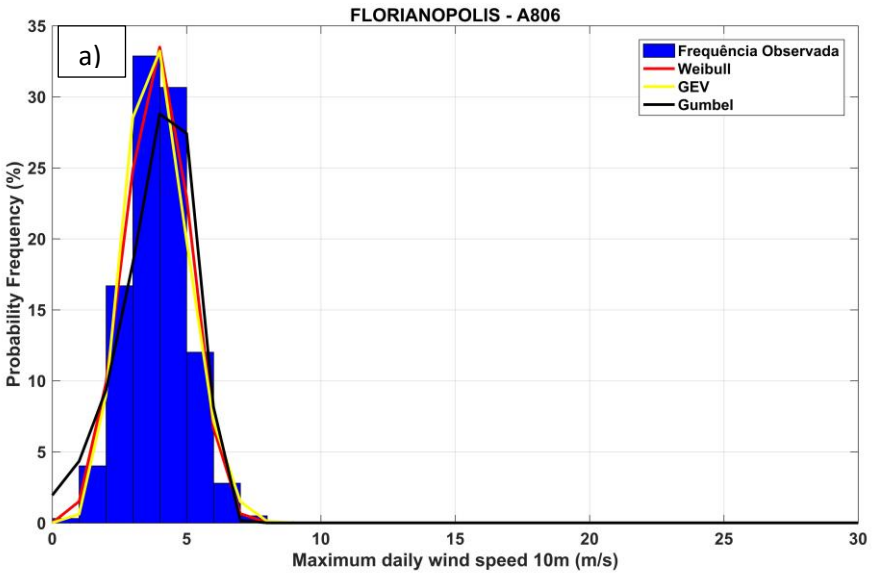
Figura 5. Distribuições de probabilidade de frequência e probabilidade acumulada dos dados medidos e do modelo Eta corrigido pelo método QMAPP, período histórico, para a velocidade do vento a 10m de altura. Para as estações a) Florianópolis, b) Indaial, c) Dionísio Cerqueira e d) Caçador.

3.3. Resultados Distribuição de Frequência

A análise de extremos foi desenvolvida a partir dos métodos de distribuição de Gumbel, GEV e Weibull, descritos na metodologia deste

relatório. Em todos os casos, os parâmetros das distribuições foram estimados com um intervalo de confiança de 95%. Nesta seção, são apresentadas as distribuições de extremos por estações. Os histogramas das séries estão nas figuras a seguir. Como este projeto será desenvolvido com os valores extremos, foi calculado o valor máximo diário ao longo das séries, para verificar qual a melhor distribuição para os valores máximos de velocidade do vento.

A Figura 6 representa as distribuições das séries de velocidade máxima diária do vento a 10m para as simulações do modelo Eta corrigido e analisadas na mesma localização das estações do INMET e METAR. Nessas distribuições podemos identificar uma concordância entre as séries de Weibull e GEV e uma menor concordância entre a Gumbel. Vários trabalhos citados na literatura (ANGELI SANSIGOLO, 2005; SANSIGOLO, 2008b; SILVA et al., 2002; VAN DER AUWERA; DE MEYER; MALET, 1980) argumentam que a distribuição de Weibull é a que melhor se ajusta aos dados de vento, porém, neste trabalho, pode-se dizer que a distribuição GEV também se ajusta adequadamente aos dados de velocidade do vento.



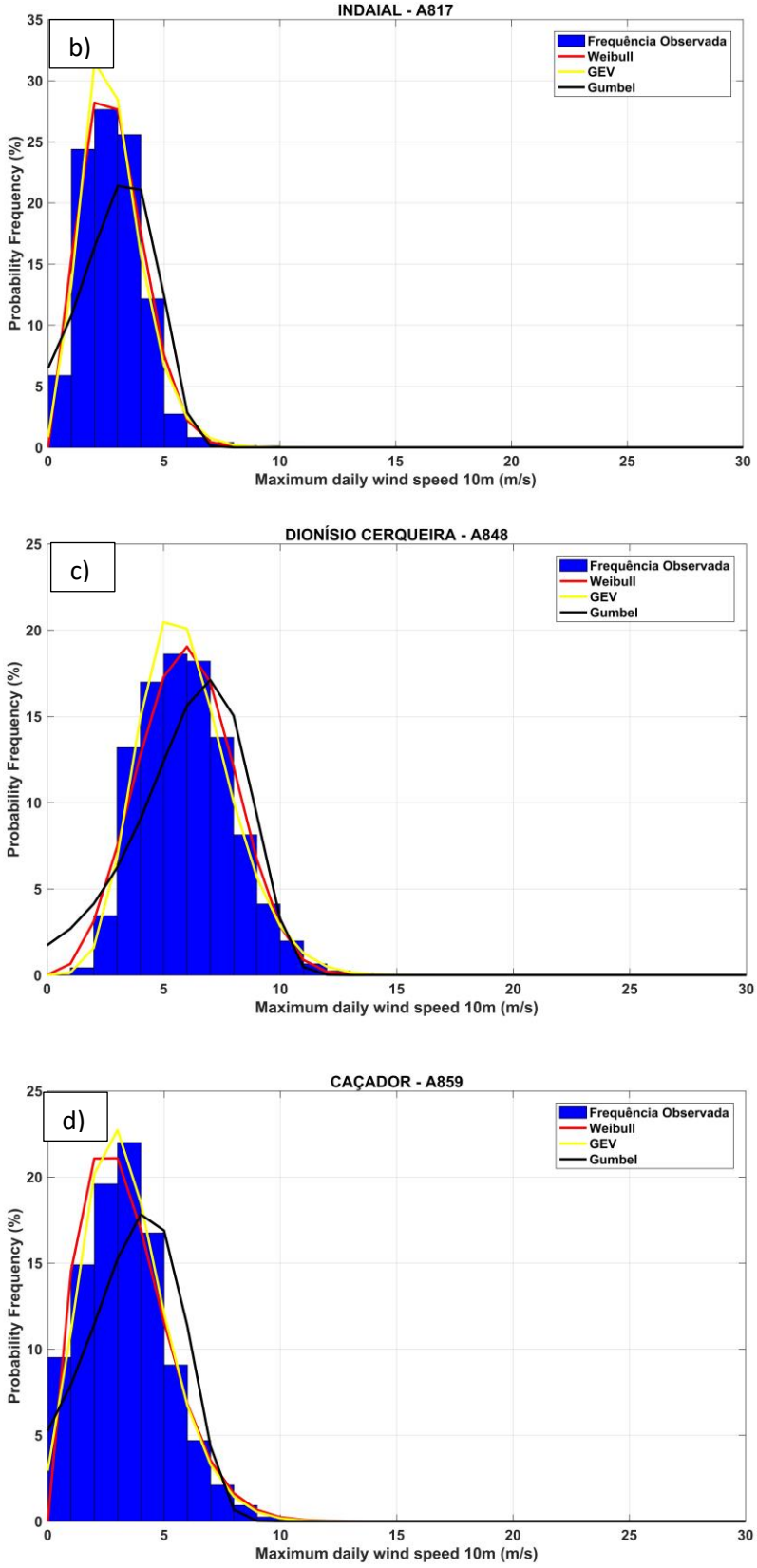


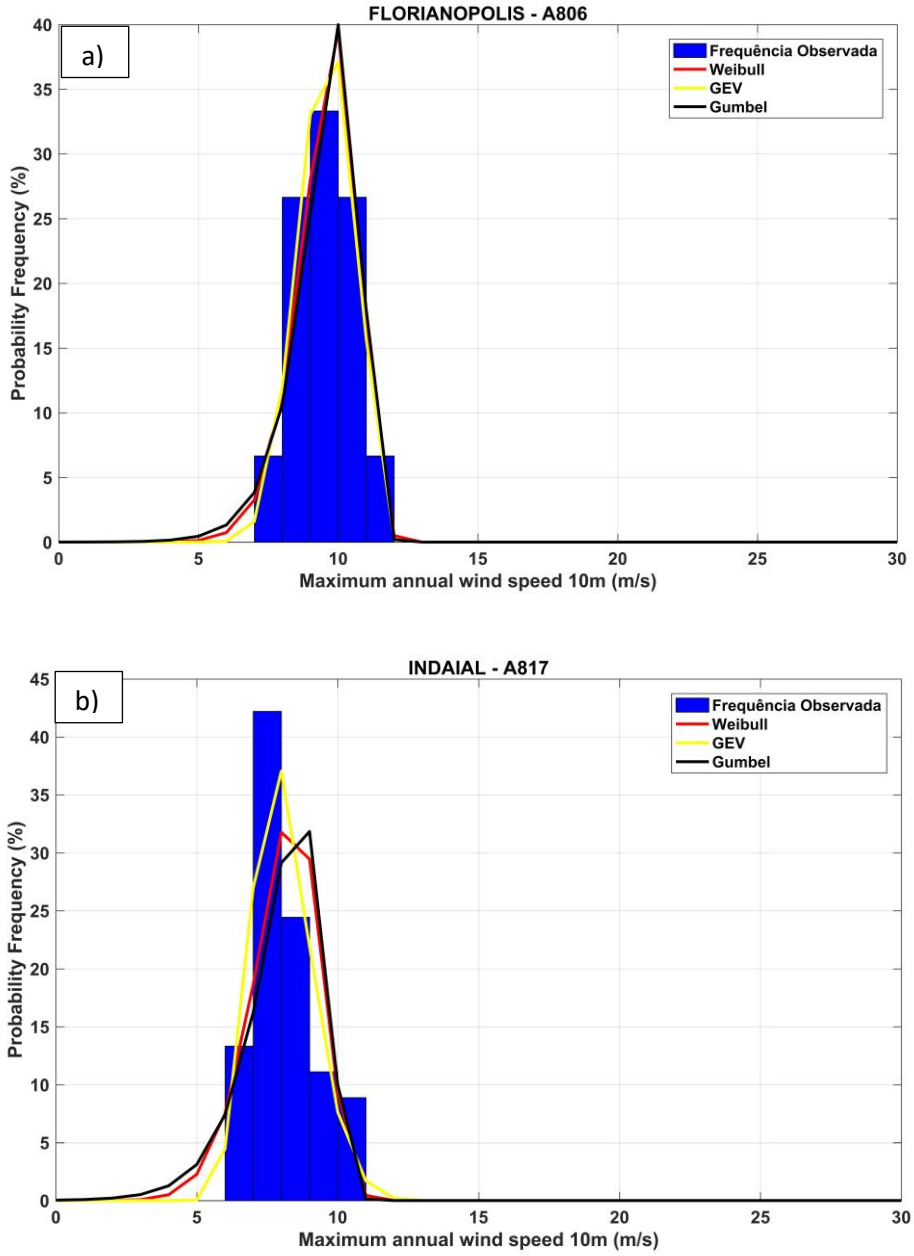
Figura 6. Distribuições de Weibull, GEV e Gumbel ajustada para a velocidade máxima diária do vento simulado pelo modelo Eta. Para as estações a) Florianópolis, b) Indaial, c) Dionísio Cerqueira e d) Caçador.

Na Tabela 1 são apresentados os valores dos parâmetros de distribuição de frequência das séries temporais simuladas pelo modelo Eta, obtidos a partir das distribuições de GEV, Weibull e Gumbel. Para efeito de comparações, incluiu-se os parâmetros calculados dos dados observacionais, localizados nas estações em estudo. Pode-se observar parâmetros semelhantes entre os dados observados e simulados.

Tabela 1. Valores dos parâmetros de distribuição, GEV, WEIBULL e GUMBEL das séries temporais de velocidade máxima diária do vento a 10m, onde k é o parâmetro de forma, β é o parâmetro de escala, a é o parâmetro de posição.

	GEV						WEIBULL				GUMBEL			
Stations	K_Obs	K_Eta	β_Obs	β_Eta	a_Obs	a_Eta	β_Obs	β_Eta	K_Obs	K_Eta	a_Obs	a_Eta	β_Obs	β_Eta
A806	-0,2	-0,2	1,6	1,1	3,3	3,5	4,4	4,3	2,6	3,8	4,7	4,5	1,6	1,2
A814	-0,2	-0,1	1,0	0,8	2,2	2,2	2,9	2,8	2,5	3,1	3,1	3,0	1,2	1,0
A815	-0,1	-0,1	1,3	1,8	4,3	4,0	5,4	5,5	3,5	2,5	5,7	6,0	1,7	2,4
A816	-0,1	-0,1	1,8	1,7	4,9	4,9	6,4	6,4	3,1	3,1	6,7	6,7	2,4	2,2
A817	0,0	-0,1	1,0	1,1	2,2	2,2	3,2	3,2	2,2	2,3	3,5	3,5	1,8	1,7
A841	-0,3	0,0	2,0	1,2	4,0	4,0	5,2	5,2	2,4	3,1	5,7	5,5	2,0	1,9
A848	-0,2	-0,1	1,8	1,8	5,3	5,2	6,7	6,7	3,5	3,3	7,0	7,0	1,9	2,1
A851	-0,2	-0,2	1,1	0,9	2,6	2,6	3,4	3,4	2,9	3,3	3,6	3,5	1,2	1,1
A857	0,0	0,0	1,3	1,5	4,1	4,0	5,4	5,4	3,1	2,8	5,7	5,8	2,0	2,2
A858	-0,1	0,0	2,0	1,3	4,4	4,5	6,0	5,9	2,6	3,1	6,5	6,3	2,5	2,3
A859	-0,2	-0,1	1,5	1,6	2,7	2,6	3,6	3,8	2,2	1,9	4,0	4,3	1,5	2,0
A860	-0,1	-0,1	1,4	1,5	4,9	4,8	6,1	6,1	3,8	3,5	6,3	6,4	1,8	1,9
A861	-0,2	-0,1	1,1	1,3	2,4	2,3	3,2	3,2	2,6	2,0	3,5	3,7	1,3	1,7
A862	-0,2	0,0	1,4	1,4	2,8	2,6	3,8	3,8	2,4	2,1	4,1	4,3	1,7	2,1
A863	-0,2	-0,1	1,3	1,2	2,3	2,2	3,2	3,2	2,1	2,1	3,6	3,6	1,6	1,8
A864	-0,1	-0,1	1,6	1,1	3,9	4,1	5,2	5,1	2,8	3,6	5,5	5,3	2,1	1,6
A867	-0,2	-0,1	1,8	1,1	3,8	4,0	5,1	5,0	2,6	4,2	5,5	5,1	2,0	1,3
A868	-0,1	-0,1	1,1	1,0	3,3	3,4	4,3	4,2	3,4	3,9	4,4	4,4	1,5	1,2
SBCH	-0,1	0,0	1,9	1,3	6,2	6,5	7,9	7,9	3,3	4,4	8,3	8,1	3,1	2,0
SBCT	-0,1	-0,1	1,7	1,6	5,8	5,7	7,4	7,1	3,3	3,8	7,7	7,4	3,0	2,0
SBFI	0,0	-0,1	1,7	1,6	4,8	5,0	6,4	6,4	2,9	3,5	6,8	6,7	3,1	2,0
SBFL	-0,1	-0,2	1,6	1,1	5,5	6,0	7,0	6,9	3,3	5,9	7,3	7,0	3,2	1,2
SBJV	-0,1	-0,2	1,4	1,2	3,7	4,1	5,0	5,0	2,8	4,1	5,3	5,1	2,8	1,2
SBLO	0,0	-0,1	1,4	1,4	4,5	4,6	5,8	5,8	3,0	3,7	6,2	6,0	3,0	1,7
SBNF	-0,1	-0,2	1,4	1,0	5,2	5,5	6,4	6,4	3,9	6,0	6,6	6,5	1,9	1,1
SBPA	-0,1	-0,1	1,9	1,7	5,6	5,6	7,4	7,1	3,1	3,8	7,8	7,3	2,7	2,0
SBSM	-0,04	-0,13	1,76	1,53	4,5	4,78	6,1	6,1	2,6	3,4	6,6	6,4	2,8	1,9

A Figura 7 representa as distribuições das séries de velocidade máxima anual do vento a 10m, simulado pelo modelo Eta. Nessas distribuições pode-se identificar uma concordância entre as séries de Weibull, GEV e Gumbel. Observa-se que a distribuição Gumbel, que não teve um desempenho significativo no ajuste das distribuições do máximo diário, obteve um resultado semelhante as demais distribuições ao analisarmos os máximos anuais. Uma possível causa desse resultado é que a distribuição Gumbel pode ir se ajustando melhor a medida em que se refina os valores extremos de uma série de dados.



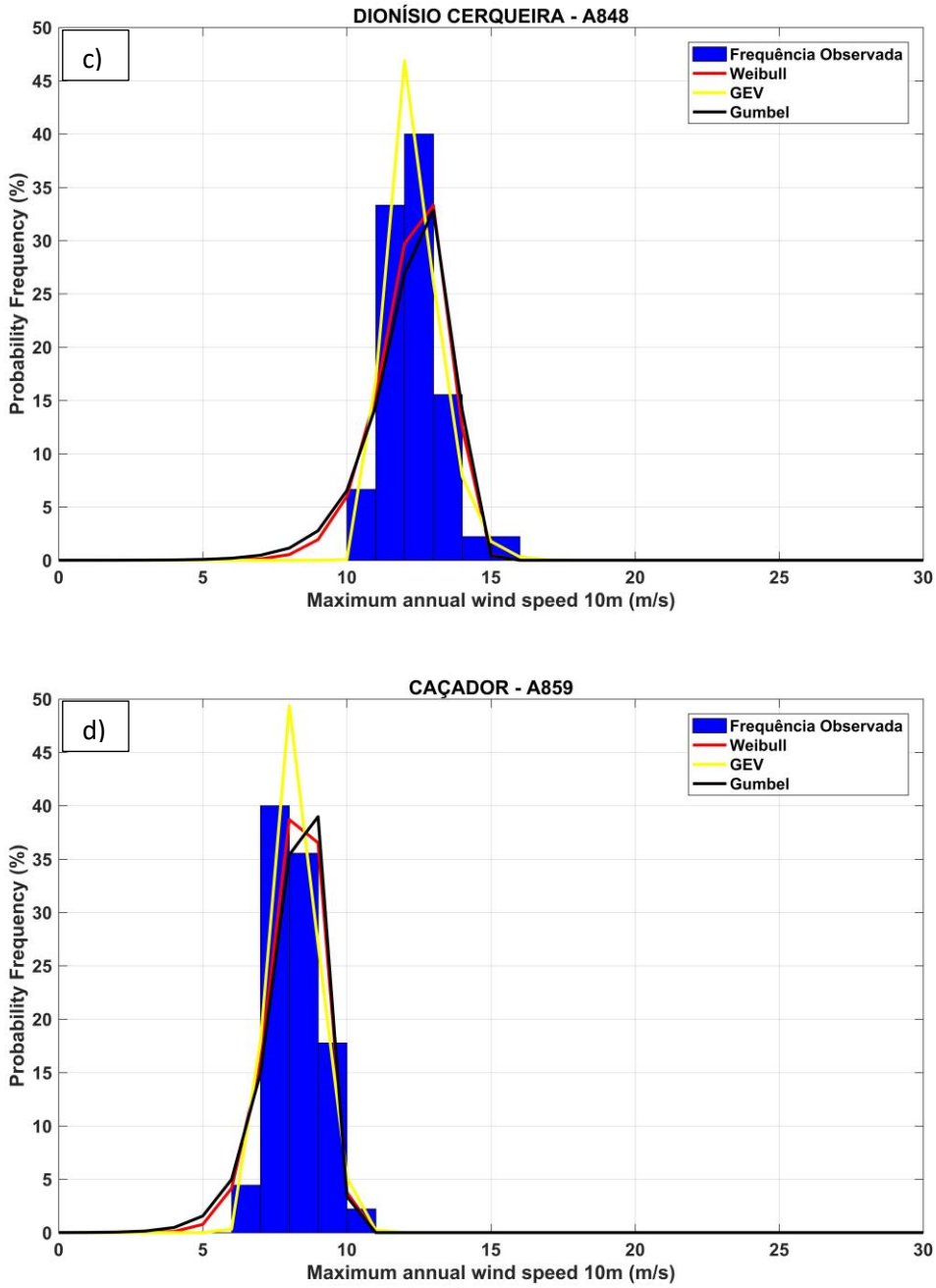


Figura 7. Distribuições de Weibull, GEV e Gumbel ajustada para a velocidade máxima anual do vento simulado pelo modelo Eta. Para as estações a) Florianópolis, b) Indaial, c) Dionísio Cerqueira e d) Caçador.

Na Tabela 2 são apresentados os valores dos parâmetros de distribuição de frequência das séries temporais simuladas pelo modelo Eta, para a velocidade máxima anual da velocidade do vento, obtidos a partir dos métodos de distribuição de GEV, Weibull e Gumbel.

Tabela 2. Valores dos parâmetros de distribuição, GEV, WEIBULL e GUMBEL das séries temporais de velocidade máxima anual do vento a 10m, onde k é o parâmetro de forma, β é o parâmetro de escala, a é o parâmetro de posição.

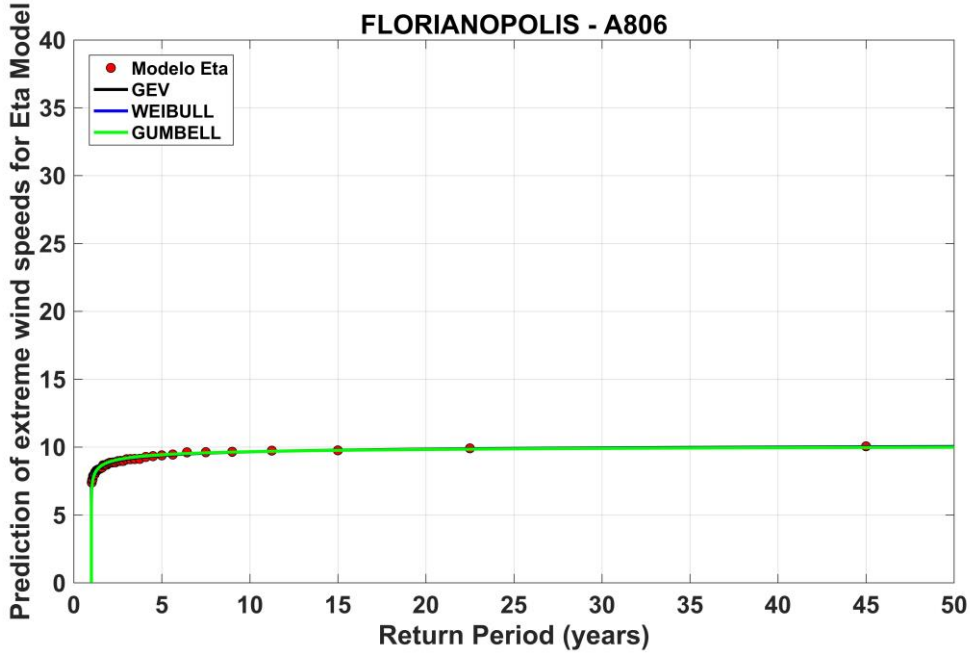
	GEV						WEIBULL				GUMBEL			
Stations	K_Obs	K_Eta	C_Obs	C_Eta	a_Obs	a_Eta	C_Obs	C_Eta	K_Obs	K_Eta	a_Obs	a_Eta	C_Obs	C_Eta
A806	0,0	-0,3	0,8	1,0	7,9	9,2	8,8	10,0	7,6	10,8	8,9	10,0	1,2	0,9
A814	-1,1	-0,1	0,7	0,8	5,9	6,5	6,2	7,4	15,2	6,8	6,2	7,5	0,4	1,1
A815	-0,4	-0,2	0,7	0,7	10,3	10,1	10,8	10,8	17,9	12,4	10,8	10,8	0,6	0,9
A816	0,3	-0,2	1,5	1,0	12,1	12,3	14,4	13,2	6,3	11,7	14,6	13,3	2,3	1,2
A817	0,3	-0,2	0,5	1,0	8,5	7,6	9,3	8,6	9,3	7,8	9,4	8,6	1,0	1,1
A841	-1,2	-0,1	1,6	1,0	10,2	11,7	10,6	12,7	11,3	10,6	10,7	12,8	0,8	1,2
A848	-0,7	-0,1	1,0	0,8	11,3	11,9	11,8	12,8	16,1	12,1	11,8	12,8	0,7	1,1
A851	-0,2	-0,1	0,5	0,6	6,8	6,7	7,3	7,3	12,0	8,8	7,3	7,4	0,6	0,9
A857	-0,3	-0,2	0,9	0,8	10,8	10,7	11,6	11,5	13,2	12,7	11,6	11,5	0,9	0,9
A858	-1,1	-0,4	2,8	1,2	12,2	14,0	12,9	14,9	8,1	13,1	13,0	15,0	1,5	1,1
A859	-0,1	-0,2	0,7	0,8	7,7	7,9	8,4	8,6	10,3	10,4	8,4	8,6	0,8	0,8
A860	0,0	-0,3	0,9	0,8	10,9	10,5	11,9	11,2	10,0	13,9	12,0	11,2	1,2	0,8
A861	-1,1	-0,3	1,0	0,6	7,1	7,0	7,4	7,6	12,1	11,8	7,4	7,6	0,6	0,6
A862	0,0	-0,1	1,0	1,1	7,9	8,6	9,0	9,7	7,2	7,6	9,1	9,8	1,2	1,3
A863	0,1	-0,3	0,8	1,1	7,3	8,5	8,3	9,5	8,1	8,3	8,4	9,5	1,0	1,1
A864	-0,5	-0,1	1,9	1,4	10,8	10,9	11,9	12,2	7,9	7,6	12,0	12,3	1,5	1,7
A867	-1,1	0,1	1,3	0,7	11,0	9,9	11,2	10,8	8,6	10,1	11,3	10,8	1,2	1,1
A868	-0,3	0,0	1,1	0,5	8,7	7,3	9,5	7,9	9,1	10,5	9,6	8,0	1,0	0,8
SBCH	-0,6	-0,3	4,1	1,3	16,8	15,6	19,0	16,5	5,7	14,0	19,3	16,6	3,1	1,2
SBCT	0,0	-0,1	1,6	1,2	12,6	13,2	14,5	14,5	6,0	9,4	14,7	14,6	2,6	1,6
SBFI	0,3	-0,1	2,2	0,9	13,6	12,7	17,2	13,6	4,3	11,6	17,8	13,7	4,1	1,2
SBFL	0,0	-0,3	2,1	1,1	13,7	12,5	15,9	13,3	5,6	12,6	16,2	13,4	3,0	1,0
SBJV	0,3	0,0	1,3	0,8	9,8	9,4	12,4	10,3	3,1	9,7	13,2	10,4	4,9	1,1
SBLO	0,3	-0,1	1,4	1,0	11,4	10,9	13,7	12,0	5,0	9,0	14,0	12,0	3,0	1,4
SBNF	-1,1	-0,2	2,5	0,6	11,7	10,5	12,1	11,0	5,9	18,5	12,3	11,0	1,7	0,6
SBPA	-0,1	-0,1	3,2	1,2	16,3	12,8	19,4	14,0	5,0	10,0	19,9	14,1	4,0	1,4
SBSM	0,0	-0,2	2,3	0,9	15,0	12,2	17,8	13,0	5,2	13,7	18,2	13,1	3,7	1,0

3.4. Resultados do Período de retorno – T

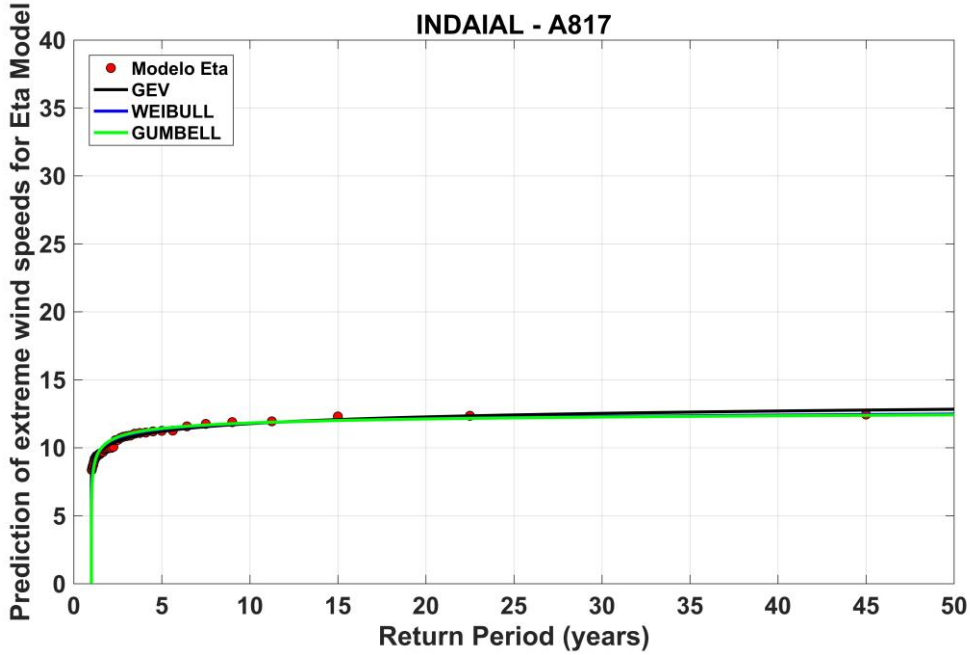
A Figura 8 e a Tabela 3 indica a velocidade máxima anual do vento do modelo Eta para o período de retorno de 5, 10, 20, 25, 40 e 50 anos. Para estas estimativas, foi utilizado os modelos de distribuições para os máximos anuais, ou seja, as três distribuições usadas neste relatório GEV, Weibull e Gumbel. Nota-se que o desempenho dos três ajustes é semelhante, e desta forma, pode-se utilizar qualquer uma das três para

calcular o período de retorno de uma série de dados ou em um determinado ponto específico. Uma diferença em relação a analise com os dados observados no produto 02, é que a quantidade de dados simuladas pelo modelo Eta é superior a quantidade de dados observados, o que melhora os ajustes das distribuições para o cálculo do período de retorno.

a)



b)



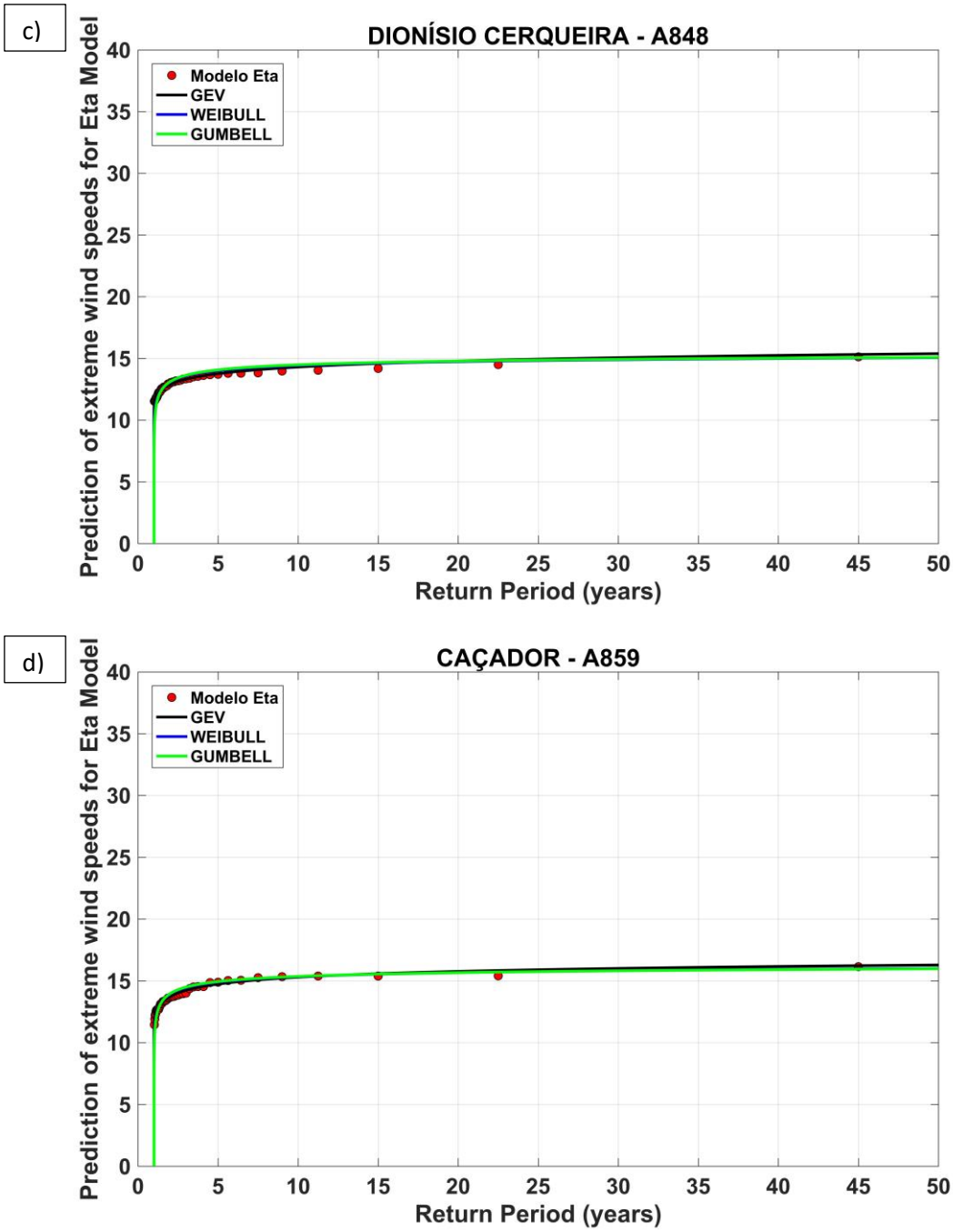


Figura 2. Período de retorno da velocidade máxima anual do vento para as simulações do período histórico do modelo Eta. Para as estações a) Florianópolis, b) Indaial, c) Dionísio Cerqueira e d) Caçador.

Ao avaliar a velocidade do vento simulado pelo modelo Eta e o período de retorno descrito acima, na Tabela 3, buscou-se identificar as maiores velocidades de vento ocorridas nas estações. Verificou-se que em todas as estações não foram observados valores superiores a 20 m/s para o período de retorno de 5, 15, 20, 25, 40 e 50 anos.

Tabela 3. Período de retorno da velocidade máxima anual do vento simulado pelo modelo Eta.

	GEV						Weibull						Gumbel					
	Return Period (Years)						Return Period (Years)						Return Period (Years)					
Stations	5	15	20	25	40	50	5	15	20	25	40	50	5	15	20	25	40	50
A806	9,4	9,6	9,8	9,9	10,0	10,0	9,4	9,6	9,8	9,9	10,0	10,0	9,4	9,7	9,8	9,9	9,9	10,0
A814	7,3	7,7	8,0	8,3	8,5	8,6	7,5	7,8	8,0	8,1	8,3	8,3	7,5	7,9	8,0	8,2	8,3	8,3
A815	15,5	16,1	16,4	16,8	17,1	17,2	15,7	16,2	16,4	16,7	16,9	16,9	15,8	16,3	16,5	16,7	16,9	17,0
A816	14,4	14,9	15,2	15,5	15,7	15,9	14,5	14,9	15,1	15,4	15,5	15,6	14,6	15,0	15,2	15,4	15,5	15,6
A817	11,2	11,8	12,1	12,4	12,7	12,8	11,4	11,8	12,0	12,2	12,4	12,5	11,4	11,8	12,0	12,2	12,4	12,4
A841	11,5	12,0	12,2	12,5	12,8	12,9	11,7	12,0	12,2	12,4	12,5	12,6	11,7	12,0	12,2	12,4	12,5	12,5
A848	13,8	14,3	14,6	14,9	15,2	15,4	14,0	14,4	14,6	14,8	15,0	15,1	14,1	14,5	14,7	14,9	15,0	15,1
A851	7,9	8,2	8,4	8,6	8,8	8,9	8,0	8,3	8,4	8,6	8,7	8,7	8,1	8,3	8,5	8,6	8,7	8,7
A857	13,2	13,7	13,9	14,2	14,4	14,5	13,3	13,7	13,9	14,1	14,2	14,3	13,4	13,7	13,9	14,1	14,2	14,3
A858	13,2	13,6	13,8	13,9	14,1	14,1	13,2	13,6	13,7	13,9	14,1	14,1	13,3	13,6	13,7	13,9	14,0	14,1
A859	14,7	15,3	15,6	15,9	16,2	16,3	14,9	15,3	15,5	15,8	15,9	16,0	14,9	15,4	15,6	15,8	15,9	16,0
A860	12,6	13,0	13,2	13,4	13,6	13,7	12,7	13,0	13,2	13,4	13,5	13,6	12,7	13,0	13,2	13,3	13,5	13,5
A861	12,1	12,5	12,7	12,9	13,1	13,2	12,2	12,5	12,7	12,8	12,9	13,0	12,2	12,5	12,7	12,8	12,9	13,0
A862	13,5	14,2	14,6	15,1	15,4	15,6	13,7	14,3	14,6	14,9	15,1	15,2	13,8	14,4	14,6	14,9	15,1	15,2
A863	12,1	12,7	12,9	13,2	13,4	13,5	12,2	12,7	12,9	13,1	13,3	13,4	12,3	12,7	12,9	13,1	13,3	13,3
A864	10,5	11,2	11,5	11,8	12,2	12,3	10,7	11,2	11,4	11,7	11,9	12,0	10,8	11,3	11,5	11,7	11,9	12,0
A867	8,0	8,3	8,5	8,8	9,1	9,2	8,2	8,4	8,5	8,6	8,7	8,7	8,2	8,4	8,5	8,6	8,7	8,8
A868	8,1	8,4	8,6	8,8	9,0	9,1	8,3	8,5	8,6	8,7	8,8	8,9	8,3	8,5	8,6	8,8	8,9	8,9
SBCH	12,2	12,6	12,8	13,0	13,1	13,2	12,3	12,6	12,8	12,9	13,1	13,1	12,3	12,6	12,8	12,9	13,0	13,1
SBCT	13,8	14,5	14,8	15,3	15,7	15,8	14,0	14,6	14,8	15,1	15,3	15,4	14,1	14,7	14,9	15,2	15,4	15,5
SBFI	11,8	12,3	12,6	12,9	13,1	13,3	12,1	12,4	12,6	12,8	12,9	13,0	12,1	12,5	12,6	12,8	13,0	13,0
SBFL	9,4	9,6	9,8	9,9	10,0	10,0	9,4	9,6	9,8	9,9	10,0	10,0	9,4	9,7	9,8	9,9	9,9	10,0
SBJV	8,1	8,5	8,7	9,0	9,2	9,4	8,3	8,6	8,7	8,8	8,9	9,0	8,4	8,6	8,7	8,8	8,9	9,0
SBLO	11,3	11,8	12,1	12,5	12,8	12,9	11,5	11,9	12,1	12,4	12,5	12,6	11,6	12,0	12,2	12,4	12,6	12,6
SBNF	7,8	8,0	8,1	8,2	8,3	8,4	7,9	8,0	8,1	8,2	8,2	8,3	7,9	8,1	8,1	8,2	8,2	8,3
SBPA	12,2	12,9	13,2	13,6	14,0	14,1	12,5	12,9	13,1	13,4	13,5	13,6	12,5	12,9	13,1	13,4	13,5	13,6
SBSM	11,4	11,7	11,9	12,1	12,2	12,3	11,5	11,7	11,9	12,0	12,1	12,2	11,5	11,8	11,9	12,0	12,1	12,2

3.5. Análise Espacial do Período de Retorno de 50 anos com as Distribuições GEV, Weibull e Gumbel

Nas Figuras de 9 a 11 têm-se os mapas dos períodos de retorno de 50 anos para as três distribuições estudadas e não se observa grandes diferenças entre elas, o que indica que qualquer delas pode ser usada para o cálculo dos períodos de retorno. Para efeito de comparação a Figura 12 mostra o período de retorno de 50 anos, dada pela NBR 5422

(ABNT, 1985). Observa-se que a norma apresenta valores superiores de vento de período de retorno de 50 anos, o que já era de se esperado, em virtude de o modelo disponibilizar o vento médio e a NBR 5422 utilizar o vento de rajada. Porém isso não prejudica as analises, pois ao estudarmos as projeções, (análise futura vinculada ao produto 4), poderá ser realizada a comparação dos períodos de retorno do clima passado e do futuro e com isso estimar a tendência de neutralidade, aumento ou diminuição dos valores de período de retorno de 50 anos. Como exemplo: se observamos uma tendência de aumento no vento médio, podemos assumir que esse aumento também ocorrerá aos dados de rajada de vento.

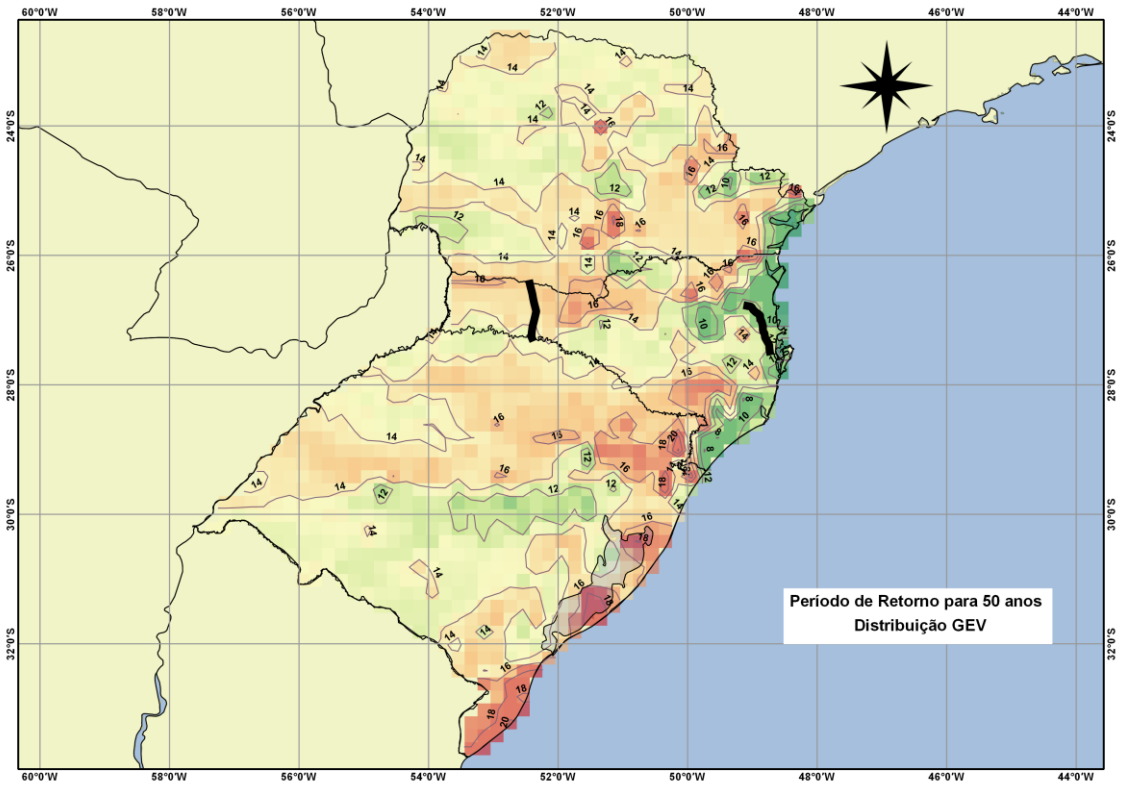


Figura 3. Período de retorno da velocidade máxima anual do vento para as simulações do período histórico do modelo Eta (Distribuição GEV).

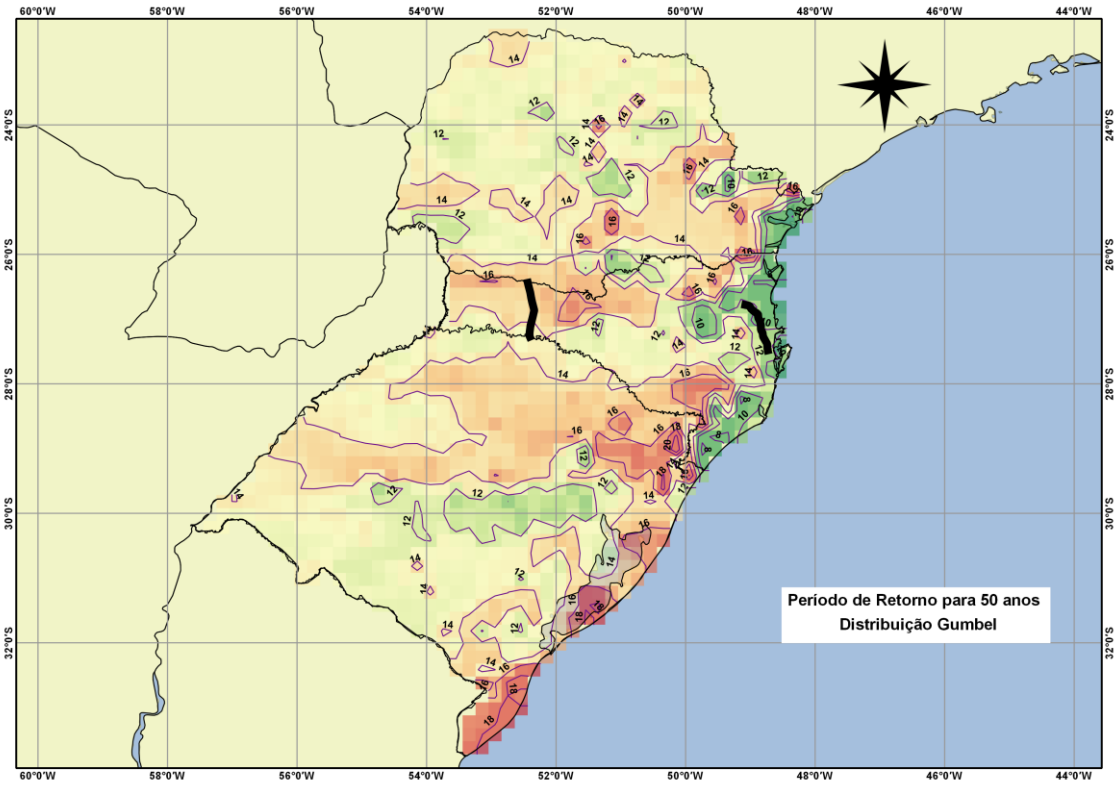


Figura 10. Período de retorno da velocidade máxima anual do vento para as simulações do período histórico do modelo Eta (Distribuição Gumbel).

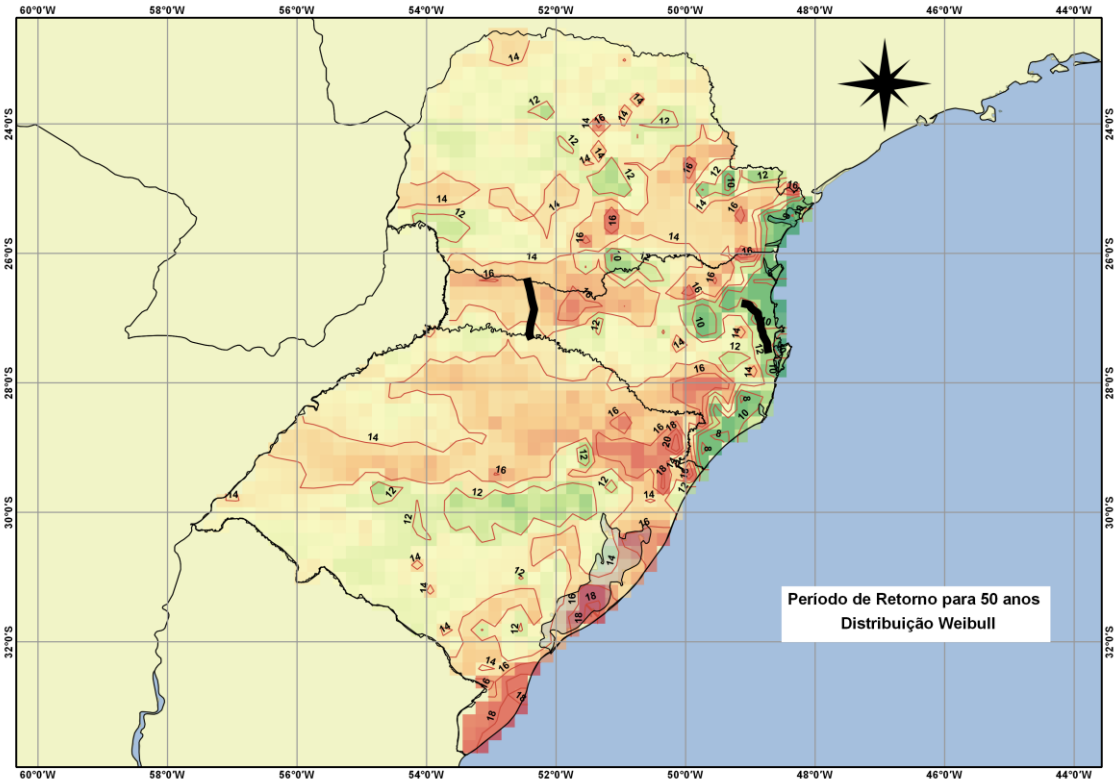


Figura 4. Período de retorno da velocidade máxima anual do vento para as simulações do período histórico do modelo Eta (Distribuição Weibull).

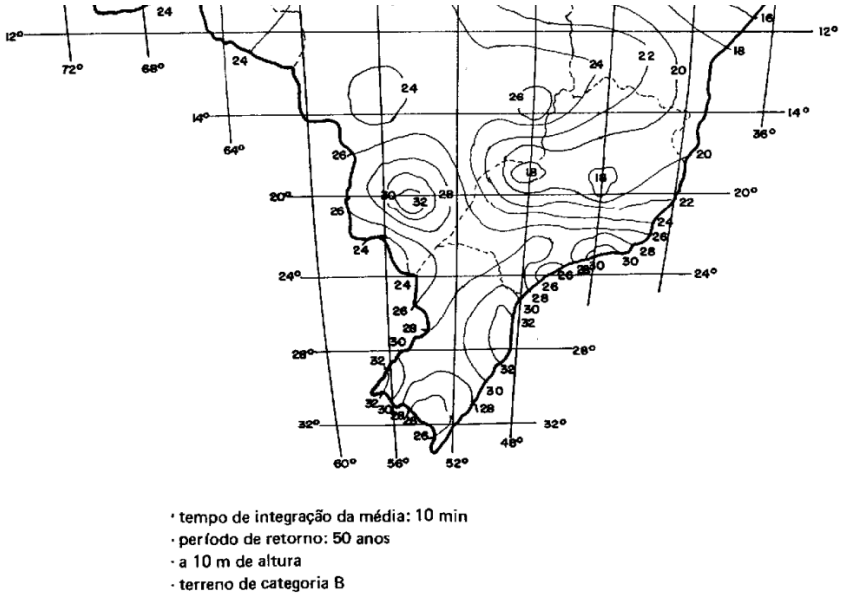


Figura 5. Período de retorno da velocidade básica do vento segundo a NBR 5422.

3.6. Resultado do Teste de Tendência para as Linha de Transmissão de Ita - Salto Santiago e Biguaçu - Blumenau.

Na Figura 13, tem-se o mapa da velocidade média do máximo anual do vento e as localizações das duas linhas de transmissões. Foi analisado os pixels de maior média da velocidade do vento ao longo das duas linhas de transmissões, e sendo assim, para as análises de tendência foram escolhidos dois pontos, um em cada linha. Ainda nesta Figura observa-se que os maiores valores de ventos 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. Porém, observam-se valores altos de vento no sudeste do Estado.

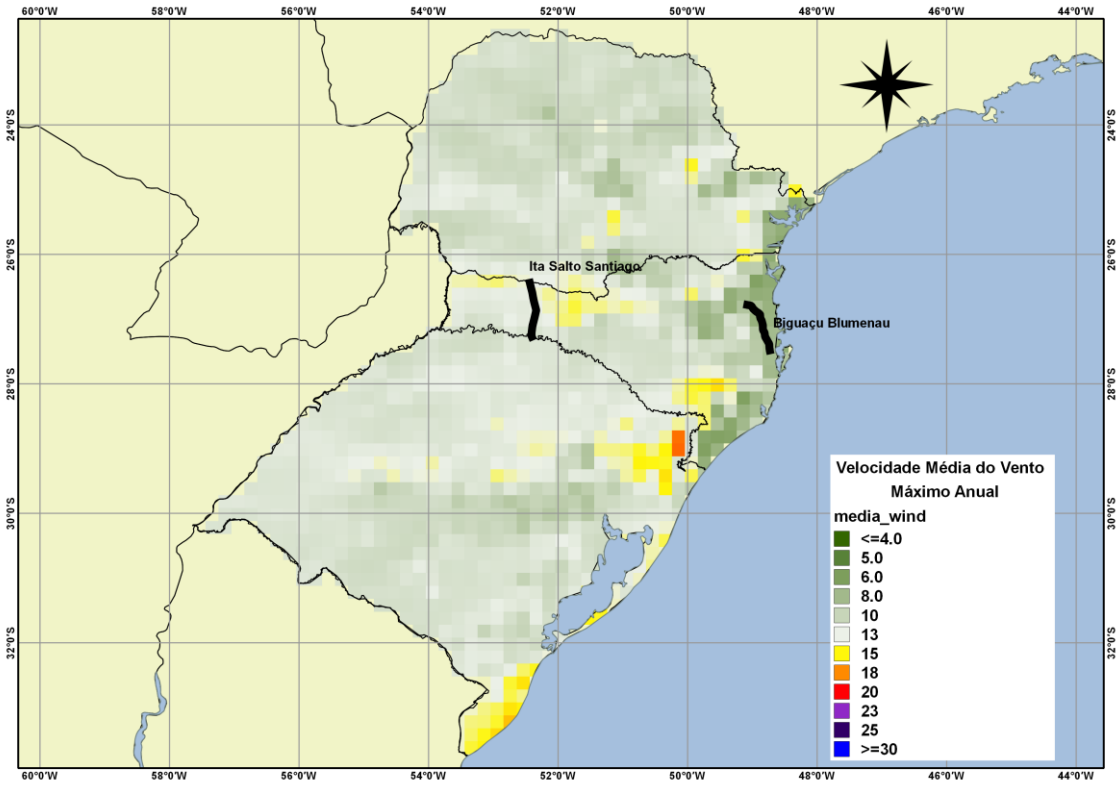


Figura 63. Velocidade média do vento para o máximo anual simulado pelo modelo Eta.

A Figura 14 mostra as tendências das velocidades máxima anuais ao longo do período de estudo, utilizando os métodos de Mann-Kendall e Sen. Tanto nas linhas de Ita - Salto Santiago quanto na de Biguaçu - Blumenau, verifica-se que houve tendência de aumento da velocidade do vento, porém a mesma é muito pequena, com valor de +0,01 m/s/ano, e desta forma não reportou significância estatística.

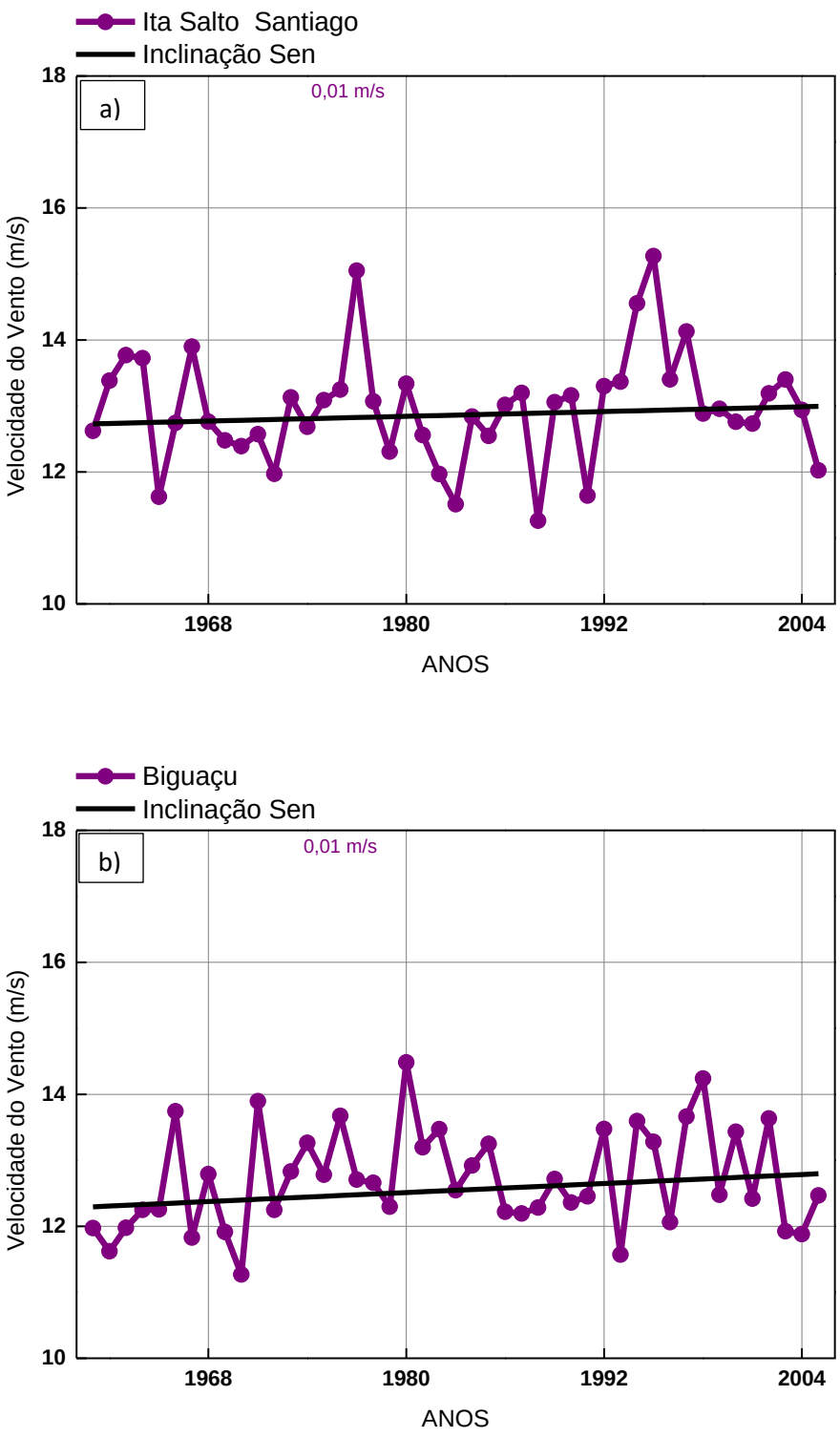


Figura 14. Variabilidade dos valores máximos anuais de velocidade do vento (m/s) para as linhas de transmissão de (a) Ita Salto Santiago e (b) Biguaçu Blumenau, apresentando o valor máximo anual, a inclinação e magnitude da tendência pelo método Sen, significância estáticas.

4. CONCLUSÕES

O presente relatório investigou os aspectos relativos à ocorrência de ventos extremos máximos a partir dos dados do período histórico simulados pelo modelo Eta, compreendendo desde a validação, correção do viés do modelo, distribuição de eventos extremos e método estatístico de análise de tendência climática. Os métodos de distribuição de frequência adotados reportaram um bom ajuste às séries de velocidade horária e velocidade máxima do vento simulado. Em relação ao período de retorno da velocidade máxima anual, verificou-se que não ocorreram velocidades do vento superiores a 20 m/s, nas simulações do Eta, o que já era esperado em virtude de o modelo simular o vento médio e não o vento de rajada. Este fato, porém, não impede a verificação das tendências do passado e do futuro usando o modelo Eta. Existe a perspectiva de nos próximos produtos encontrar-se uma relação entre o vento médio e o vento de rajada, o que possibilitaria estimar valores mais realista para o período de retorno simulado pelo modelo.

Com base nas análises de tendência climática das séries de velocidade máxima anual do vento nas linhas de transmissões, há uma indicação sutil de aumento na velocidade máxima anual em ambas, porém sem significância estatística.

5. DISCUSSÕES SOBRE OS ANEXOS AO PRODUTO

Em anexo ao produto, tem-se os arquivos de figuras e os arquivos em formato NETCDF, que podem ser abertos em qualquer programa GIS. Na pasta 07 estão os arquivos em NETCDF, São três arquivos, um para cada distribuição, GEV, Gumbel e Weibul. Nos arquivos tem-se os períodos de retorno para 50 anos e os parâmetros das três distribuições. Nas demais pastas encontram-se as figuras das demais estações que não foram colocadas neste relatório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ANGELI SANSIGOLO, C. **DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE DE VELOCIDADE E POTÊNCIA DO VENTORevista Brasileira de Meteorologia**. [s.l: s.n.].

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

BROCCA, L. et al. Soil moisture estimation through ASCAT and AMSR-E sensors: An intercomparison and validation study across Europe. **Remote Sensing of Environment**, 2011.

CAVALCANTI, I. F. A.; SHIMIZU, M. H. Climate Fields over South America and Variability of SACZ and PSA in HadGEM2-ES. **American Journal of Climate Change**, 2012.

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. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, 2014a.

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

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.

DE QUADROS, L. E.; DE QUEIROZ, M. M. F.; BOAS, M. A. V. Distribuição de frequência e temporal de chuvas intensas. **Acta Scientiarum - Agronomy**, 2011.

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.

DUKES, M. D. G.; PALUTIKOF, J. P. **Estimation of Extreme Wind Speeds with Very Long Return PeriodsJournal of Applied Meteorology**, 1995.

FAN, X.-H.; WANG, M.-B. Change trends of air temperature and precipitation over Shanxi Province, China. [s.d.].

FISHER, R. A.; TIPPETT, L. H. C. Limiting forms of the frequency distribution of the

largest or smallest member of a sample. **Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society**, 1928.

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.

JENKINSON, A. F. The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 1955.

KENDALL, M. G. **Rank correlation methods.** [s.l: s.n.].

KENDALL, M. G. **Rank Correlation Methods**. [s.l: s.n.].

LYRA, A. et al. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. **Theoretical and Applied Climatology**, 2018.

MANN, H. B. Nonparametric Tests Against Trend. **Econometrica**, 1945.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 2008.

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.

MCTI - MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, T. E I. **Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**.

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.

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.

PESQUERO, J. F. et al. Climate downscaling over South America for 1961-1970 using the Eta Model. **Theoretical and Applied Climatology**, 2010.

QUEIROZ, M. M. F.; CHAUDHRY, F. H. Análise de eventos hidrológicos extremos, usando-se a distribuição GEV e momentos LH (in Portuguese). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 381–389, 2006.

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.

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, B. B. DA et al. Potencial eólico na direção predominante do vento no Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2002.

SILVA, W. L.; DERECZYNSKI, 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.

TAVARES, P. DA S. et al. Climate change impact on the potential yield of Arabica coffee in southeast Brazil. **Regional Environmental Change**, 2018.

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 Three-Parameter Model for Estimating Mean Wind Power DensitiesJournal of Applied Meteorology**, 1980.

VIOLA, M. R. et al. Assessing climate change impacts on Upper Grande River Basin hydrology, Southeast Brazil. **International Journal of Climatology**, 2015.

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.