

GERAÇÃO DE INFORMAÇÕES PARA SUBSIDIAR ESTUDOS EM PLANEJAMENTO DE INVESTIMENTOS PARA INFRAESTRUTURAS A PARTIR DOS DADOS DE PROJEÇÕES DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Relatório 8/8 - Relatório contendo a análise dos índices de instabilidade (Frentes Frias-FF e passagens Pré-Frontais-PF) para as principais áreas de interesse em Santa Catarina a partir dos resultados do Eta-20km forçado pelo modelo HadGEM2-ES, MIROC5 e CanESM2, e do Eta-5km forçado pelo HadGEM2-ES, ambos considerando o baseline, RCP4.5 e RCP8.5

Priscila Tavares

Elaborado por: Priscila da Silva Tavares - priscilatavares@gmail.com

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

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

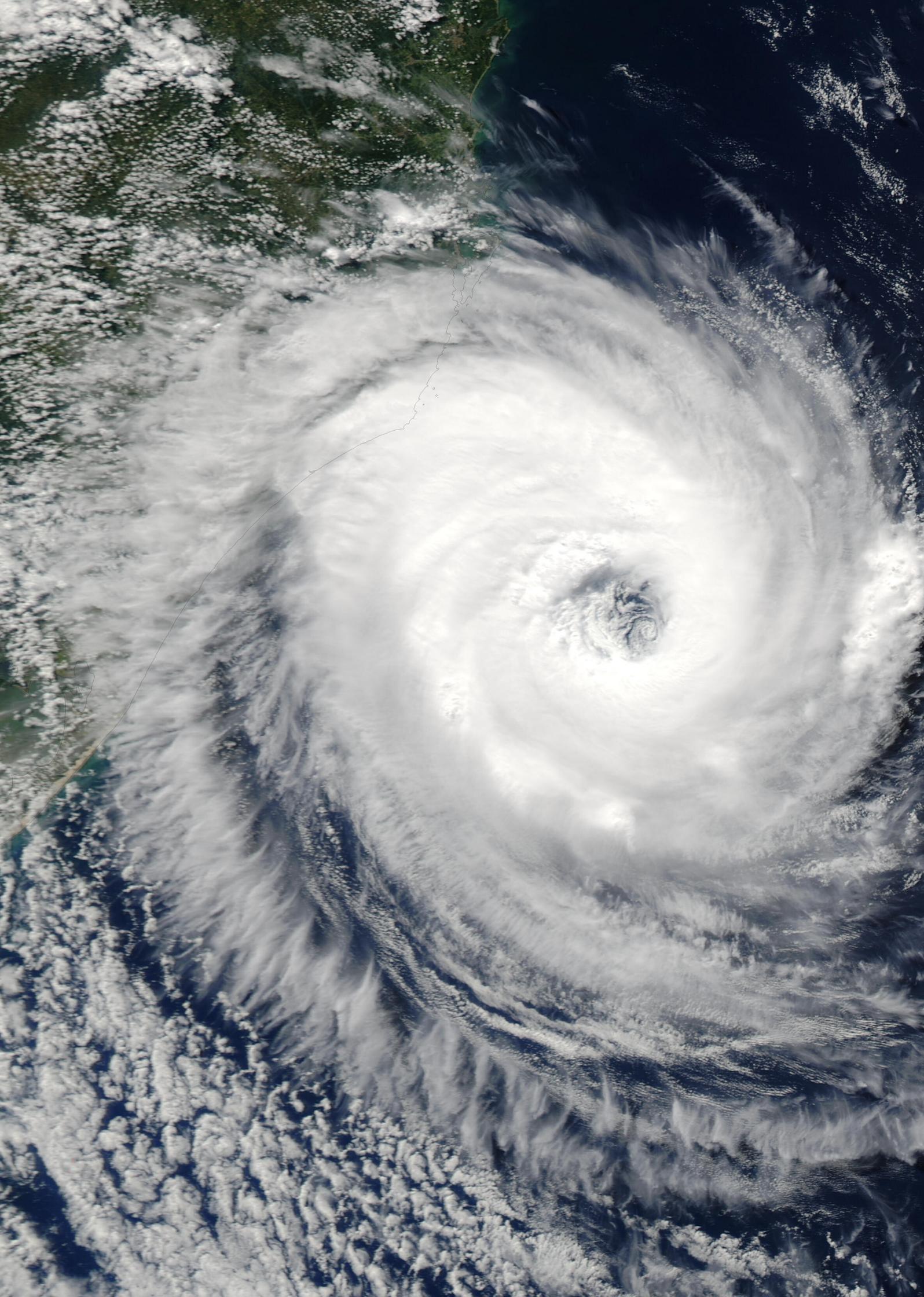
A encargo de:

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 _____	iv
LISTA DE TABELAS _____	vii
1. CONTEXTO _____	8
1.1 Objetivo _____	10
2. DADOS E METODOLOGIA _____	11
2.1 Área de estudo _____	11
2.2 Indicador de tempo severo _____	11
2.3. Modelo Climático Eta _____	13
2.3.1 Cenários RCP _____	13
2.4 Componentes do Protocolo PIEVC _____	15
2.4.1 Escala de probabilidade _____	16
2.4.2 Escala de robustez _____	16
3. RESULTADOS _____	19
3.1 Clima presente _____	19
3.2 Projeções climáticas _____	22
3.3 Classificação da robustez e probabilidade – <i>Baseline</i> e projeções dos cenários RCPs _____	26
4. SÍNTESE E CONSIDERAÇÕES FINAIS _____	28
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____	31
APÊNDICE A: Campos médios anuais de Frentes Frias (FF) e FF associadas a chuvas intensas e ventos intensos _____	34
APÊNDICE B: Campos da diferença entres os cenários futuros e o clima presente de Frentes Frias (FF) e FF associadas a chuvas intensas e ventos intensos _____	37

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Área selecionada para avaliar a incursão de Frentes Frias Intensas em Santa Catarina, com destaque para a localização do Porto de Itajaí e das mesorregiões Vale do Itajaí e Oeste Catarinense. Fonte: Produção da autora com base nos limites propostos pelo IBGE (2002). _____ 11

Figura 2.2 - Emissões global de CO₂ e características de emissão e temperatura de vários cenários RCPs - *Representative Concentration Pathway* (a) e SSPs - *Shared Socio-economic Pathways* (b). Fonte: Fuss et al. (2014), Riahi et al. (2017), Rogelj et al. (2018) e GCP (2018). _____ 15

Figura 3.1 - Valores referentes ao percentil 95° (p95) da precipitação diária (p95_Prec) (coluna da esquerda) e ao percentil 99° do vento máximo diário (km/h) (coluna da direita). Estimativas para o período de 1998-2010 tomando como base os dados observados de precipitação diária do conjunto MERGE e vento a 10 m das reanálises do ERA-Interim, além das saídas do modelo Eta-HadGEM 5km, Eta-HadGEM 20 km, Eta-CanESM 20km e Eta-MIROC 20km. _____ 20

Figura 3.2 - Número médio anual de Frentes Frias (FF) e FF associadas a chuvas intensas (FF_p95_prec) e ventos intensos (FF_p99_vv10m) com base no período de 1998 a 2010. A climatologia foi obtida através dos dados das reanálises do ERA-Interim para o nível atmosférico de 925 hPa e das saídas do modelo Eta-HadGEM 5km, Eta-HadGEM 20 km, Eta-CanESM 20km e Eta-MIROC 20km. Valores médios para as mesorregiões (a) Vale do Itajaí e (b) Oeste Catarinense. _____ 21

Figura 3.3 - Número médio anual de (a) Frentes Frias (FF) e (b) FF associadas a chuvas intensas (FF_p95_prec) e (c) ventos intensos (FF_p99_vv10m) para a mesorregião Vale do Itajaí e; (d) FF associadas a vento intenso para o ponto de grade referente ao Porto de Itajaí, ambos localizados no estado de Santa Catarina. Valores do período histórico (1998-2010) obtidos das reanálises do ERA-Interim e para as projeções do clima futuro, cenários RCP4.5 e RCP8.5, obtidos dos modelos EtaHadGEM2-ES-5km, EtaHadGEM2-ES-20km, EtaCanESM-20km e EtaMIROC5-20km. A FF foram identificadas em cada ponto de grade considerando o nível atmosférico de 925 hPa (continua) _____ 23

Figura 3.3 - Número médio anual de (a) Frentes Frias (FF) e (b) FF associadas a chuvas intensas (FF_p95_prec) e (c) ventos intensos (FF_p99_vv10m) para a mesorregião Vale do Itajaí e; (d) FF associadas a vento intenso para o ponto de grade referente ao Porto de Itajaí, ambos localizados no estado de Santa Catarina. Valores do período histórico (1998-2010) obtidos das reanálises do ERA-Interim e para as projeções do clima futuro, cenários RCP4.5 e RCP8.5, obtidos dos modelos Eta5km-SC (forçado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES-20km) e os modelos EtaHadGEM2-ES-20km, EtaCanESM-20km e EtaMIROC5-20km. A FF foram identificadas em cada ponto de grade considerando o nível atmosférico de 925 hPa. (fim). _____ 23

Figura 3.4 - Número médio anual de (a) Frentes Frias (FF) e (b) FF associadas a chuvas intensas (FF_p95_prec) e (c) ventos intensos (FF_p99_vv10m) para a mesorregião Oeste do estado de Santa Catarina- SC. Valores do período histórico (1998-2010), obtido das reanálises do ERA-Interim, e para as projeções do clima futuro, cenários RCP4.5 e RCP8.5, obtidos dos modelos Eta5km-SC (forçado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES-20km) e os modelos EtaHadGEM2-ES-20km, EtaCanESM-20km e EtaMIROC5-20km. A FF foram identificadas em cada ponto de grade considerando o nível atmosférico de 925 hPa. _____ 24

Figura 3.5 - Número médio mensal de (a) Frentes Frias (FF) e (b) FF associadas a chuvas intensas (FF_p95_prec) e (c) ventos intensos (FF_p99_vv10m) para a mesorregião Vale do Itajaí do estado de Santa Catarina- SC. Valores do período histórico (1998-2010) obtidos das reanálises do ERA-Interim e para as projeções do clima futuro, cenários RCP4.5 e RCP8.5, obtidos dos modelos (a) Eta5km-SC (forçado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES-20km) e os modelos (b) EtaHadGEM2-ES-20km, (c) EtaCanESM-20km e (d) EtaMIROC5-20km. A FF foram identificadas em cada ponto de grade considerando o nível atmosférico de 925 hPa. _____ 25

Figura 3.6 - Número médio mensal de (a) Frentes Frias (FF) e (b) FF associadas a chuvas intensas (FF_p95_prec) e (c) ventos intensos (FF_p99_vv10m) para a mesorregião Oeste do estado de Santa Catarina- SC. Valores do período histórico (1998-2010) obtidos das reanálises do ERA-Interim e para as projeções do clima futuro, cenários RCP4.5 e RCP8.5, obtidos dos modelos (a) Eta5km-SC (forçado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES-20km) e os modelos (b) EtaHadGEM2-ES-20km, (c) EtaCanESM-20km e (d) EtaMIROC5-20km. A FF foram identificadas em cada ponto de grade considerando o nível atmosférico de 925 hPa. _____ 26

Figura A.1 - Número médio anual de Frentes Frias (FF) para o período histórico (1998-2010), obtido através dos dados de reanálise do ERA-Interim, e para projeções do clima futuro (2011-2040), cenários RCP4.5 e RCP8.5, obtidos dos modelos Eta5km-SC (forçado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES-20km) e os modelos EtaHadGEM2-ES-20km, EtaCanESM-20km e EtaMIROC5-20km. A FF foram identificadas em cada ponto de grade considerando o nível atmosférico de 925 hPa. _____ 34

Figura A.2 - Número médio anual de Frentes Frias (FF) associadas com chuvas intensas (percentil 95º) para o período histórico (1998-2010), obtido através dos dados de reanálise do ERA-Interim, e para projeções do clima futuro (2011-2040), cenários RCP4.5 e RCP8.5, obtidos dos modelos Eta5km-SC (forçado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES-20km) e os modelos EtaHadGEM2-ES-20km, EtaCanESM-20km e EtaMIROC5-20km. A FF foram identificadas em cada ponto de grade considerando o nível atmosférico de 925 hPa. _____ 35

Figura A.3 - Número médio anual de Frentes Frias (FF) associadas com vento intenso (percentil 99º) para o período histórico (1998-2010), obtido através dos dados de reanálise do ERA-Interim, e para projeções do clima futuro (2011-2040), cenários RCP4.5 e RCP8.5, obtidos dos modelos Eta5km-SC (forçado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES-20km) e os modelos EtaHadGEM2-ES-20km, EtaCanESM-20km e EtaMIROC5-20km. A FF foram identificadas em cada ponto de grade considerando o nível atmosférico de 925 hPa. _____ 36

Figura B.1 - Campos da diferença dos valores médios anuais entre as projeções do clima futuro, cenários RCP4.5 e RCP8.5, e o período histórico das Frentes Frias (FF) em geral, obtidos a partir do modelo Eta5km-SC (forçado pelo modelo EtaHadGEM2-ES-20km) e os modelos Eta-HadGEM2-ES-20km, Eta-CanESM-20km e Eta-MIROC5-20km. O período histórico representa a média entre os anos de 1998 a 2010, e as projeções RCP4.5 (coluna esquerda) e RCP8.5 (coluna direita) são baseadas nas médias entre os anos de 2011 a 2040 _____ 37

Figura B.2 - Campos da diferença dos valores médios anuais entre as projeções do clima futuro, cenários RCP4.5 e RCP8.5, e o período histórico das Frentes Frias (FF) associadas com chuvas intensas (percentil 95º), obtidos a partir do modelo Eta5km-SC (forçado pelo modelo EtaHadGEM2-ES-20km) e os modelos Eta-HadGEM2-ES-20km, Eta-CanESM-20km e Eta-MIROC5-20km. O período histórico representa a média entre os anos de 1998 a 2010, e as projeções RCP4.5 (coluna esquerda) e RCP8.5 (coluna direita) são baseadas nas médias entre os anos de 2011 a 2040 _____ 38

Figura B.3 - Campos da diferença dos valores médios anuais entre as projeções do clima futuro, cenários RCP4.5 e RCP8.5, e o período histórico das Frentes Frias (FF) associado com vento intenso (percentil 99º), obtidos a partir do modelo Eta5km-SC (forçado pelo modelo EtaHadGEM2-ES-20km) e os modelos Eta-HadGEM2-ES-20km, Eta-MIROC5-20km, Eta-CanESM. O período histórico representa a média entre os anos de 1998 a 2010, e as projeções RCP4.5 (coluna esquerda) e RCP8.5 (coluna direita) são baseadas nas médias entre os anos de 2011 a 2040.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Critérios objetivos utilizados para classificação de Frentes Frias (FF) e sistemas Pré-Frontais (PF) associadas a tempo severo no estado de Santa Catarina. _____	12
Tabela 2.2 - Descrição da escala de probabilidade considerando o período de 30 anos _____	16
Tabela 2.3 - Critérios para pontuação de robustez do clima atual _____	17
Tabela 2.4 - Critérios para pontuação de robustez dos cenários de mudança climática _____	17
Tabela 3.1 - Valores referentes ao percentil 95° (p95) da precipitação diária e percentil 99° do vento máximo diário a 10 m. Foram considerados dados de precipitação oriundos do produto MERGE/INPE (Rozante et al., 2010) e dados da velocidade do vento nos horários sinóticos das 0000, 0600, 1200 e 1800Z das reanálises do ERA-Interim. _____	19
Tabela 3.2 - Sinal da mudança das Frentes Frias nos cenários climáticos futuros, com base num conjunto de 8 membros do modelo Eta, sendo eles: projeções de dois cenários RCPs, RCP4.5 e RCP8.5, a partir das simulações dos modelos Eta-HadGEM 5km, Eta-HadGEM 20km, Eta-CanESM 20km e Eta-MIROC 20km. FF- Frentes Frias em geral; FF_p95_Prec - FF associadas a chuvas intensas; e FF_p99_VV10m - FF associadas a vento intenso. ↑ representa sinal de aumento, ou seja, aumento dos valores médios anuais das FF em relação ao período baseline, ↓ representa sinal de redução e ≅ ↑ representa sinal misto, ou seja, ligeiramente igual e acima dos valores registrados no período baseline. Para a caixa de grade do modelo referente a localidade do Porto do Itajaí foi apresentado apenas o sinal das FF associadas a vento intenso. A abreviação “Quant.” refere-se à quantidade de modelos que apresentaram tal sinal. _____	24
Tabela 3.3 - Pontuação de Robustez das informações sobre o clima atual _____	27
Tabela 3.4 - Pontuação de Robustez das informações dos cenários de mudança climática para o Porto de Itajaí e para as linhas de transmissão da Eletrosul (linhas Itá-Salto Santiago e Biguaçu-Blumenau) _____	27
Tabela 3.5 – Probabilidade atual e futura de ocorrência de ameaças climáticas para o Porto de Itajaí e as linhas de transmissão da Eletrosul (linhas Itá-Salto Santiago e Biguaçu-Blumenau). _____	28

1. CONTEXTO

Nos últimos anos, a variabilidade climática e dos eventos extremos têm afetado fortemente o Brasil e o mundo. Alguns estudos evidenciaram que desde meados do século XX houve um aumento expressivo na frequência e intensidade dos eventos de chuvas extremas, ao passo que também houve aumento dos episódios de seca (Groisman et al., 2005; Zeng et al., 2008; Marengo et al., 2010; Marengo et al., 2013; Espinoza et al., 2014). A ocorrência dos eventos extremos de temperatura também tem sofrido alteração, com aumento da frequência de dias e noites quentes, além de ondas de calor e diminuição da frequência de dias e noites frias e episódios de geadas (Marengo et al., 2010). Tais eventos produzem severos impactos socioeconômicos e têm propiciado cada vez mais prejuízos econômicos e danos a sociedade (Coronese et al., 2019). Em Santa Catarina (SC) não tem sido diferente, importantes setores econômicos do estado como o portuário e as linhas de transmissão têm sofrido com eventos extremos. Eventos de chuvas intensas como os ocorridos nos anos de 1983 e 1984, contribuíram para uma catástrofe no estado e provocou grande estrago estrutural na área portuária, como rupturas de mais de um berço de atracação. Estima-se que os danos materiais produzidos no evento de 1983 foram superiores a 1 bilhão de dólares (Dias, 2009).

Em face do exposto e com o intuito de ampliar o uso de serviços climáticos para tornar as infraestruturas mais resilientes a mudança do clima, o projeto CSI (*Enhancing Climate Services for Infrastructure Investments*) adotou o Porto de Itajaí e as linhas de transmissão da Eletrousul como estudos pilotos para conduzir uma análise de risco climático. Portanto, foi realizada uma parceria entre o Ministério do Meio Ambiente (MMA) e a Secretaria de Estado de Planejamento de Santa Catarina (SPC-SC). Através de oficinas realizadas em conjunto com a equipe técnica das infraestruturas selecionadas usando a metodologia PIEVC - *Public Infrastructure Engineering Vulnerability Committee* (Protocolo PIEVC, 2016) identificou-se possíveis demandas de serviços climáticos. Ambos setores enviaram uma lista de eventos em que suas infraestruturas sofreram prejuízos e danos devido a extremos meteorológicos, tais como: rajadas de vento, chuvas intensas e tornados. Identificou-se, através de levantamentos da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de

Santa Catarina - Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina (EPAGRI-CIRAM) – relatório produto 2 (MMA-GIZ, 2018), que grande parte dos danos causados - estruturais ou não - ao Porto de Itajaí por tempestades severas foram associadas as passagens de frentes frias e sistemas pré-frontais. Estes eventos deflagraram, na região e proximidades, inundações, deslizamentos, aumento da correnteza do rio Itajaí-Açu, assoreamento, etc.

O Porto de Itajaí localiza-se no leste de SC, mais precisamente na mesorregião Vale do Itajaí, que é considerada no Estado uma das mais expostas aos desastres naturais associados a eventos meteorológicos extremos (Escobar et al., 2016). Devido às características topográficas do Vale do Itajaí, tais como a presença de serras ao sul e a oeste, assim como pequenas elevações junto ao Oceano Atlântico, os ventos de quadrante leste, oriundos do mar, facilitam a convergência de umidade no interior do vale, intensificando assim os sistemas na região e provocando, conseqüentemente, a ocorrência de chuvas intensas. Outro fator é a localização de SC entre as latitudes médias e subtropicais, o que permite a passagem frequente das frentes frias e sistemas pré-frontais, bem como a passagem das massas de ar tropical (Seluchi et al., 2017). Além disso, a presença dos jatos de altos e baixos níveis e a proximidade do Oceano Atlântico, completam um quadro meteorológico propício para a ocorrência de tempestades severas na região (Escobar, 2009; Salio et al., 2007). Conforme Severo (1994), grande parte dos eventos de chuvas intensas na região do Vale do Itajaí são provocados pela passagem de sistemas frontais e, segundo relatado pelos parceiros do Porto de Itajaí, são os principais causadores de danos estruturais e econômicos ao porto.

Diante do exposto, com intuito de avaliar a problemática da região diante do perigo meteorológico em cenários climáticos futuros, construiu-se uma metodologia de detecção de passagens de Frentes Frias (FF) e sistemas Pré-Frontais (PF) associadas a tempo severo. O indicador foi construído e calibrado a partir das análises dos casos de FF com relatos de danos e/ou interrupção das atividades do Porto de Itajaí. O algoritmo de detecção de FF intensas conseguiu capturar os eventos selecionados pelos parceiros do Porto do Itajaí e da EPAGRI-CIRAM (Produto 6 – Tavares, 2019a) e, portanto, foi

executado utilizando os cenários de mudanças climáticas gerados a partir do modelo regional Eta, conforme será apresentado a seguir.

1.1 Objetivo

Cumprir o oitavo produto do Projeto CSI – Ampliação dos Serviços Climáticos para investimentos em Infraestruturas (PN: 16.9025.4-003.00), termo de referência: Geração de informações, a partir dos dados de projeções de mudanças climáticas, para subsidiar estudos em planejamento de investimentos para infraestruturas. O produto consiste em um relatório contendo a análise dos índices de instabilidade (Frentes Frias-FF e passagens Pré-Frontais-PF) para as principais áreas de interesse em Santa Catarina a partir dos resultados do Eta-20km forçado pelos modelos HadGEM2-ES, MIROC5 e CanESM2, e do Eta-5km forçado pelo HadGEM2-ES, ambos considerando o baseline, RCP4.5 e RCP8.5.

2. DADOS E METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

A área delimitada para confecção dos campos espaciais compreendeu todo o estado de Santa Catarina, conforme ilustrada na Figura 2.1. Uma análise mais criteriosa foi realizada para as mesorregiões Vale do Itajaí e Oeste, de acordo com os limites propostos pelo IBGE (2002), e para a caixa de grade do modelo referente a localidade do Porto de Itajaí. Essa última análise foi adicionada devido as FF associadas a extremos de ventos apresentarem uma influência local, ou seja, na área do Porto, o que difere das FF associadas a chuvas intensas, as quais apresentam uma influência espacial ao longo de toda a bacia do Rio Itajaí, principalmente quando as chuvas intensas ocorrem nas cabeceiras dos rios. A mesorregião Oeste, por incluir uma das principais linhas de transmissão da Eletrosul (Itá-Salto Santiago), também foi adicionada nas análises.



Figura 2.1 - Área selecionada para avaliar a incursão de Frentes Frias Intensas em Santa Catarina, com destaque para a localização do Porto de Itajaí e das mesorregiões Vale do Itajaí e Oeste Catarinense. Fonte: Produção da autora com base nos limites propostos pelo IBGE (2002).

2.2 Indicador de tempo severo

Conforme apresentado no Produto 6 (Tavares, 2019a), a partir da listagem de eventos de tempo severo passados pelos parceiros do Porto de Itajaí e pela EPAGRI-CIRAM (MMA-GIZ, 2018) foram selecionados casos de eventos de chuvas e ventos intensos associados a passagens de frentes frias e sistemas pré-frontais que provocaram danos estruturais e/ou interrupção das atividades do Porto. Com base nestes eventos e a partir das reanálises do ERA-

Interim e dados de chuvas, buscou-se identificar critérios objetivos para criação do indicador de FF com tempo severo. Além dos critérios padrão de identificação da passagem frontal, tais como: aumento na pressão ao nível médio do mar de, pelo menos, 2 - hPa em um período de 24 horas; queda da temperatura do ar em 925 hPa de pelo menos 2°C em 24 horas e vento de sul de, pelo menos, 2 m/s em 925 hPa (Foss, 2016; Foss et al., 2017), foram relacionados também limiares de chuvas acumuladas em 24 horas, intensidade máxima do vento, umidade específica e dos índices de instabilidade atmosférica CAPE e LI. A partir destes ingredientes atmosféricos, as frentes frias intensas foram divididas em dois grupos: **1- frentes frias associadas a chuvas extremas (percentil 95°)** e **2 - frentes frias associadas a vento extremo (percentil 99° do vento)**. Consideraram-se os valores de chuva superiores ao percentil 95° até 48 horas antes da passagem da FF, durante e até 48 horas após a passagem. Além dos percentis de chuva, foram adicionados mais três ingredientes atmosféricos: umidade específica em 925 hPa maior igual a 10,5 g/kg, CAPE maior igual a 445 J/kg e LI inferior a 0°C. Para estas três condições, o critério pôde ser satisfeito atingindo o valor de qualquer um dos ingredientes atmosféricos. No segundo grupo utilizou-se a estimativa dos percentis do vento máximo diário. Desse modo, para cada ponto de grade central ou oito pontos ao redor do ponto de grade central consideraram-se os valores de vento superiores ao percentil 99° até 24 horas antes e durante a passagem da FF. Um resumo dos critérios utilizados para a classificação das FF intensas seguem na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Critérios objetivos utilizados para classificação de Frentes Frias (FF) e sistemas Pré-Frontais (PF) associadas a tempo severo no estado de Santa Catarina.

Classificação	Descrição
FF + extremos de chuvas	Condição padrão de FF ¹ + Chuva diárias \geq Percentil 95° e UMES ² \geq 10,5 g/Kg ou CAPE ³ \geq 445 J/kg ou LI ⁴ < 0°C
FF + ventos intensos a 10 m	Condição padrão de FF ¹ + Vento máximo diário \geq Percentil 99°

¹Aumento na pressão ao nível médio do mar de, pelo menos, 2 - hPa em um período de 24 horas; queda da temperatura do ar em 925 hPa de pelo menos 2°C em 24 horas e vento de sul de, pelo menos, 2 m/s em 925 hPa (Foss, 2016; Foss et al., 2017)

² Umidade específica

³CAPE - Convective Available Potential Energy (Bluestein, 1993)

⁴ LI - Lifted Index (Galway, 1956)

O algoritmo de detecção foi construído para ler os dados necessários para execução em escala de tempo de 6 em 6 horas, considerando os horários sinóticos 00, 06, 12 e 18UTC, excetuando apenas os dados de chuva e dos percentis, e para disponibilizar o indicador de FF intensas em escala de tempo diária, ou seja, fornece o número de dias em que ocorreram presença de FF intensas num determinado ponto de grade.

2.3. Modelo Climático Eta

O modelo Eta é da categoria de modelos chamados de regionais ou de área limitada e que, portanto, necessitam de modelos globais para lhe fornecer informações da atmosfera nos contornos laterais. O modelo possui representação dos processos físicos e dinâmicos da atmosfera e inclui explicitamente os processos de mesoescala. Por admitir resoluções mais altas que os modelos globais, da ordem de dezenas de quilômetros ou menos, apresentam melhores detalhamentos das características da paisagem, como por exemplo, regiões de vale-montanha, linhas costeiras, áreas urbanas, podendo assim fornecer resultados mais refinados. Maiores detalhamentos do modelo em versão de mudanças climáticas podem ser encontrados em Lyra et al. (2017), Chou et al. (2014a) e Chou et al. (2014b).

Neste produto, foram utilizadas as simulações do modelo Eta aninhadas aos modelos HadGEM2-ES, CanESM2 e MIROC5 na resolução de 20 km e duplamente aninhadas ao modelo HadGEM2-ES na resolução de 5 km. Detalhamentos do segundo *downscaling* dinâmico na resolução de 5 km podem ser encontrados no Produto 7 (Tavares, 2019b). Foram utilizadas simulações do período histórico - *baseline* (1998-2010) e projeções do clima futuro (2011-2040).

2.3.1 Cenários RCP

As simulações do clima futuro são baseadas nos caminhos representativos de concentração dos Gases do Efeito Estufa (GEE) e suas forçantes radiativas no clima, chamados de *Representative Concentration Pathway* (RCP) (Moss et al., 2010). Neste produto, foi considerado um cenário de concentração intermediária (RCP4.5) e um de alta concentração (RCP8.5).

No cenário RCP4.5 é pressuposto que o forçamento radiativo se estabilizará pouco depois do ano de 2100 em 4.5 W.m^{-2} e a concentração de CO_2 equivalente será em torno de 650 ppm. Este cenário é considerado ambicioso com relação à redução de emissões e que, para atingir o valor proposto, teria que haver, por exemplo: políticas climáticas rigorosas, programas consistentes de reflorestamento, redução das áreas para agricultura e pastagens (devido ao aumento de produtividade) e mudanças de hábitos alimentares (Bjørnæs, 2013).

No cenário RCP8.5 é inferido que o forçamento radiativo será maior do que $8,5 \text{ W.m}^{-2}$ com concentração de CO_2 equivalente superior a 1.370 ppm, ou seja, um cenário pessimista (Moss et al., 2010). Este RCP é direcionado para um futuro sem mudanças das políticas públicas de redução das emissões, além de outras condicionantes tais como: falta de políticas climáticas, aumento de 3 vezes das emissões de CO_2 atuais até 2100, rápido aumento nas emissões de metano e aumento de áreas agrícolas e de pastagens, por exemplo (Bjørnæs, 2013). Apesar do cenário RCP8.5 ser direcionado para um futuro muito pessimista, as emissões de CO_2 registradas até o ano de 2015 apresentavam taxas a nível deste cenário (Figura 2.2a – linha vermelha). Neste mesmo ano, a cúpula do clima de Paris tentou alertar sobre os direcionamentos das emissões na tentativa de evitar os piores efeitos das mudanças, além de que na época a maior parte dos estudos sugeriam um aumento da temperatura média global de no mínimo 3°C (Figura 2.2a – linha marrom). O acordo firmado em Paris em 2015 parece que surtiu efeitos e as taxas atualizadas das emissões de CO_2 tiveram uma leve redução em relação aos anos anteriores (Figura 2.2b), todavia ainda há a preocupação em limitar o aquecimento até $1,5^\circ\text{C}$. Segundo o IPCC, um aumento de aproximadamente 2°C na temperatura média global poderá produzir impactos devastadores, incluindo, por exemplo, perda de quase todos os recifes de coral do mundo e ondas de calor extremas e com risco de vida que podem afetar mais de um terço da população mundial (IPCC, 2018). Para limitar o aquecimento até $1,5^\circ\text{C}$ os cenários exigem redução pela metade das emissões até 2030 e emissões líquidas zeradas até 2050 (Figura 2.2 b – curva roxa) (Le Quéré et al., 2018; GCP, 2018), uma meta considerada até então ambiciosa, ainda mais quando se depende da adesão aos programas de

descarbonização e compromisso das grandes potências mundiais em cumprir o acordo.

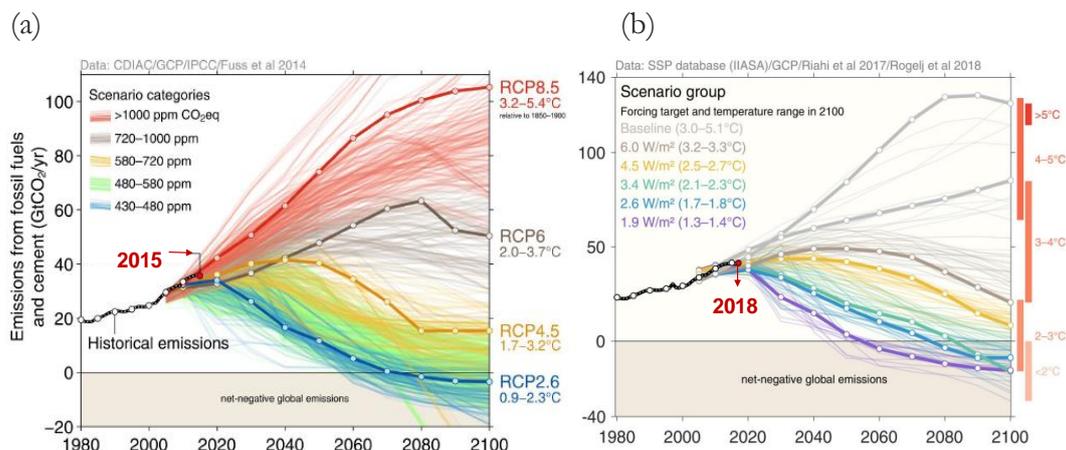


Figura 2.2 - Emissões global de CO₂ e características de emissão e temperatura de vários cenários RCPs - Representative Concentration Pathway (a) e SSPs – Shared Socio-economic Pathways (b). Fonte: Fuss et al. (2014), Riahi et al. (2017), Rogelj et al. (2018) e GCP (2018).

2.4 Componentes do Protocolo PIEVC

Com o objetivo de avaliar os possíveis riscos associados a mudança do clima nas infraestruturas selecionadas, utilizou-se a metodologia PIEVC (*Public Infrastructure Engineering Vulnerability Committee*, em inglês) desenvolvido pela instituição Engineers Canada (Protocolo PIEVC, 2016). De modo geral, a metodologia, também chamada de protocolo PIEVC fornece informações para auxiliar gestores e operadores a incluir de maneira efetiva ações de adaptação à mudança do clima em projetos de infraestruturas existentes e planejadas, influenciando na operação, manutenção e desenvolvimento. Uma das componentes necessárias para inserção no Protocolo consistem da classificação da escala de probabilidade e da robustez da informação climática, conforme serão descritas abaixo. É importante enfatizar que, as informações apresentadas a seguir foram ajustadas conforme delimitações já apresentadas pelos setores selecionados no estado de Santa Catarina (Eletrosul e Porto de Itajaí), a partir de oficinas realizadas em Florianópolis e Itajaí. As oficinas foram realizadas nas seguintes datas: 25-26/06/2019 e 19-20/09/2019 com os parceiros da Eletrosul e; 27/06/2019 e 17/09/2019 com os parceiros do Porto de Itajaí.

2.4.1 Escala de probabilidade

De acordo com o protocolo PIEVC, a classificação da probabilidade representa a frequência de ocorrência de um evento climático acima de um determinado limite. A escala de probabilidade e os valores para os sistemas meteorológicos selecionados foram decididos através do consenso entre os climatologistas, juntamente com os parceiros da Eletrosul e do Porto de Itajaí. No caso das FF intensas foi delimitado que a ocorrência varia de raro, ou seja, um ou dois eventos a cada 30 anos, até quase certo, a qual considera mais de 30 eventos a cada 30 anos, conforme descrito na Tabela 2.2. Os riscos são analisados a partir das condições climáticas atuais, através do período de base (*baseline*), e considerando as projeções do clima futuro, com base nos cenários RCPs.

Tabela 2.2 - Descrição da escala de probabilidade considerando o período de 30 anos

Escala de Probabilidade			
Categorias	Valor	Descrição	Pontuação
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

O cálculo da probabilidade descrito na Tabela 2.2 pode ser realizado através da equação mostrada abaixo. O total de eventos de FF intensas é dividido pelo tamanho da série e depois multiplicado por 100 para fornecer a informação em porcentagem.

A probabilidade pode ser calculada usando a seguinte equação:

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

2.4.2 Escala de robustez

A robustez delimita a qualidade da informação conforme o conjunto de dados climáticos utilizados, tanto para o período de base (clima atual) quanto para as projeções climáticas futuras (cenários RCPs). A robustez do período de base foi pontuada de acordo com quatro critérios, sendo eles: tamanho da série, raio de influência, qualidade da metodologia de medição e grau de

detecção da ameaça que causou o dano, conforme apresentado na Tabela 2.3. A robustez dos cenários de mudança climática foi pontuada de acordo com quatro critérios, a saber: quantidade de modelos globais de clima, convergência do sinal da mudança, diversidade de cenários de forçante radiativa e resolução espacial dos modelos (Tabela 2.4). A escala da pontuação da robustez para cada critério foi delimitada para variar de 1 a 3, sendo 1 classificada como baixa, 2 - média e 3 - alta.

Tabela 2.3 - Critérios para pontuação de robustez do clima atual

Critério	Pontuação	Descrição	Peso
Tamanho da série	1	1-10 anos	0,25
	2	11-20 anos	
	3	> 20 anos	
Raio de influência (densidade da rede observacional para capturar frentes intensas – chuva ou vento extremo)	1	Acima de 50 km	0,25
	2	5 km – 50 km	
	3	Até 5 km	
Qualidade da metodologia de medição	1	Indireto (SCM -> ventos fortes)	0,25
	2	Mesclado (p.ex., reanálise)	
	3	Direto (medição por sensor, p.ex., estação meteorológica ou satélite)	
Grau de detecção da ameaça que causou dano	1	Não foi confrontado	0,25
	2	Foi confrontado com literatura OU registros	
	3	Foi confrontado com literatura E registros	

Tabela 2.4 - Critérios para pontuação de robustez dos cenários de mudança climática

Critério	Pontuação	Descrição	Peso
Quantidade de modelos globais de clima	1	1 modelo	0,2
	2	2 modelos	
	3	3 ou mais modelos	
Convergência do sinal da mudança (concordância entre os modelos quanto ao sinal de mudança)	1	Usa-se apenas um modelo global; ou utiliza-se apenas dois modelos globais e eles discordam; ou 50% dos modelos concordam e considera-se a média entre os modelos	0,2
	2	Mais de 75% dos modelos concordam no sinal de mudança	
	3	Todos os modelos concordam no sinal de mudança	
Diversidade de cenários de forçante radiativa (RCPs)	1	Usa-se apenas o cenário de forçante radiativa moderado (RCP4.5) ou otimista (RCP2.6)	0,2
	2	Usa-se apenas o cenário de forçante radiativa pessimista (RCP8.5)	
	3	Usa-se o cenário de forçante radiativa pessimista (RCP8.5) em conjunto com outro cenário (p.ex., RCP4.5)	
Resolução espacial (downscaling ou não)	1	Resolução maior que 20km	0,2
	2	Resolução de 20km	
	3	Pelo menos uma projeção com resolução de 5km	

Após o cálculo da média entre os critérios a escala de robustez passou a ser classificada conforme descrito na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Escala de pontuação de robustez após o cálculo da média entre os critérios

Valor		Classe
Mín.	Máx.	
1	1,39	Baixa
1,4	1,79	Média-baixa
1,8	2,19	Média
2,2	2,59	Média-alta
2,6	3	Alta

Com o pressuposto que o clima futuro é mais incerto do que o clima atual, a pontuação de robustez dos cenários de mudança climática pode ser no máximo (caso a pontuação final seja 3) igual a pontuação de robustez atual. Sendo assim, o cálculo da robustez futura é relativo à robustez atual, de acordo com a seguinte equação:

$$R_{Futuro} = \frac{Q + C + D + R}{4} * \frac{1}{3} * R_{Atual}$$

Onde R_{Futuro} é a pontuação de robustez para as projeções climáticas, Q é o critério 'quantidade de modelos globais de clima', C é o critério 'Convergência do sinal da mudança', D é o critério 'Diversidade de cenários' e R é o critério 'Resolução espacial', e R_{Atual} é a pontuação de robustez atual definida pela Tabela 2.3.

Os resultados para a pontuação da robustez do clima presente e das projeções do clima futuro, bem como a pontuação da probabilidade de ocorrência das FF intensas seguem na seção de resultados.

3. RESULTADOS

3.1 Clima presente

Devido à importância dos percentis de chuva e do vento máximo diário na detecção dos eventos de FF intensas os mesmos foram avaliados separadamente. Para fins de informação, os valores médios dos percentis p95 de precipitação, bem como os valores médios do percentil p99 do vento para as mesorregiões Vale do Itajaí e Oeste e ponto de latitude e longitude do Porto de Itajaí seguem na Tabela 3.1. Todavia, vale ressaltar que para uso e aplicação na execução do indicador de tempo severo foram usados campos espaciais dos percentis, os quais consideram os valores destes em cada ponto de grade do domínio do dado utilizado. Na Tabela 3.1, os percentis de chuva foram estimados com base no dado MERGE-INPE (Rozante et al., 2010) e os percentis de vento a partir dos dados das reanálises do ERA-Interim do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), tomando como base o período de 1998-2010. Nota-se que os valores extremos mais altos de chuva e vento foram encontrados na mesorregião Oeste, sendo da ordem de 55 mm/dia e 46 km/h, respectivamente.

Tabela 3.1 - Valores referentes ao percentil 95º (p95) da precipitação diária e percentil 99º do vento máximo diário a 10 m. Foram considerados dados de precipitação oriundos do produto MERGE/INPE (Rozante et al., 2010) e dados da velocidade do vento nos horários sinóticos das 0000, 0600, 1200 e 1800Z das reanálises do ERA-Interim.

Mesorregião/ Localidade	p95_Prec (mm)	p99_VV10m (km/h)
Vale do Itajaí	44	42
Oeste Catarinense	55	46
Porto de Itajaí	46	43

Na aplicação do algoritmo de detecção para os cenários de mudanças climáticas foram usadas estimativas dos percentis, tanto da chuva quanto do vento máximo diário, a partir de cada modelo, tomando também como base o período de 1998-2010 (Figura 3.1). Através das análises dos campos espaciais, foi possível identificar que o modelo Eta, independentemente da condição de contorno dos modelos globais (Eta-HadGEM, Eta-CanESM e Eta-MIROC), tende, no geral, a subestimar os valores extremos de chuva e do vento máximo, excetuando as simulações do modelo em mais alta resolução horizontal. Em 5 km, verifica-se em algumas localidades, tais como no sul e oeste de Santa

Catarina, valores do percentil 99º do vento mais alto que as reanálises do ERA-Interim. Contudo, devido à baixa resolução das reanálises, o que tende a suavizar os extremos, não foi possível realizar uma avaliação mais criteriosa do desempenho do modelo.

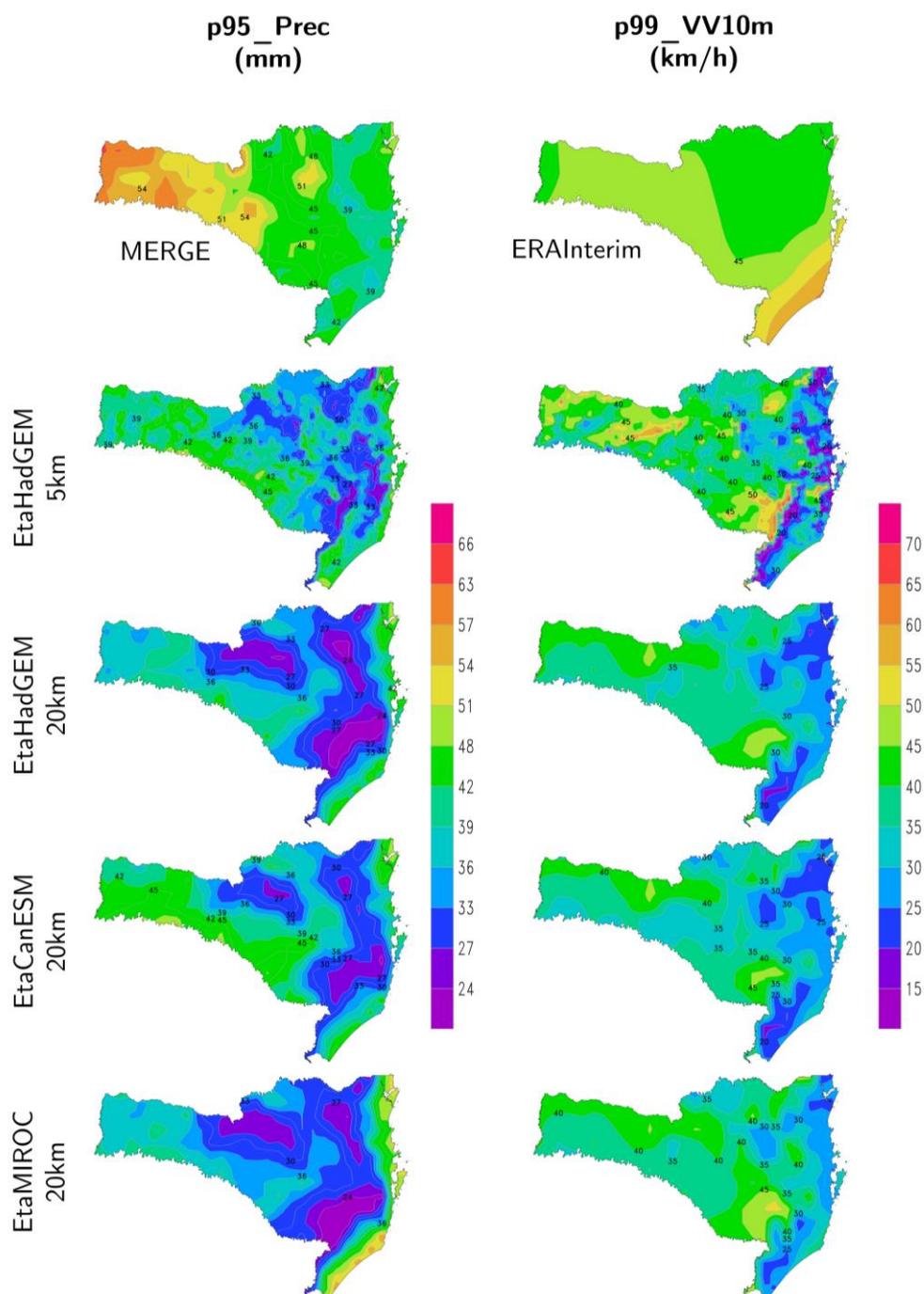


Figura 3.1 - Valores referentes ao percentil 95º (p95) da precipitação diária (p95_Prec) (coluna da esquerda) e ao percentil 99º do vento máximo diário (km/h) (coluna da direita). Estimativas para o período de 1998-2010 tomando como base os dados observados de precipitação diária do conjunto MERGE e vento a 10 m das reanálises do ERA-Interim, além das saídas do modelo Eta-HadGEM 5km, Eta-HadGEM 20 km, Eta-CanESM 20km e Eta-MIROC 20km.

Em relação ao desempenho do modelo na detecção das FF em geral e das FF intensas, verifica-se que os resultados são distintos e dependem da mesorregião analisada (Figura 3.2). No que concerne as FF em geral, o Eta tende a superestimar os valores médios anuais na mesorregião Oeste, todavia nesta mesma mesorregião apresenta resultados razoáveis para as FF associadas a chuvas e a ventos intensos. Na mesorregião do Vale do Itajaí, o modelo subestima o valor médio anual das FF associadas a chuvas intensas e superestima das FF associadas a ventos intensos. Com intuito de eliminar os desvios sistemáticos na detecção das FF, foi removido dos cenários climáticos futuros os erros médios anuais calculado com base nos dados das reanálises do ERA-Interim. Os resultados das projeções climáticas, já com ajustes dos erros sistemáticos, seguem na subseção a seguir.

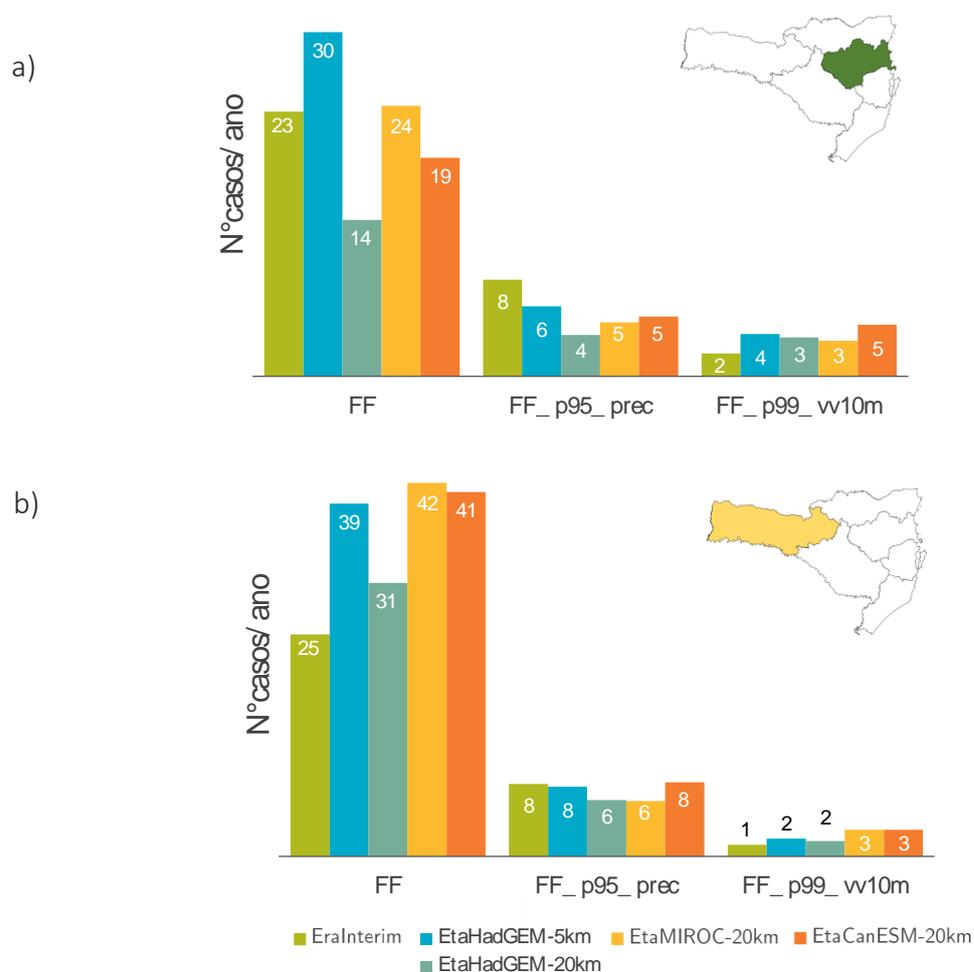


Figura 3.2 - Número médio anual de Frentes Frias (FF) e FF associadas a chuvas intensas (FF_p95_prec) e ventos intensos (FF_p99_vv10m) com base no período de 1998 a 2010. A climatologia foi obtida através dos dados das reanálises do ERA-Interim para o nível atmosférico de 925 hPa e das saídas do modelo Eta-HadGEM 5km, Eta-HadGEM 20 km, Eta-CanESM 20km e Eta-MIROC 20km. Valores médios para as mesorregiões (a) Vale do Itajaí e (b) Oeste Catarinense.

3.2 Projeções climáticas

São apresentados a seguir apenas os valores médios anuais e mensais das FF nas mesorregiões Vale do Itajaí e Oeste Catarinense e no ponto de grade do modelo referente a localidade do Porto de Itajaí. Os campos espaciais dos valores médios anuais e das diferenças entre as projeções climáticas e o período *baseline* seguem nos Apêndices A e B.

Na mesorregião Vale do Itajaí as projeções apresentam sinal misto de mudança em comparação com o período *baseline* para as FF em geral, com 3 modelos apontando aumento, 3 indicando valores dentro da normalidade (atuais) e 2 mostrando diminuição (Figura 3.3a). Por outro lado, para as FF intensas os modelos apresentam sinal mais claro, com redução dos casos de FF associadas a vento intenso (Figura 3.3b) e aumento das FF associadas a extremos de chuva (Figura 3.3c). No entanto, quando se considera apenas a localidade do Porto do Itajaí quase todos os modelos convergem para o aumento das FF associadas a vento intenso (Figura 3.3d). O modelo Eta-HadGEM 5km apesar de não mostrar sinal de aumento no cenário RCP4.5 o valor médio de 2 casos/ano, de acordo com a tabela de probabilidade de risco, é considerado como risco quase certo, ou seja, mais de 30 eventos a cada 30 anos. Na mesorregião Oeste Catarinense o sinal é bem mais claro em comparação a mesorregião Vale do Itajaí, no sentido da convergência dos modelos, com aumento dos casos das FF em geral e das FF associadas a extremos de chuva e vento. Segue sumarizado na Tabela 3.2 o resumo com o sinal da mudança das FF nos cenários climáticos futuros. Vale ressaltar que, estes resultados foram agrupados independentemente do cenário RCP projetado.

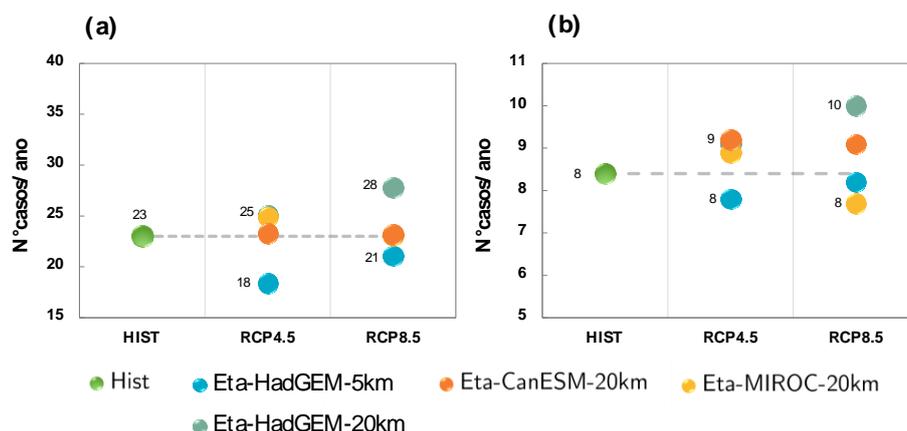


Figura 3.3 - Número médio anual de (a) Frentes Frias (FF) e (b) FF associadas a chuvas intensas (FF_p95_prec) e (c) ventos intensos (FF_p99_vv10m) para a mesorregião Vale do Itajaí e; (d) FF associadas a vento intenso para o ponto de grade referente ao Porto de Itajaí, ambos localizados no estado de Santa Catarina. Valores do período histórico (1998-2010) obtidos das reanálises do ERA-Interim e para as projeções do clima futuro, cenários RCP4.5 e RCP8.5, obtidos dos modelos EtaHadGEM2-ES-5km, EtaHadGEM2-ES-20km, EtaCanESM-20km e EtaMIROC5-20km. A FF foram identificadas em cada ponto de grade considerando o nível atmosférico de 925 hPa. (continua)

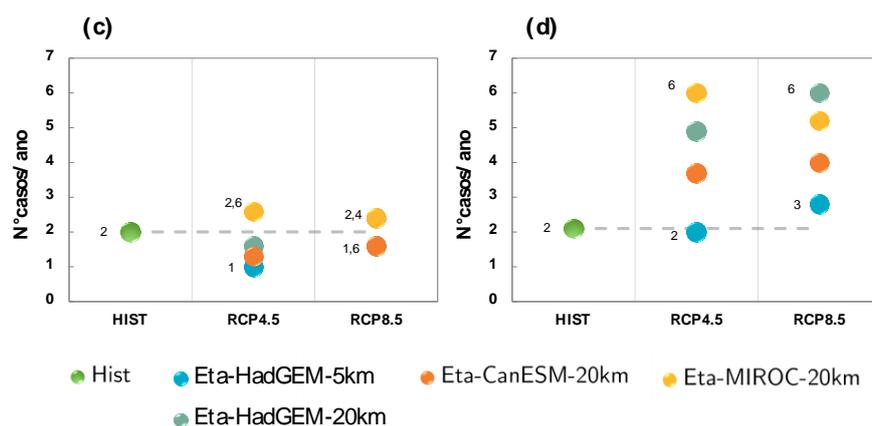


Figura 3.3 - Número médio anual de (a) Frentes Frias (FF) e (b) FF associadas a chuvas intensas (FF_p95_prec) e (c) ventos intensos (FF_p99_vv10m) para a mesorregião Vale do Itajaí e; (d) FF associadas a vento intenso para o ponto de grade referente ao Porto de Itajaí, ambos localizados no estado de Santa Catarina. Valores do período histórico (1998-2010) obtidos das reanálises do ERA-Interim e para as projeções do clima futuro, cenários RCP4.5 e RCP8.5, obtidos dos modelos Eta5km-SC (forçado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES-20km) e os modelos EtaHadGEM2-ES-20km, EtaCanESM-20km e EtaMIROC5-20km. A FF foram identificadas em cada ponto de grade considerando o nível atmosférico de 925 hPa. (fim).

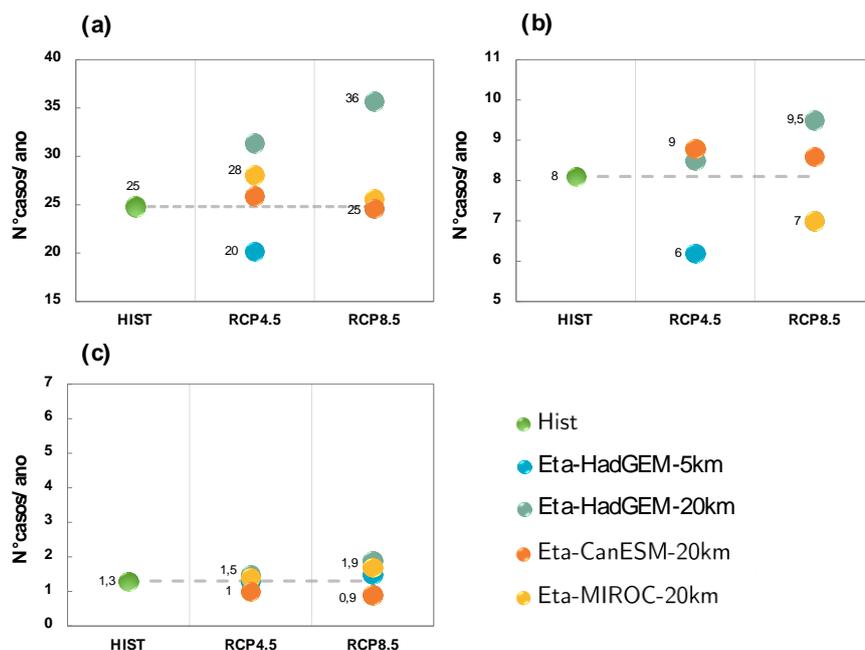


Figura 3.4 - Número médio anual de (a) Frentes Frias (FF) e (b) FF associadas a chuvas intensas (FF_p95_prec) e (c) ventos intensos (FF_p99_vv10m) para a mesorregião Oeste do estado de Santa Catarina- SC. Valores do período histórico (1998-2010), obtido das reanálises do ERA-Interim, e para as projeções do clima futuro, cenários RCP4.5 e RCP8.5, obtidos dos modelos Eta5km-SC (forçado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES-20km) e os modelos EtaHadGEM2-ES-20km, EtaCanESM-20km e EtaMIROC5-20km. A FF foram identificadas em cada ponto de grade considerando o nível atmosférico de 925 hPa.

Tabela 3.2 - Sinal da mudança das Frentes Frias nos cenários climáticos futuros, com base num conjunto de 8 membros do modelo Eta, sendo eles: projeções de dois cenários RCPs, RCP4.5 e RCP8.5, a partir das simulações dos modelos Eta-HadGEM 5km, Eta-HadGEM 20km, Eta-CanESM 20km e Eta-MIROC 20km. FF- Frentes Frias em geral; FF_p95_Prec - FF associadas a chuvas intensas; e FF_p99_VV10m - FF associadas a vento intenso. ↑ representa sinal de aumento, ou seja, aumento dos valores médios anuais das FF em relação ao período baseline, ↓ representa sinal de redução e ≅ ↑ representa sinal misto, ou seja, ligeiramente igual e acima dos valores registrados no período baseline. Para a caixa de grade do modelo referente a localidade do Porto do Itajaí foi apresentado apenas o sinal das FF associadas a vento intenso. A abreviação "Quant." refere-se à quantidade de modelos que apresentaram tal sinal.

Mesorregião/ Localidade	FF		FF_p95_Prec		FF_p99_VV10m	
	Sinal	Quant.	Sinal	Quant.	Sinal	Quant.
Vale do Itajaí	≅ ↑	3/3	↑	5	↓	5
Oeste Catarinense	↑	5	↑	5	↑	5
Porto de Itajaí	-	-	-	-	↑	7

A frequência média mensal de incursões de FF nas mesorregiões Vale do Itajaí e Oeste Catarinense é mostrada nas Figuras 3.3 e 3.4. As FF, em geral, são mais frequentes no período de Junho-Julho-Agosto (JJA), meses do inverno austral, e as projeções indicam que as maiores frequências tendem a permanecer nestes mesmos meses, com valores da ordem de 3-4 FF/mês. Em relação frequência mensal das FF associadas a extremos de chuvas, os meses

de maior frequência correspondem ao período da primavera austral (Setembro-Outubro-Novembro/SON), sendo outubro o mês de maior ocorrência. Para estas FF as projeções indicam que as maiores frequências ainda ocorrerão na mesma estação do ano, com número máximo ocorrendo ainda no mesmo mês, em ambas mesorregiões analisadas. Para as FF associadas a vento extremo, o período de maior frequência continua o mesmo, ou seja, final do inverno início da primavera, continuando agosto como o mês de maior frequência, todavia algumas projeções indicam que o mês de maior frequência passará a ser junho, quando considerada a mesorregião Vale do Itajaí. No caso da mesorregião Oeste Catarinense, as projeções divergem tornando dificultoso identificar o mês de maior ocorrência, contudo tendem a projetar as maiores frequências ocorrendo ainda nas estações do inverno-primavera austral.

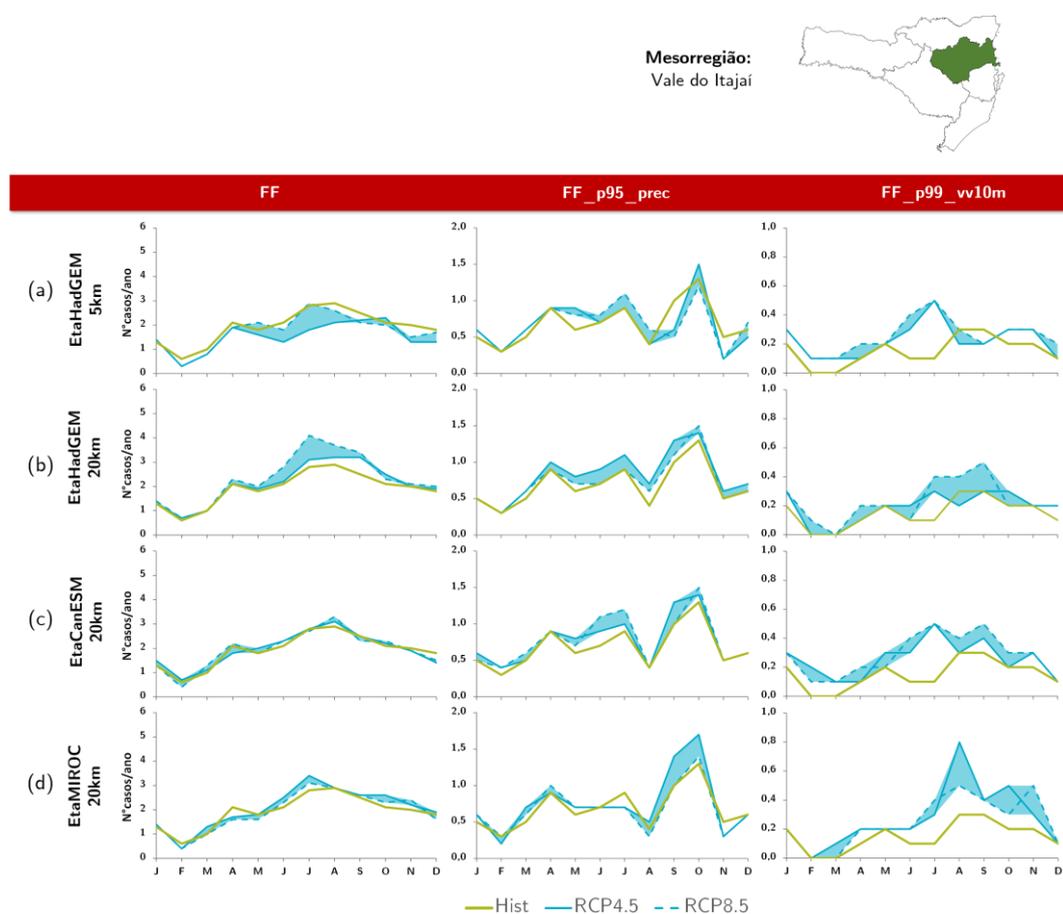


Figura 3.5 - Número médio mensal de (a) Frentes Frias (FF) e (b) FF associadas a chuvas intensas (FF_p95_prec) e (c) ventos intensos (FF_p99_vv10m) para a mesorregião Vale do Itajaí do estado de Santa Catarina- SC. Valores do período histórico (1998-2010) obtidos das reanálises do ERA-Interim e para as projeções do clima futuro, cenários RCP4.5 e RCP8.5, obtidos dos modelos (a) Eta5km-SC (forçado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES-20km) e os modelos (b) EtaHadGEM2-ES-20km, (c) EtaCanESM-20km e (d) EtaMIROC5-20km. A FF foram identificadas em cada ponto de grade considerando o nível atmosférico de 925 hPa.

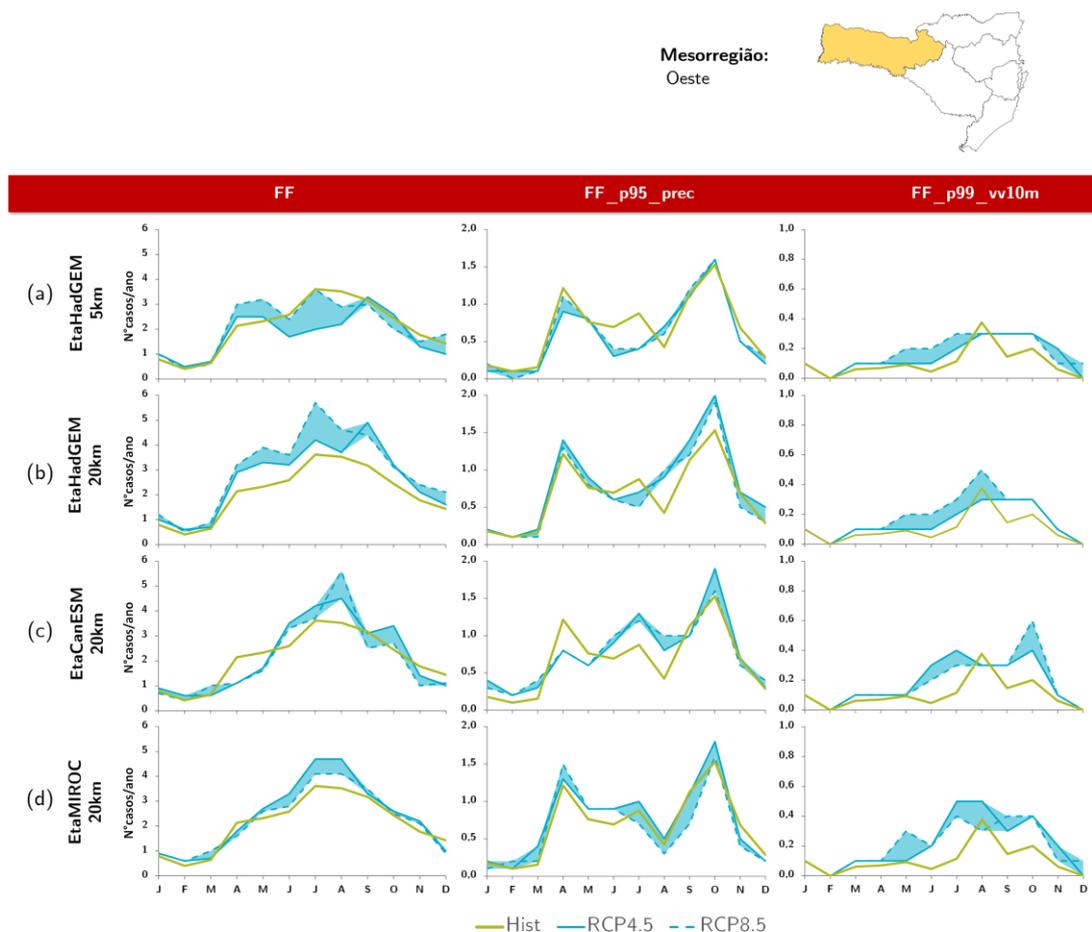


Figura 3.6 - Número médio mensal de (a) Frentes Frias (FF) e (b) FF associadas a chuvas intensas (FF_p95_prec) e (c) ventos intensos (FF_p99_vv10m) para a mesorregião Oeste do estado de Santa Catarina- SC. Valores do período histórico (1998-2010) obtidos das reanálises do ERA-Interim e para as projeções do clima futuro, cenários RCP4.5 e RCP8.5, obtidos dos modelos (a) Eta5km-SC (forçado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES-20km) e os modelos (b) EtaHadGEM2-ES-20km, (c) EtaCanESM-20km e (d) EtaMIROC5-20km. A FF foram identificadas em cada ponto de grade considerando o nível atmosférico de 925 hPa.

3.3 Classificação da robustez e probabilidade – *Baseline* e projeções dos cenários RCPs

Nas Tabelas 3.3 e 3.4 estão apresentados os valores da pontuação da robustez das informações climáticas para o clima presente e para as projeções dos cenários futuros, respectivamente. A pontuação seguiu os critérios apresentados na subseção 2.4.2. Por apresentar sinal de mudança igual, os resultados da pontuação da probabilidade para o Porto de Itajaí e das linhas de transmissão da Eletrosul (linhas Itá-Salto Santiago e Biguaçu-Blumenau) foram agrupados em uma única tabela (Tabela 3.5). A pontuação seguiu os critérios apresentados na subseção 2.4.1. Vale ressaltar que, para as FF associadas a

extremos de vento foi considerado os resultados referentes a caixa de grade do modelo para o Porto de Itajaí, devido à ameaça climática ter influência mais local. Contudo, para as linhas da Eletrosul foi considerado os valores médios das mesorregiões. A linha Ita-Salto Santiago está inserida na mesorregião Oeste Catarinense enquanto que a linha Biguaçu-Blumenau perpassa grande parte da mesorregião Vale do Itajaí. Outro ponto importante a ressaltar é que como as ameaças climáticas apresentaram a mesma pontuação de probabilidade no clima presente e nas projeções do clima futuro, a pontuação do clima presente foi reduzida com intuito de indicar o aumento da frequência de tais eventos nos cenários climáticos futuros.

Tabela 3.3 - Pontuação de Robustez das informações sobre o clima atual

Ameaça	Tamanho da série		Raio de influência		Qualidade da metodologia de medição		Grau de detecção da ameaça que causou dano		Total	
	Valor	Obs	Valor	Obs	Valor	Obs	Valor	Obs	Valor	Classificação
FF+Prec	2	13 anos	1	> 50km	3	Reanálise ERA-Interim e MERGE (inclui estação meteorológica)	3	Confrontado com literatura e registros	2,25	Média-alta
FF+Vento	2	13 anos	1	> 50km	2	Reanálise ERA-Interim	2	Registros	1,75	Média-baixa

Tabela 3.4 - Pontuação de Robustez das informações dos cenários de mudança climática para o Porto de Itajaí e para as linhas de transmissão da Eletrosul (linhas Ita-Salto Santiago e Biguaçu-Blumenau)

Ameaça	Quantidade de modelos globais de clima		Convergência do sinal		Diversidade de cenários RCPs		Resolução espacial		TOTAL	
	Valor	Obs	Valor	Obs	Valor	Obs	Valor	Obs	Valor	Class.
FF + Prec	3	HadGEM2-ES, MIROC5 e CanESM	2	Apesar de não apresentarem o mesmo sinal de mudança, a maior parte dos modelos indicaram sinal de aumento	3	RCP4.5 e RCP8.5	3	3 modelos em 20km e 1 em 5km	2,06	Média
FF + Vento	3	HadGEM2-ES, MIROC5 e CanESM	2	Apesar de não apresentarem o mesmo sinal de mudança, a maior parte dos modelos indicaram sinal de aumento	3	RCP4.5 e RCP8.5	3	3 modelos em 20km e 1 em 5km	1,60	Média-baixa

Tabela 3.5 – Probabilidade atual e futura de ocorrência de ameaças climáticas para o Porto de Itajaí e as linhas de transmissão da Eletrosul (linhas Itá-Salto Santiago e Biguaçu-Blumenau).

Ameaça	ATUAL			FUTURA		
	Prob.	Observação	Robustez	Prob.	Observação	Robustez
FF+Prec	4	Apesar de apresentarem a mesma pontuação (=5), o período futuro apresenta maior frequência. Sendo assim, a pontuação para o clima atual foi reduzida para 4	Média-alta	5	Maior parte dos modelos avaliados apresenta aumento da frequência de FF associadas a chuvas intensas.	Média
FF+Vento	4	Apesar de apresentarem a mesma pontuação (=5), o período futuro apresenta maior frequência. Sendo assim, a pontuação para o clima atual foi reduzida para 4	Média-baixa	5	Maior parte dos modelos avaliados apresenta aumento da frequência de FF associadas a vento intenso.	Média-baixa

4. SÍNTESE E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste produto, foram apresentadas as projeções da ocorrência de eventos de Frentes Frias intensas no estado de Santa Catarina em cenários climáticos futuros. As análises foram baseadas nos cenários de concentração RCP4.5 e RCP8.5 gerados a partir do modelo regional Eta. Foram usadas simulações do modelo aninhado aos modelos globais HadGEM2-ES, CanESM2 e MIROC5 na resolução horizontal de 20 km e um duplo aninhamento do modelo HadGEM2-ES na resolução horizontal de 5 km. As análises foram realizadas com foco nas mesorregiões Vale do Itajaí e Oeste Catarinense, além da caixa de grade do modelo referente a localidade do Porto de Itajaí, regiões de interesse dos Parceiros do Porto de Itajaí e da Eletrosul. Foram usadas simulações do período histórico (1998-2010) e projeções do clima futuro para o período de 2011-2040. A climatologia das FF intensas calculada a partir das reanálises atmosféricas do ERA-Interim foi utilizada para avaliar o desempenho do modelo e remover possíveis erros sistemáticos na detecção destes tipos de eventos. Devido à natureza dos eventos FF intensas, ou seja, podem ocorrer ou não ocorrer em um ou outro ano, as avaliações foram baseadas em valores médios da série temporal e a análise da mudança foi toda baseada em convergência do sinal entre os modelos e os cenários utilizados. Um método mais próximo da

metodologia usada no IPCC, que utiliza o conceito de confiança, ou seja, valida a informação com base na quantidade, qualidade e consistência da evidência e no grau de concordância (Cubash et al., 2013), excluindo das suas análises testes de significância estatística para avaliar projeções de mudanças climáticas. Portanto, como supracitado, neste produto a confiabilidade da informação foi fornecida a partir do grau de concordância do sinal, ou seja, o que a maior parte dos modelos estavam indicando. A partir disso, identificou-se na mesorregião Vale do Itajaí e Oeste Catarinense que as FF associadas a chuvas extremas tendem a aumentar. Considerando a caixa de grade do modelo referente ao Porto de Itajaí e o valor médio da mesorregião Oeste Catarinense, as FF associadas a extremos de vento também tendem a aumentar. Os valores médios da frequência para estes tipos de eventos no clima presente de acordo com a escala de probabilidade já se apresentam como risco “quase certo” (mais de 30 eventos a cada 30 anos) e nas projeções tendem a permanecer nesta mesma categoria, ou seja, as regiões que já são expostas a estes tipos de eventos tendem a continuar nos cenários climáticos futuros.

Apesar dos resultados apresentados neste produto já sinalizarem a frequência das FF intensas em cenários de mudanças climáticas ainda é sugerido os seguintes aprimoramentos: 1. uso de reanálises atmosféricas em mais alta resolução horizontal, tais como o ERA5 (Hersbach et al., 2019), com intuito de fornecer uma avaliação mais criteriosa, tendo em vista que a resolução horizontal dessa reanálise (25 km) é mais próxima das resoluções dos modelos atmosféricos; 2. uso de mais cenários de concentração dos GEE com a finalidade de incluir a incerteza em relação as emissões futuras e; 3. um conjunto (*ensemble*) maior de modelos climáticos, ou seja, simulações regionalizadas a partir de diversos modelos globais do IPCC, com intuito de caracterizar a variabilidade entre modelos e minimizar as incertezas físicas da modelagem, além de contribuir, de modo geral, para refinamento da consistência do sinal da mudança.

Anexo a este produto serão encaminhados os arquivos do indicador FF intensa calculado a partir das reanálises do ERA-Interim (período histórico) e das projeções dos cenários RCP4.5 e RCP8.5 (2011-2040). Os arquivos serão

disponibilizados em formato *raster*, com intuito de facilitar a leitura em qualquer software GIS (*Geographic Information System*).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BJØRNÆS, C. A guide to Representative Concentration Pathways. CICERO. Center for International Climate and Environmental Research, 2013.
- BLUESTEIN, H. Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes. Oxford university Press, 594 pp., 1993.
- CHOU, S. C.; LYRA, A. A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; et al. Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. *American Journal of Climate Change*, v. 3, p. 512-527, 2014a. DOI: 10.4236/ajcc.2014.35043
- CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. S.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENGO, J. Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. *American Journal of Climate Change*, v. 3, n. 05, p. 438, 2014b. doi: 10.4236/ajcc.2014.35039
- CORONESE, M.; LAMPERTI, F.; KELLER, K.; CHIAROMONTE, F.; ROVENTINI, A. Evidence for sharp increase in the economic damages of extreme natural disasters. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 116, n. 43, p. 21450-21455, 2019. doi: 10.1073/pnas.1907826116
- DIAS, M. A. F. S. Eventos climáticos extremos. *Revista USP*, n. 103, p. 33-40, 2014. DOI: 10.11606/issn.2316-9036.v0i103p33-40
- CUBASCH, U. et al. Introduction. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.
- ESCOBAR, G. C. J.; SELUCHI, M. E.; ANDRADE, K. Classificação sinótica de frentes frias associadas a chuvas extremas no leste de Santa Catarina (SC). *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.31. n. 4(suppl), 649-661, 2016. DOI: 10.1590/0102-778632120150095
- ESCOBAR G. Jatós de Altos Níveis, In: IRACEMA F.A. CAVALCANTI; NELSON J. FERREIRA, MARIA JUSTI DA SILVA; MARIA ASSUNÇÃO S. DIAS (Org.). *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de textos, 2009.
- ESPINOZA, J. C.; MARENGO, J. A.; RONCHAIL, J., CARPIO, J. M., FLORES, L. N.; GUYOT, J. L. The extreme 2014 flood in south-western Amazon basin: the role of tropical-subtropical South Atlantic SST gradient. *Environmental Research Letters*, v. 9, n. 12, p. 124007, 2014. doi:10.1088/1748-9326/9/12/124007.
- FOSS, M. Efeitos da orografia do sudeste da América do Sul na estrutura dos sistemas frontais. Tese (doutorado) -- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. Doutorado em Meteorologia. São José dos Campos, 2016

FOSS, M.; CHOU, S. C.; SELUCHI, M. E. Interaction of cold fronts with the Brazilian Plateau: a climatological analysis. *International Journal of Climatology*, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.4945>

FUSS, S. et al. Betting on negative emissions. *Nature climate change*, v. 4, n. 10, p. 850, 2014. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nclimate2392.pdf>

GALWAY, J. G. The lifted index as a predictor of latent instability. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, v. 43, p. 528-529, 1956.

GCP, 2018: Global Carbon Budget. Disponível em: https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/18/files/GCP_CarbonBudget_2018.pdf. Acesso: 3 jul. 2019.

GROISMAN, P. Y.; KNIGHT, R. W.; EASTERLING, D. R.; KARL, T. R.; HEGERL, G. C.; RAZUVAEV, V. N. Trends in intense precipitation in the climate record. *Journal of Climate*, V. 18, n. 9, p. 1326-1350, 2005. doi: 10.1175/JCLI3339.1.

IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.

LE QUÉRÉ, C. et al. Global carbon budget 2018. *Earth System Science Data* (Online), 10(4), 2018. doi: 10.5194/essd-10-2141-2018

LYRA, A. A.; TAVARES, P. S.; CHOU, S. C.; SUEIRO, G.; DEREZYNSKI, C.; SONDERMAN, M.; SILVA, A.; MARENGO, J.; GIAROLLA, A. 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*, p. 1-20, 2017. doi: 10.1007/s00704-017-2067-z

MARENGO, J. A.; RUSTICUCCI, M.; PENALBA, O.; RENOM, M. An intercomparison of observed and simulated extreme rainfall and temperature events during the last half of the twentieth century: part 2: historical trends. *Climatic Change*, v. 98, n. 3-4, p. 509-529, 2010. doi 10.1007/s10584-009-9743-7

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; SOARES, W. R.; RODRIGUEZ, D. A.; CAMARGO, H.; RIVEROS, M. P.; PABLÓ, A. D. Two contrasting severe seasonal extremes in tropical South America in 2012: flood in Amazonia and drought in northeast Brazil. *Journal of climate*, v. 26, n. 22, p. 9137-9154, 2013. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00642.1.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA)- DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT (GIZ). Relatório produto 2: revisão bibliográfica, com foco na Região Sul, referente aos eventos meteorológicos causadores de danos e prejuízos às linhas de transmissão da Eletrosul (LT's) e ao Porto de Itajaí. Ampliação dos Serviços Climáticos para Investimentos em Infraestrutura (CSI). Ministério do Meio Ambiente (MMA) e Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Brasília, DF. 29 pp., 2018.

MOSS, R. H.; EDMONDS, J. A.; HIBBARD, K. A.; MANNING, M. R.; ROSE, S. K.; VAN VUUREN, D. P.; CARTER, T. R.; EMORI, S.; KAINUMA, M.; KRAM, T.; MEEHL, G. A.; MITCHELL, J. F. B.; NAKICENOVIC, N.; RIAHI, K.; SMITH, S. J.; STOUFFER, R. J.; THOMSON, A. M.; WEYANT, J. P.; WILBANKS, T. J. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, v. 463, n. 7282, p. 747-756, 2010. doi:10.1038/nature08823

PROTOCOLO PIEVC. Engineering Protocol for Infrastructure Vulnerability Assessment and Adaptation to a Changing Climate. [s.l: s.n.].

RIAHI, K. et al. The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Global Environmental Change*, v. 42, p. 153-168, 2017. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009

ROGELJ, J. et al. Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 C. *Nature Climate Change*, v. 8, n. 4, p. 325, 2018. doi: 10.1038/s41558-018-0091-3

ROZANTE, J.R.; Moreira, D.S.; GONÇALVES., L.G.G.; VILA, D.A. Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: Technique and Validation Over South America. *Weather and Forecasting*, v. 25, p. 885-894, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1175/2010WAF2222325.1>

SALIO, P.; NICOLINI, M.; ZIPSER, E.J. Mesoscale convective systems over southeastern South America and their relationship with the South American low-level jet. *Monthly Weather Review*, v. 135, n. 4, p. 1290-1309, 2007.

SELUCHI, M.; BEU, CÁSSIA; ANDRADE, K. M. Características das Frentes Frias Causadoras de Chuvas Intensas no Leste de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 32, n. 1, 25-37, 2017. DOI:10.1590/0102-778632120150095

SEVERO, D. L. Estudo de casos de chuvas intensas no estado de Santa Catarina. 1994. 97p. 1994. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1994.

TAVARES, P. S. MMA -GIZ. Produto 6: Relatório contendo os Índices de Instabilidade Atmosférica (IIA) calculados a partir das reanálises, identificando os valores típicos e ajustando os limiares dos eventos de tempestades severas ocasionados por passagens de Frentes Frias (FF) e sistemas Pré Frontais (PF). 2019a.

TAVARES, P. S. MMA -GIZ. Produto 7: Relatório contendo a descrição da integração do modelo E ta5km SC forçado pelo modelo Eta20km HadGEM2 ES RCP8.5 para o período de 2011 a 2040. Figuras ilustrando distribuição espacial de temperatura e precipitação a cada 5 anos para o período de 2011 a 2040. 2019b.

ZENG, N.; YOON, J. H.; MARENGO, J. A.; SUBRAMANIAM, A.; NOBRE, C. A.; MARIOTTI, A.; NEELIN, J. D. Causes and impacts of the 2005 Amazon drought. *Environmental Research Letters*, v. 3, n. 1, p. 014002, 2008. doi:10.1088/1748-9326/3/1/014002.

APÊNDICE A: Campos médios anuais de Frentes Frias (FF) e FF associadas a chuvas intensas e ventos intensos

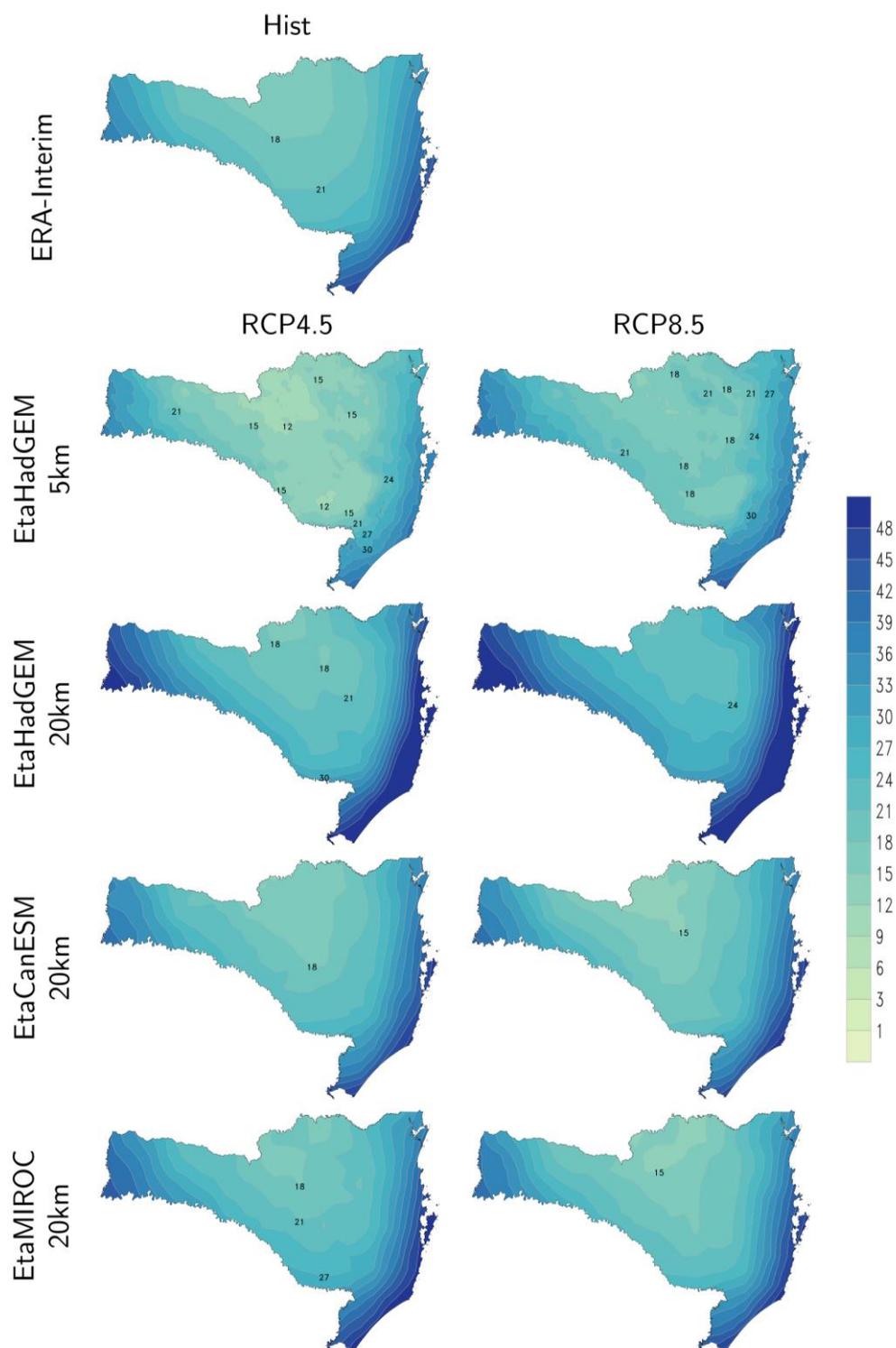


Figura A.1 - Número médio anual de Frentes Frias (FF) para o período histórico (1998-2010), obtido através dos dados de reanálise do ERA-Interim, e para projeções do clima futuro (2011-2040), cenários RCP4.5 e RCP8.5, obtidos dos modelos Eta5km-SC (forçado pelo modelo EtaHadGEM2-ES-20km) e os modelos EtaHadGEM2-ES-20km, EtaCanESM-20km e EtaMIROC5-20km. A FF foram identificadas em cada ponto de grade considerando o nível atmosférico de 925 hPa.

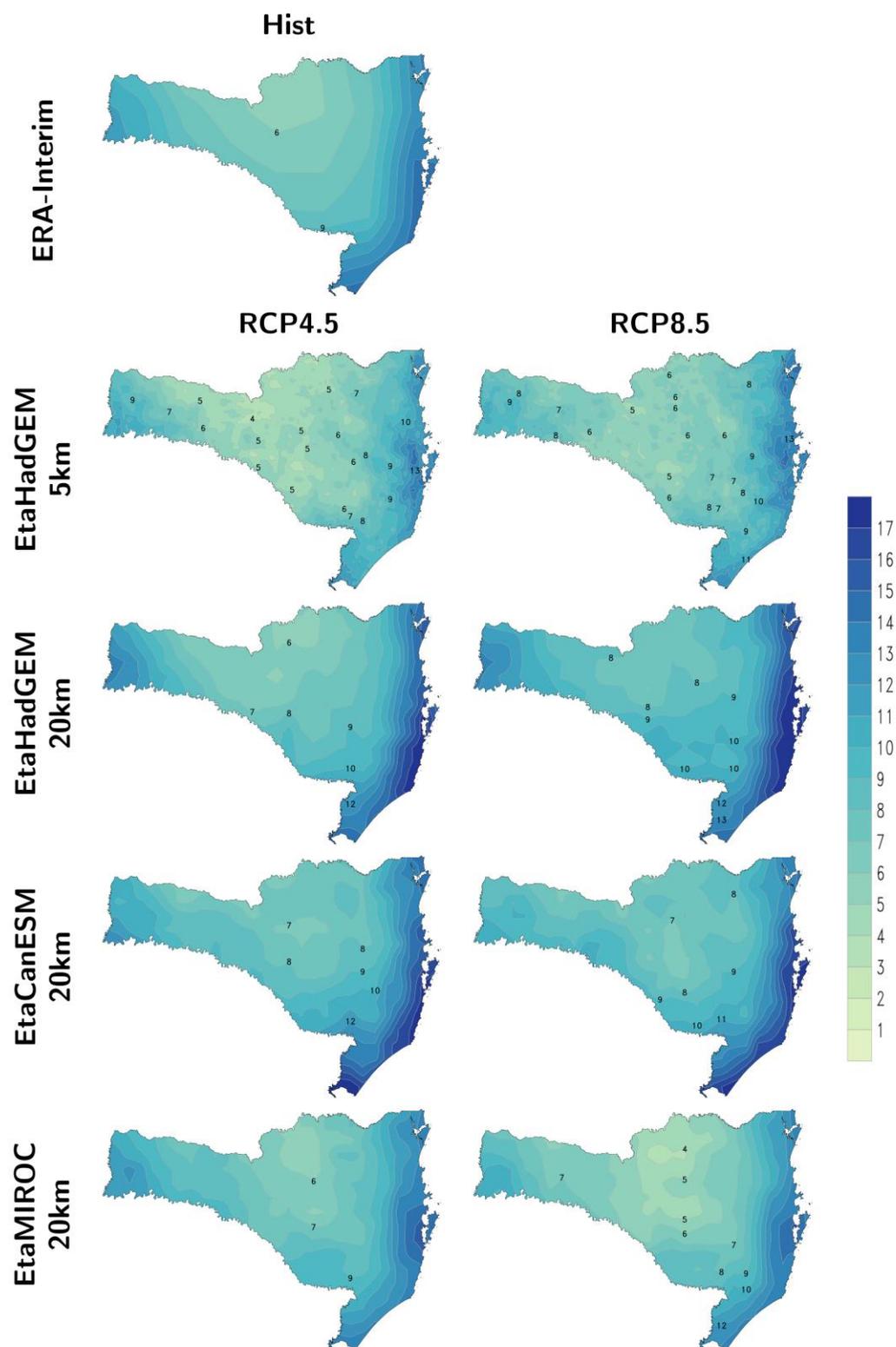


Figura A.2 - Número médio anual de Frentes Frias (FF) associadas com chuvas intensas (percentil 95°) para o período histórico (1998-2010), obtido através dos dados de reanálise do ERA-Interim, e para projeções do clima futuro (2011-2040), cenários RCP4.5 e RCP8.5, obtidos dos modelos Eta5km-SC (forçado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES-20km) e os modelos EtaHadGEM2-ES-20km, EtaCanESM-20km e EtaMIROC5-20km. A FF foram identificadas em cada ponto de grade considerando o nível atmosférico de 925 hPa.

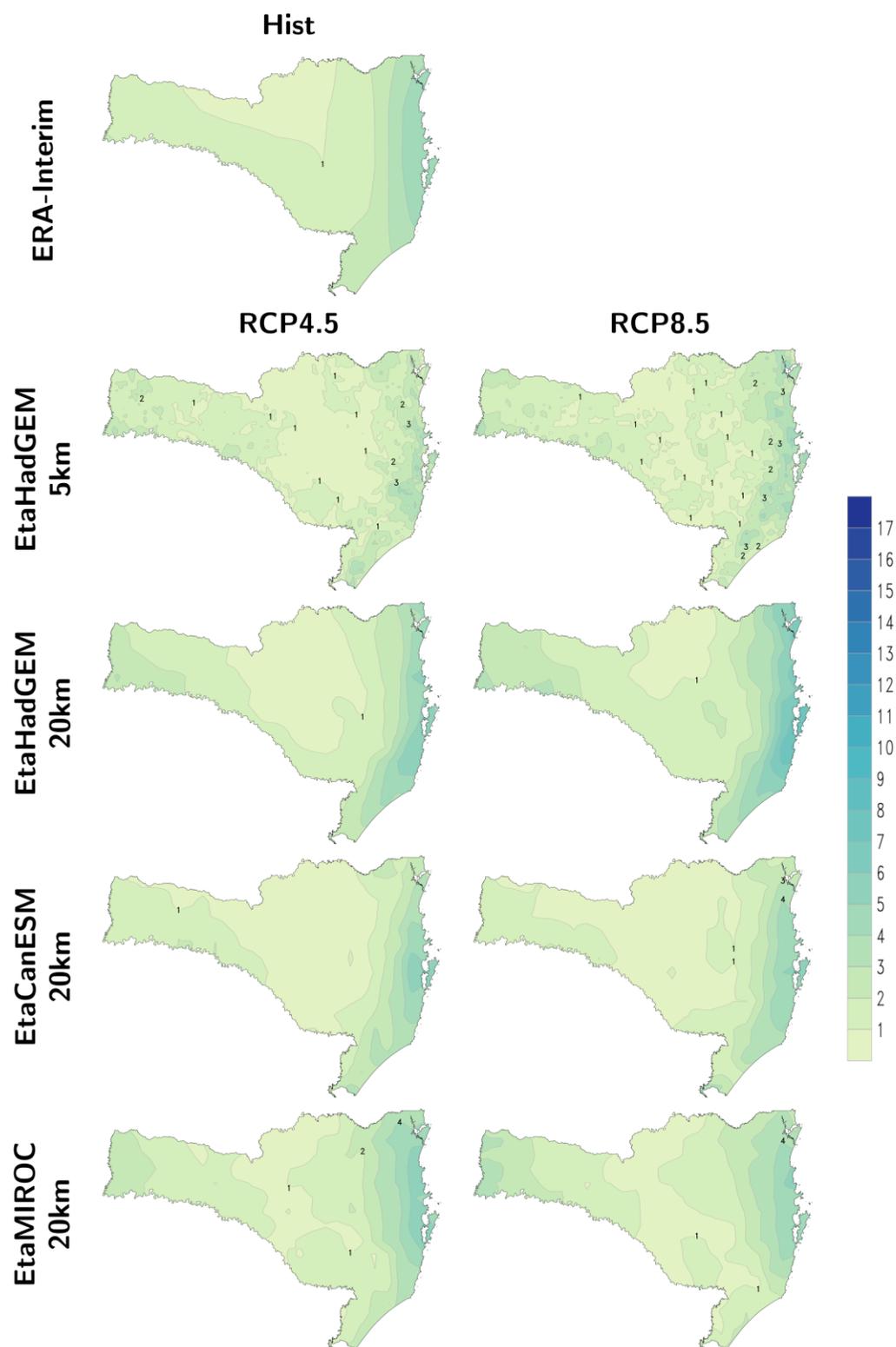


Figura A.3 - Número médio anual de Frentes Frias (FF) associadas com vento intenso (percentil 99º) para o período histórico (1998-2010), obtido através dos dados de reanálise do ERA-Interim, e para projeções do clima futuro (2011-2040), cenários RCP4.5 e RCP8.5, obtidos dos modelos Eta5km-SC (forçado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES-20km) e os modelos EtaHadGEM2-ES-20km, EtaCanESM-20km e EtaMIROC5-20km. A FF foram identificadas em cada ponto de grade considerando o nível atmosférico de 925 hPa.

APÊNDICE B: Campos da diferença entre os cenários futuros e o clima presente de Frentes Frias (FF) e FF associadas a chuvas intensas e ventos intensos

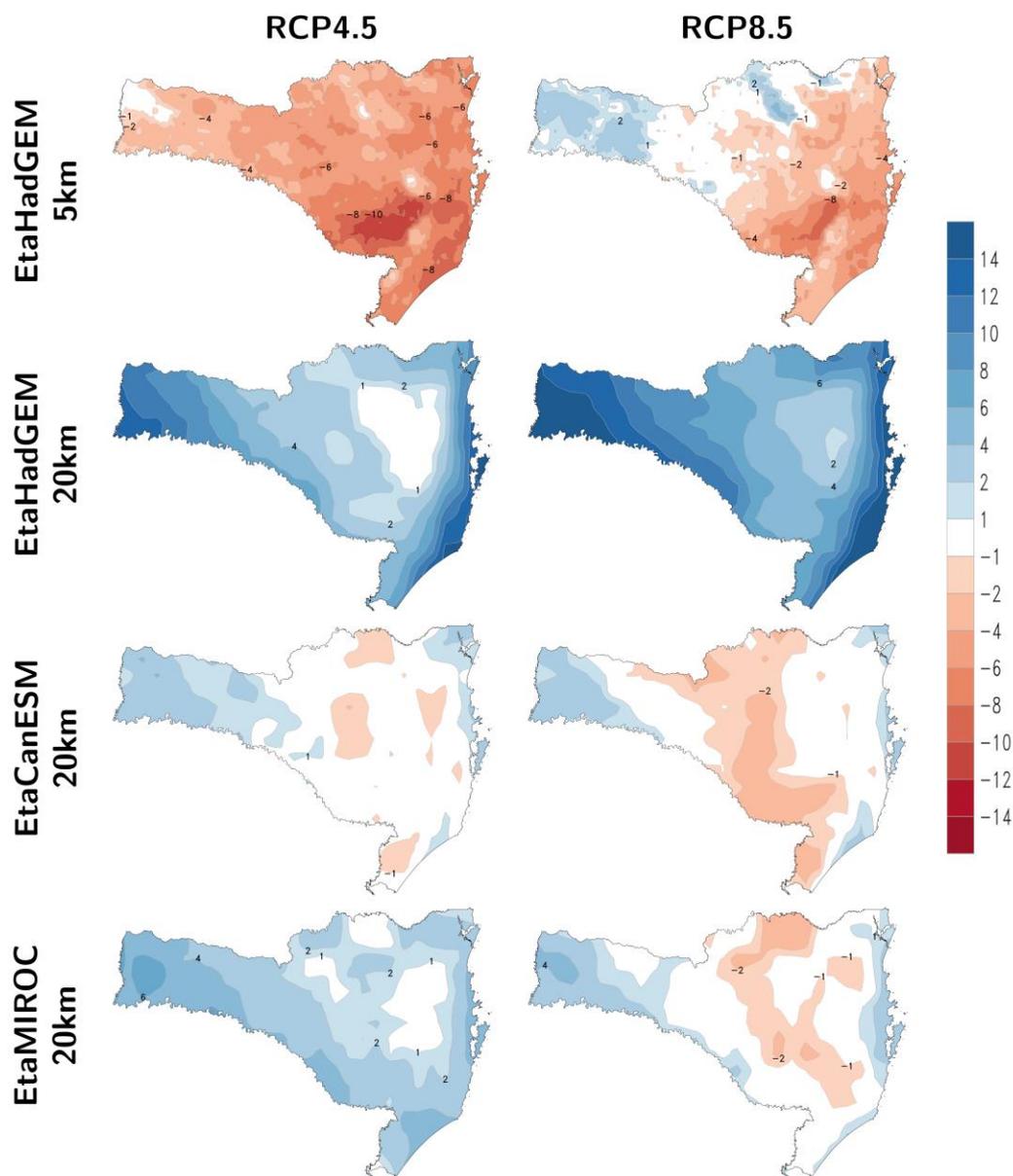


Figura B.1 - Campos da diferença dos valores médios anuais entre as projeções do clima futuro, cenários RCP4.5 e RCP8.5, e o período histórico das Frentes Frias (FF) em geral, obtidos a partir do modelo Eta5km-SC (forçado pelo modelo EtaHadGEM2-ES-20km) e os modelos EtaHadGEM2-ES-20km, Eta-CanESM-20km e Eta-MIROC5-20km. O período histórico representa a média entre os anos de 1998 a 2010, e as projeções RCP4.5 (coluna esquerda) e RCP8.5 (coluna direita) são baseadas nas médias entre os anos de 2011 a 2040

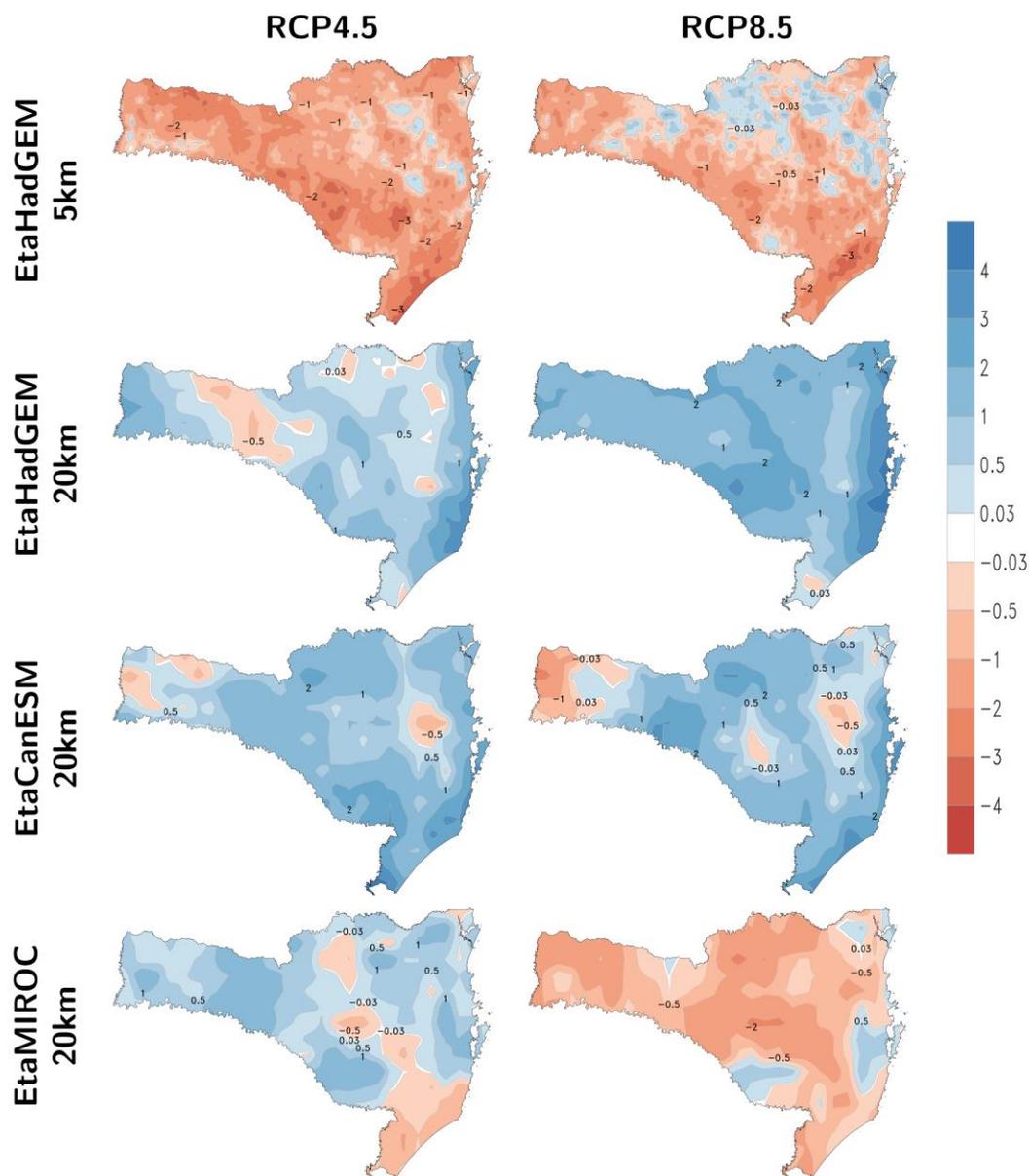


Figura B.2 - Campos da diferença dos valores médios anuais entre as projeções do clima futuro, cenários RCP4.5 e RCP8.5, e o período histórico das Frentes Frias (FF) associadas com chuvas intensas (percentil 95°), obtidos a partir do modelo Eta5km-SC (forçado pelo modelo EtaHadGEM2-ES-20km) e os modelos Eta-HadGEM2-ES-20km, Eta-CanESM-20km e Eta-MIROC5-20km. O período histórico representa a média entre os anos de 1998 a 2010, e as projeções RCP4.5 (coluna esquerda) e RCP8.5 (coluna direita) são baseadas nas médias entre os anos de 2011 a 2040

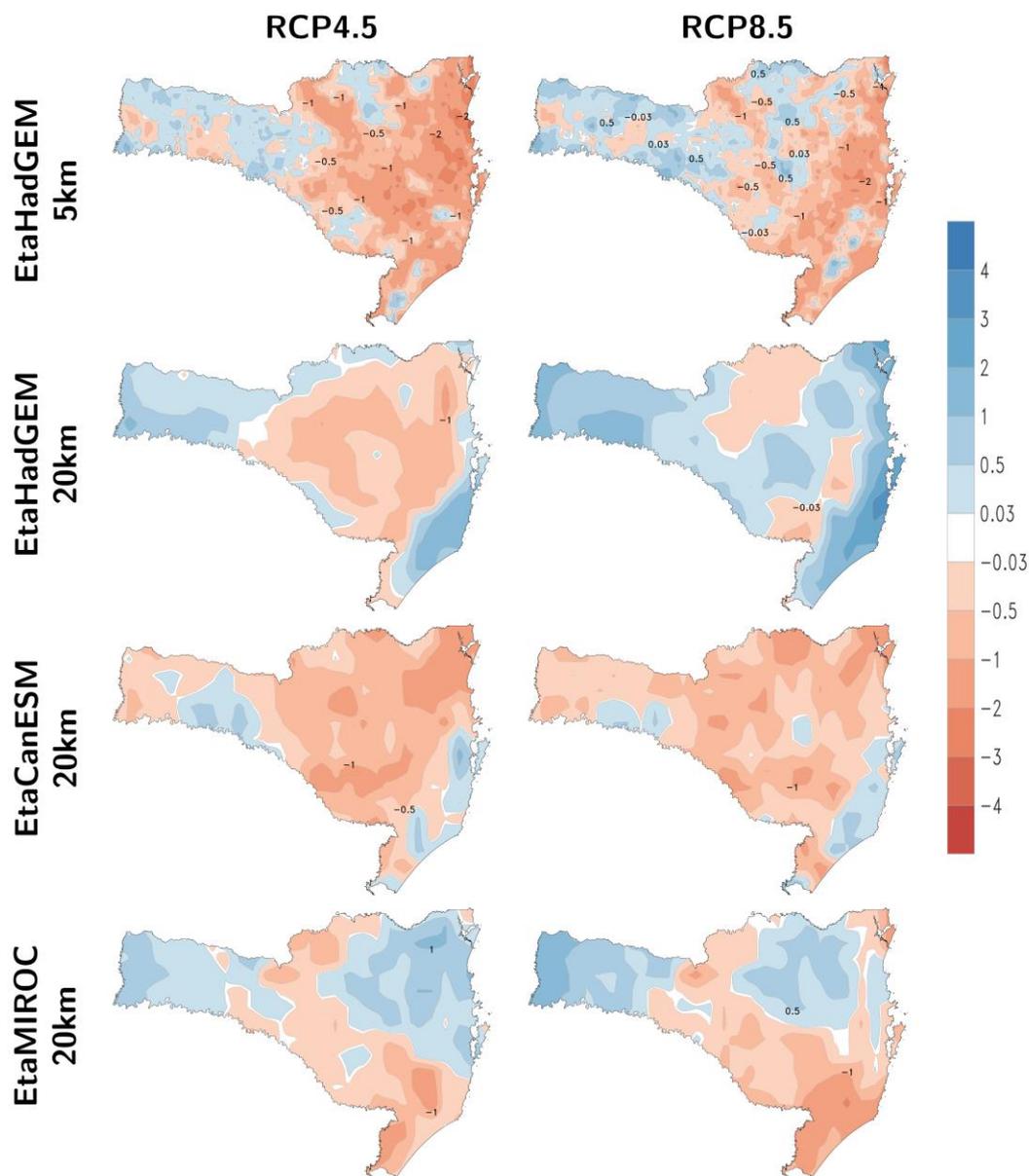


Figura B.3 - Campos da diferença dos valores médios anuais entre as projeções do clima futuro, cenários RCP4.5 e RCP8.5, e o período histórico das Frentes Frias (FF) associado com vento intenso (percentil 99%), obtidos a partir do modelo Eta5km-SC (forçado pelo modelo EtaHadGEM2-ES-20km) e os modelos Eta-HadGEM2-ES-20km, Eta-MIROC5-20km, Eta-CanESM. O período histórico representa a média entre os anos de 1998 a 2010, e as projeções RCP4.5 (coluna esquerda) e RCP8.5 (coluna direita) são baseadas nas médias entre os anos de 2011 a 2040