



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

Luana Borato

**Caracterização e projeções futuras dos padrões atmosféricos no Atlântico Sul**

Florianópolis

2022

Luana Borato

**Caracterização e projeções futuras dos padrões atmosféricos no Atlântico Sul**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do título de Mestre em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Fernando Härter Fetter Filho

Coorientadores: Fernando Javier Mendez Incera e Paula Gomes da Silva

Florianópolis

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Borato, Luana

Caracterização e projeções futuras dos padrões atmosféricos no Atlântico Sul / Luana Borato ; orientador, Antonio Fernando Härter Fetter Filho, coorientador, Paula Gomes da Silva, coorientador, Fernando Javier Mendez Incera, 2022.

61 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Oceanografia. 2. modelos climáticos globais. 3. padrões atmosféricos. 4. mudanças climáticas. 5. Atlântico Sul. I. Fetter Filho, Antonio Fernando Härter. II. da Silva, Paula Gomes. III. Mendez Incera, Fernando Javier. IV. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia. V. Título.

Luana Borato

**Caracterização e projeções futuras dos padrões atmosféricos no Atlântico Sul**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Renato Ramos da Silva  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Ricardo de Camargo  
Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Tercio Ambrizzi  
Universidade de São Paulo

Dr. Luciana Figueiredo Prado  
Universidade de São Paulo

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Oceanografia.

---

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

---

Prof. Dr. Antonio Fernando Härter Fetter Filho  
Orientador(a)

Florianópolis, 2022.

Às memórias de todos os amigos e familiares  
que faleceram em decorrência da COVID-19.

## **AGRADECIMENTOS**

Essa pesquisa foi viabilizada pelo financiamento da CAPES, através do projeto ROAD-BESM (Regional Oceanic and Atmospheric Downscaling/ 88881146046201701).

Agradeço todo suporte ofertado por meus orientadores e mentores Antonio Fernando Harter Fetter Filho, Paula Gomes da Silva e Fernando Javier Mendez Incera. E ao Programa de Pós Graduação em Oceanografia, especialmente a Josiele Maria de Souza, pelo auxílio ao longo de todo o mestrado.

Para ser grande, sê inteiro: nada  
Teu exagera ou exclui.  
Sê todo em cada coisa. Põe quanto és  
No mínimo que fazes.  
Assim em cada lago a lua toda  
Brilha, porque alta vive.  
(REIS, 1933)

## RESUMO

Padrões de circulação atmosférica estão intimamente ligados com as variações do clima regional. Neste trabalho nós buscamos identificar, descrever e inferir sobre as projeções futuras de padrões atmosféricos sobre o Oceano Atlântico Sul. Essa abordagem pode ser aplicada em diversos de estudos de climatologia, oceanografia e meteorologia. A partir de Análise de Componentes Principais (*Principal Component Analysis* - PCA) e análises de cluster em dados diários de pressão ao nível do mar nós identificamos 25 padrões atmosféricos que representam 99% da variabilidade das condições sinóticas atmosféricas sobre o Oceano Atlântico Sul. Simulações de 48 modelos climáticos globais das fases 5 e 6 do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP) foram utilizadas para observar as mudanças nas frequências de ocorrência dos padrões atmosféricos para o futuro. Os modelos foram avaliados quanto à sua capacidade em reproduzir os padrões históricos e as variabilidades sazonais e interanuais. As projeções futuras são avaliadas em diferentes intervalos de tempo: a curto prazo (2015-2039), médio prazo (2040-2069) e longo prazo (2070-2100). O desempenho das projeções é mensurado através da análise da sua consistência, ou seja, com base na similaridade entre projeções do mesmo cenário, em diferentes modelos. Os resultados destacam o desempenho dos modelos ACCESS1-0, HadGEM2-ES, HadGEM2-CC, CMCC-CM e MPI-ESM-P no CMIP5 e, no CMIP6 dos modelos HadGEM3-GC31-MM, ACCESS-ESM1-5, ACCESS-CM2 e MRI-ESM-P na reprodução dos padrões atmosféricos históricos e suas variabilidades sazonais e interanuais. Quanto as projeções futuras, apenas os modelos IPSL-CM5A-LR, BESM-AO2-5 e GFDL-ESM4 apresentaram inconsistência em um ou mais cenários. As projeções futuras variam de acordo com o cenário e intervalo de tempo analisados. Como esperado, as magnitudes de mudança são maiores para os cenários de alta emissão de gases de efeito estufa (RCP8.5 e SSP585) e para longo prazo. Para curto prazo e cenários de baixa emissão de gases de efeito estufa as variações são distribuídas em todos os padrões atmosféricos, enquanto que para longo prazo variações mais intensas são concentradas em padrões específicos. De forma geral, os modelos apresentaram bom desempenho para a região e podem servir como base para experimentos de refinamento estatístico para variáveis oceanográficas e estudos de variação climática no Atlântico Sul.

**Palavras-chave:** modelos climáticos globais; padrões atmosféricos; mudanças climáticas; Atlântico Sul.



## ABSTRACT

Atmospheric circulation patterns are closely related to regional climate variations. In this work we seek to identify, describe and infer about future projections of atmospheric patterns (weather types) over the South Atlantic Ocean. This approach can be applied in several studies in climatology, oceanography and meteorology. From Principal Component Analysis (PCA) and cluster analysis on daily sea level pressure data we identified 25 weather types that represent 99% of the variability of synoptic atmospheric conditions over the South Atlantic Ocean. 48 global climate models from phases 5 and 6 of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) were used to observe changes in the frequencies of weather types for the future. The models were evaluated for their ability to reproduce historical patterns and seasonal and interannual variability. Future projections are evaluated at different time intervals: short-term (2015-2039), mid-term (2040-2069) and long-term (2070-2100). The performance of projections is measured by analyzing their consistency, that is, based on the similarity between projections for the same scenario, in different models. The results highlight the performance of the ACCESS1-0, HadGEM2-ES, HadGEM2-CC, CMCC-CM and MPI-ESM-P models on CMIP5 and, on CMIP6 of the HadGEM3-GC31-MM models, ACCESS-ESM1-5, ACCESS-CM2 and MRI-ESM-P in the reproduction of historical atmospheric patterns and their seasonal and interannual variability. As for future projections, only the IPSL-CM5A-LR, BESM-AO2-5 and GFDL-ESM4 models showed inconsistency in one or more scenarios. Future projections vary according to the scenario and time interval analyzed. As expected, the magnitudes of change are greater for the high greenhouse gas emission scenarios (RCP8.5 and SSP585) and for the long-term. For short-term and low greenhouse gas emission scenarios the variations are distributed across all weather types, while for long-term more intense variations are concentrated in specific patterns. In general, the models performed well for the region and can serve as a basis for statistical downscaling experiments for oceanographic variables and studies of climate variation in the South Atlantic.

**Keywords:** global climate models; weather types; climate change; South Atlantic Ocean.

## LISTA DE FIGURAS

- Figure 1 – Diagram with the main steps of the methodology. Historical reanalysis data from CFSR were used to define the main weather types (WT) over the South Atlantic and estimate the frequencies of this WT in the past 31 years (red arrows). The historical simulations and future projections of the GCMs were projected on the WTs to obtain the frequencies of each WT for the projections in both time periods (blue arrows). Historical frequencies from CFSR and GCMs are compared in terms of similarity and variability, and future projections are assessed regarding the consistency between GCMs. Color scale indicates pressure anomaly. ....23
- Figure 2 – Propagation time and wave energy reaching at a point on the east coast South America (state of Santa Catarina – BR). The more intense colors in the southwest and northeast of the South Atlantic indicate the origin of the higher energy waves. The propagation isochrones indicate the displacement time of the waves from the point of origin to the area of interest ..27
- Figure 3 – Summary of the performance of the 48 global climate models. The column “1. Historical” presents (a) relative entropy (RE), (b) scatter index (SI), and (c) standard deviation of the scatter index (stdSI) between the CFSR reference frequencies and those simulated by the models. The column “2. Seasonal” presents the scatter index (SI) values for each model in each season, where (a) represents the summer months (DJF), (b) autumn (MAM), (c) winter (JJA), and (d) the spring months (SON). The intense blues indicate better performance of the model (lower SI), and the intense reds, worse performance (higher SI). The column “3. Future Projections” shows the scatter index (SI) (colored dots on the graph) between the frequencies simulated and projected by each model for each period (short, mid, and long-term) and scenario (see color legend). The gray bars bounded by the black lines indicate the limit of three standard deviations for each CMIP phase .....30
- Figure 4 – Average changes in the frequency of each weather type (WT) projected for each scenario and time interval. Inconsistent projections were not considered in the analysis. The black dots indicate agreement in the sign of change (increase or decrease) between more than 80% of the models .....33
- Figura 5 – Área de interesse com tempos de propagação de onda (esquerda) e onda de tempestade (direita) obtidos da ESTELA e da análise de correlação, respectivamente. ....35

Figura 6 – Função de densidade de probabilidade GEV para altura significativa de onda (Hs) e período de pico (Tp) para cada padrão atmosférico (WT) para o ponto 1. Hs: eixo X [0 8], eixo Y [0 1], linha pontilhada em X=2; Tp: eixo X [0 20], eixo Y [0 1], linha pontilhada em X=8. Parâmetros de distribuição (forma, escala e localização) nos gráficos na lateral direita.....	36
Figura 7– Função de densidade de probabilidade GEV para maré meteorológica (SS) e nível total (TWL) para cada padrão atmosférico (WT) para o ponto 1. SS: eixo X [-0,3 0,2], eixo Y [0 0,7], linha pontilhada em X=0; TWL: eixo X [0 6], eixo Y [0 1], linha pontilhada em X=2. Parâmetros de distribuição (forma, escala e localização) nos gráficos na lateral direita.....	38
Figura 8– Cópulas gaussianas associadas a cada padrão atmosférico (WT) representadas em pares para o ponto 1 (da esquerda para a direita: Hs-Tp; Hs-SS; Tp-SS). A cor de fundo mostra o coeficiente de correlação correspondente (rho).....	40
Figura 9– Frequência de ocorrência histórica dos eventos de ZCAS em relação a cada padrão atmosférico (WT). As frequências são relativas ao total de eventos em relação aos 25 padrões atmosféricos (%). .....	40
Figura 10 – Frequência de eventos SAM (AAO) em cada padrão atmosférico em eventos positivos (SAM>2,5) e negativos (SAM<-2,5). .....	42

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASAS Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul  
CDO *Climate Data Operator*  
CFSR *Climate Forecast System Reanalysis*  
CMIP *Coupled Models Intercomparison Project*  
EOF *Empirical Orthogonal Function*  
GCM *Global Climate Model*  
IPCC *Intergovernmental Panel on Climate Change*  
PCA *Principal Component Analysis*  
RCP *Representative Concentration Pathway*  
SAM *Southern Annular Mode*  
SLP *Sea Level Pressure*  
SLPG *Sea Level Pressure Gradient*  
SSP *Shared Socioeconomic Pathway*  
SST *Sea Surface Temperature* – temperatura superficial do mar  
WCRP *World Climate Research Programme*  
WT *Weather Types* – padrões atmosféricos  
ZCAS Zona de Convergência do Atlântico Sul

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
1.1	PERGUNTAS DE PESQUISA .....	17
1.2	HIPÓTESE .....	17
1.3	OBJETIVOS.....	18
1.3.1	<b>Objetivo geral</b> .....	18
1.3.2	<b>Objetivos específicos</b> .....	18
1.4	ORGANIZAÇÃO DOS RESULTADOS DA DISSERTAÇÃO .....	18
<b>2</b>	<b>FUTURE CHANGES IN THE FREQUENCY OF WEATHER TYPES OVER THE SOUTH ATLANTIC OCEAN</b> .....	20
2.1	BACKGROUND & SUMMARY .....	22
2.2	METHODS.....	25
2.2.1	<b>Source data</b> .....	25
2.2.2	<b>Climate Data Operator</b> .....	26
2.2.3	<b>Classification method (definition of the main weather types)</b> .....	26
2.2.4	<b>Projection of GCM data on WTs</b> .....	28
2.3	DATA RECORDS.....	28
2.4	TECHNICAL VALIDATION.....	29
2.4.1	<b>Magnitude of changes in the frequency of each weather type</b> .....	33
2.5	USAGE NOTES .....	33
2.6	CODE AVAILABILITY .....	34
<b>3</b>	<b>APLICABILIDADE PARA CARACTERIZAÇÃO DE EXTREMOS E VARIABILIDADE CLIMÁTICA</b> .....	35
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	43

<b>5</b>	<b>CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS .....</b>	<b>45</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>46</b>
	<b>APÊNDICE A – SUPPLEMENTARY TABLE .....</b>	<b>56</b>
	<b>APÊNDICE B – ACKNOWLEDGEMENTS .....</b>	<b>60</b>
	<b>APÊNDICE C – AUTHOR CONTRIBUTIONS .....</b>	<b>60</b>

## 1 INTRODUÇÃO

2  
3 Mensurar a magnitude das mudanças climáticas é essencial para reduzir a  
4 vulnerabilidade das populações costeiras a longo prazo. Essas mudanças, além de amplificarem  
5 os riscos existentes, também podem criar novos riscos aos sistemas naturais e humanos  
6 (PACHAURI; MAYER, 2015).

7 Com o objetivo de compreender como os seres humanos afetam o clima na Terra e  
8 como e, até onde, o clima pode ser previsto, em 1980 foi estabelecido o Programa Mundial de  
9 Pesquisas Climáticas (*World Climate Research Programme - WCRP*). Foi a partir do WCRP  
10 que surgiram os primeiros experimentos em modelagem numérica envolvendo diferentes  
11 modelos climáticos globais com as mesmas configurações e finalidade (CMIP, 2020).

12 A partir disso, a comunidade de modelagem climática passou a quantificar as variações  
13 e emissões de gases de efeito estufa para determinar cenários e melhor compreender as respostas  
14 climáticas do ambiente no futuro. O desenvolvimento de cenários é importante para visualizar  
15 os desdobramentos futuros do clima, com base em determinados intervalos de variação das  
16 emissões de gases de efeito estufa. Essas emissões são a componente central nos estudos de  
17 mudanças climáticas e dependem de um complexo conjunto de forçantes socioeconômicas,  
18 como o crescimento demográfico e o desenvolvimento de novas tecnologias (NAKICENOVIC  
19 et al., 2000; O'NEILL et al., 2016; MEINSHAUSEN et al., 2017; MEINSHAUSEN et al.,  
20 2020).

21 Os resultados dos experimentos realizados pelo WCRP em conjunto com o Painel  
22 Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change*  
23 - IPCC) deram início ao Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (*Coupled Models*  
24 *Intercomparison Project - CMIP*). O CMIP visa disponibilizar os resultados de modelos que  
25 possuam determinado padrão, para ampliar sua aplicabilidade e facilitar a comparação entre  
26 modelos (CMIP, 2020). Com a constante evolução dos modelos, o CMIP foi sendo aperfeiçoado  
27 e diferentes fases foram definidas com essa evolução: CMIP3 (MEEHL et al., 2007), CMIP5  
28 (HURRELL; VISBECK; PIRANI, 2011) e CMIP6 (EYRING et al., 2016).

29 Os resultados dos modelos do CMIP em todas as suas fases são amplamente utilizados  
30 em estudos climáticos (BOTHE; JUNGCLAUS; ZANCHETTIN, 2013, LEE et al., 2013,  
31 PEREZ et al., 2014a, KIM et al., 2020). No Atlântico Sul, os modelos também têm sido uma  
32 importante ferramenta para compreender o impacto das mudanças climáticas na região  
33 (BIDEGAIN; CAMILLONI, 2006; VERA et al., 2006; REBOITA et al., 2018).

34 Estudos recentes de análise de projeções futuras utilizando modelos climáticos  
35 apontam para alterações significativas no comportamento do Anticiclone Subtropical do  
36 Atlântico Sul (ASAS) em relação ao padrão atual (SUN et al., 2017, REBOITA et al., 2019). O  
37 ASAS é o principal responsável pelas variações no clima sobre o Oceano Atlântico Sul e regiões  
38 adjacentes (DERECZYNSKI; MENEZES, 2015). Reboita et al. (2019) apresentaram uma vasta  
39 revisão sobre o comportamento histórico do ASAS e também analisaram as projeções para o  
40 cenário RCP 8.5 de três modelos do CMIP5 (HadGEM2-ES, GFDL-ESM2M e MPI-ESM-  
41 MR). Eles identificaram uma provável expansão e deslocamento do centro de alta pressão do  
42 ASAS para sul no futuro, variação que pode interferir em todo o clima regional.

43 Outra característica regional de grande escala e importância é a Zona de Convergência  
44 do Atlântico Sul (ZCAS) (KODAMA, 1992; CARVALHO; JONES; LIEBMANN, 2002,  
45 2004). A ZCAS é definida por uma zona convectiva originada na bacia amazônica que se  
46 estende até o sudeste do Brasil, com projeções no Oceano Atlântico subtropical. Sua  
47 predominância é durante os meses de verão, podendo se estender de outubro a março. A  
48 ocorrência da ZCAS está relacionada com episódios de precipitação na região centro-oeste e  
49 sudeste do Brasil, acarretando nessa última, os principais eventos de precipitação extrema  
50 (CARVALHO; JONES; LIEBMANN, 2002). Apesar de projeções futuras identificarem uma  
51 redução nos eventos de ZCAS para o futuro, as médias acumuladas de precipitação apontam  
52 para um aumento de 55%, sugerindo que, apesar da redução dos eventos de ZCAS, estes podem  
53 estar sendo intensificados (AMBRIZZI; FERRAZ, 2015).

54 Além dos impactos atmosféricos, as interações entre a ZCAS e o oceano têm sido  
55 estudadas (DE ALMEIDA et al., 2007; JORGETTI; DA SILVA DIAS; DE FREITAS, 2014).  
56 As trocas de calor na interface ar-mar determinam o principal mecanismo da relação entre o  
57 oceano e a atmosfera. Outro exemplo dessa interação, são as flutuações da temperatura  
58 superficial do mar (SST do inglês *sea surface temperature*) e os eventos de ondas de calor  
59 marinhas (VENEGAS; MYSAK; STRAUB, 1997; STERL; HAZELEGER, 2003; CARTON;  
60 GRODSKY; LIU, 2008; OLIVER et al., 2018; FRÖLICHER; FISCHER; GRUBER, 2018;  
61 SEN GUPTA et al., 2020). As ondas de calor marinhas são eventos de aquecimento anômalo  
62 da SST por períodos prolongados que podem durar dias e até meses. Rodrigues et al. (2019)  
63 identificaram uma origem comum entre um evento de onda de calor marinha no Atlântico Sul  
64 e seca severa sobre o continente sul americano. Um bloqueio que impediu o desenvolvimento  
65 da ZCAS sobre o continente, diminuindo a precipitação principalmente na região sudeste do  
66 Brasil. Esse tipo de bloqueio explica aproximadamente 60% dos eventos de ondas de calor  
67 marinha, e as tendências indicam aumento na frequência, duração, intensidade e extensão das



68 ondas de calor marinha durante o período histórico (OLIVER et al., 2018; RODRIGUES et al.,  
69 2019).

70 Mudanças no comportamento de sistemas frontais, ciclones extratropicais e outros  
71 sistemas atmosféricos que interferem no clima do Atlântico Sul têm sido exploradas  
72 (FERNANDES; RODRIGUES, 2018; REBOITA et al., 2018). Na região sul e sudeste  
73 brasileira, a atuação desses fenômenos contribui de forma significativa na formação de eventos  
74 extremos (ROCHA; SUGAHARA; SILVEIRA, 2004; PARISE; CALLIARI; KRUSCHE,  
75 2009; LIMA et al., 2009; MACHADO, 2014; MELO FILHO, 2017; SOUZA; SILVA, 2021).  
76 Esses eventos são constituídos, em sua maioria, pelo excesso de precipitação e aumento do  
77 nível do mar decorrente das ressacas (HERRMANN et al., 2009; ALMEIDA; PASCOALINO,  
78 2009). Índices de vulnerabilidade para deslizamentos de terra e inundações no Brasil, tendo  
79 como base dados de precipitação, apresentam aumentos em projeções futuras (DEBORTOLI et  
80 al., 2017). Buscando reduzir as vulnerabilidades socioambientais e econômicas dos eventos  
81 meteoceanográficos é necessário compreender o comportamento dos padrões atmosféricos  
82 atuantes sobre a região e a sua relação com os oceanos.

83 Em estudos de climatologia, as ferramentas de classificação são comumente aplicadas  
84 para compreensão e descrição de padrões atmosféricos e seus impactos no oceano e no  
85 continente. Análises de clusters, análises de componentes principais e mapas auto-organizáveis  
86 são apenas alguns exemplos que têm sido aplicados na área (HUTH et al., 2008). Camus et al.  
87 (2014), Rueda et al. (2016) e Camus et al. (2017) utilizaram uma metodologia de refinamento  
88 estatístico baseado em tipos de padrões atmosféricos para reproduzir as relações estatísticas  
89 entre padrões atmosféricos e diferentes variáveis oceanográficas em uma região do Atlântico  
90 Norte. O método foi capaz de integrar diferentes escalas temporais e espaciais do processo de  
91 geração e propagação de ondas na região e os resultados obtidos para o clima médio e de  
92 extremos de ondas foi satisfatório.

93 O refinamento estatístico baseado em padrões atmosféricos, como proposto por Camus  
94 et al. (2014) tem apresentado grandes vantagens na caracterização do clima de ondas médio e  
95 de extremos no Atlântico Norte. Além disso, seu baixo custo computacional, em relação às  
96 técnicas de refinamento dinâmico, também tem sido valorizado (PEREZ et al., 2014a; RUEDA  
97 et al., 2016; CAMUS et al., 2017). Entretanto, para aplicações utilizando análise de projeções  
98 futuras, são pressupostos a estacionariedade do processo e que todas as variabilidades dentro  
99 do mesmo estejam contempladas pela variabilidade natural. Ou seja, dentro dessa metodologia  
100 só é possível avaliar a magnitude na mudança, em decorrência das mudanças climáticas, dos  
101 padrões atmosféricos já conhecidos. Novos padrões de circulação atmosférica podem não ser

102 detectados ou assumidos como erros durante o processo (CAMUS et al., 2014). Perez et al.  
103 (2014a) fizeram análises de frequência de ocorrência dos padrões atmosféricos sobre o  
104 Atlântico Norte considerando essas magnitudes de mudanças em projeções futuras.

105 Para o Atlântico Sul as implicações na intensidade e permanência de sistemas  
106 atmosféricos regionais em função das mudanças climáticas já tem sido explorada (VERA et al.,  
107 2006; NGUYEN et al., 2015; HE et al., 2017; VILLAMAYOR; AMBRIZZI; MOHINO, 2018;  
108 REBOITA et al., 2018; REBOITA et al., 2019). Entretanto, pouco se sabe sobre as variações e  
109 impactos das mudanças climáticas na frequência de padrões atmosféricos.

110 Nesse contexto, para analisar os padrões atmosféricos existentes sobre o Atlântico Sul  
111 e suas projeções em diferentes cenários futuros, nós observamos as frequências de ocorrência  
112 de cada padrão atmosférico. Dados de reanálise para o período de 1979 a 2010 foram utilizados  
113 para calcular a frequência de ocorrência de cada padrão atmosférico. Os resultados numéricos  
114 dos modelos também foram validados a partir dos dados históricos de reanálise. As projeções  
115 futuras de cada modelo foram avaliadas quanto a sua consistência e foram utilizadas para  
116 calcular a frequência de ocorrência de cada padrão atmosférico em diferentes cenários e  
117 intervalos de tempo. Dessa forma, foi possível obter a magnitude das mudanças na frequência  
118 de ocorrência dos padrões atmosféricos já conhecidos. Em estudos futuros, espera-se inferir  
119 sobre a ocorrência de eventos extremos e fenômenos meteocanográficos associados a estes  
120 padrões.

121

## 122 1.1 PERGUNTAS DE PESQUISA

123

- 124 a. Como diferentes modelos climáticos globais simulam os padrões atmosféricos do  
125 Atlântico Sul?
- 126 b. Quais são as variações na frequência de ocorrência dos padrões atmosféricos na  
127 região do Atlântico Sul a partir das projeções dos modelos climáticos globais em  
128 diferentes cenários?

129

## 130 1.2 HIPÓTESE

131

132 Existem alterações na frequência de ocorrência dos padrões atmosféricos regionais  
133 sobre o Oceano Atlântico Sul em decorrência das mudanças climáticas, e essas alterações  
134 podem ser simuladas pelos modelos climáticos globais.

135

136

### 137 1.3 OBJETIVOS

#### 138 1.3.1 Objetivo geral

139

140 Compreender os padrões atmosféricos históricos sobre o Oceano Atlântico Sul e o seu  
141 comportamento em diferentes cenários de projeções futuras.

142

#### 143 1.3.2 Objetivos específicos

144

145 São objetivos específicos do presente trabalho:

- 146 a. Estabelecer padrões atmosféricos, segundo a metodologia de Camus et al., 2014,  
147 com base na pressão atmosférica ao nível do mar para o Atlântico Sul;
- 148 b. Avaliar o desempenho de diferentes modelos climáticos globais na reprodução  
149 dos padrões atmosféricos regionais;
- 150 c. Avaliar a consistência das projeções futuras de diferentes modelos climáticos  
151 globais;
- 152 d. Analisar as mudanças na frequência relativa dos padrões atmosféricos observados  
153 no Atlântico Sul a partir da comparação entre as frequências históricas e as  
154 frequências projetadas pelos modelos climáticos globais.

155

### 156 1.4 ORGANIZAÇÃO DOS RESULTADOS DA DISSERTAÇÃO

157

158 Na próxima seção são apresentados os resultados principais da presente pesquisa. Os  
159 resultados estão em forma de artigo, já submetido à revista *Scientific Data* após correções e  
160 sugestões pela banca avaliadora. O modelo de artigo proposto é *Data Descriptor* e tem como  
161 objetivo apresentar o modelo de processamento dos dados do CMIP5 e CMIP6 replicando a  
162 metodologia de Perez et al. (2014a) para o Atlântico Sul.

163 Na seção 3, foram sumarizados alguns resultados de outras aplicações dos padrões  
164 atmosféricos para compreensão de fenômenos atmosféricos específicos, expansível para  
165 fenômenos hidrológicos e meteoceanográficos.

166 Na seção 4, as conclusões a partir do presente trabalho são apresentadas. Na seção 5  
167 são apresentadas as contribuições científicas referentes a pesquisa realizada. Após as  
168 referências, o Apêndice A, em especial, é de suma importância para o trabalho. Esse material  
169 suplementar será submetido junto ao artigo final para a revista. Esse material é composto por

170 uma tabela com informações de todos os modelos utilizados, incluindo referências (completas  
171 na seção de Referências deste manuscrito).

172 Foram mantidas ao longo do artigo a estrutura proposta pela revista, entretanto as  
173 normas aplicadas são referentes a um conjunto de orientações da ABNT organizados pela  
174 Universidade Federal de Santa Catarina.

175

176 **2 FUTURE CHANGES IN THE FREQUENCY OF WEATHER TYPES OVER THE**  
177 **SOUTH ATLANTIC OCEAN**

178 Este capítulo contém o artigo de mesmo nome, submetido à revista *Scientific Data*.

179

## Future changes in the frequency of weather types over the South Atlantic Ocean

Luana Borato<sup>1</sup>, Antonio Fernando Härter Fetter Filho<sup>1</sup>, Paula Gomes da Silva<sup>2</sup>, Fernando Javier Mendez Incera<sup>3</sup>, Antonio Henrique da Fontoura Klein<sup>1</sup>

### Affiliations

1. Department of Oceanography, Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, SC, 88040-900, Brazil

2. Environmental Hydraulics Institute “IH Cantabria”, Universidad de Cantabria, Parque Científico y Tecnológico de Cantabria, 39011, Santander, Spain

3. Department of Sciences and Techniques in Water and Environment, Cantabria University, Santander, Spain

corresponding author(s): Luana Borato (borato.luana@gmail.com)

### Abstract

Climate change is expected to affect the frequency of regional atmospheric circulation patterns and, consequently, it will result in changes in meteorological and oceanographic conditions. Here, we present a dataset that consists of the frequency of the main atmospheric patterns over the South Atlantic Ocean in the past and future. We used a reanalysis hindcast to identify 25 weather types representing the typical synoptic conditions in the region over the past 32 years. We verified the performance of the CMIP5 and CMIP6 projections on describing the frequency of these main weather types over the South Atlantic and assessed the potential changes in these frequencies in the future. The scenarios project variations of up to 3% in the frequency of some weather types over the 21st century. The data set and the performance analysis presented here can be used to support future statistical analysis, such as statistical downscaling experiments of oceanographic variables and studies on climate variations in the South Atlantic.

## 207 2.1 BACKGROUND & SUMMARY

208

209 Atmospheric circulation patterns are closely linked to regional variations in climate  
210 (LAMB, 1978; CARVALHO; JONES; LIEBMANN, 2002; RODRIGUES et al., 2019). In the  
211 South Atlantic, the South Atlantic Subtropical Anticyclone, the Intertropical Convergence Zone  
212 and the South Atlantic Convergence Zone are just a few of the best-known systems dominating  
213 the climate in this region (PETERSON; STRAMMA, 1991; MÄCHEL; KAPALA; FLOHN,  
214 1998; CARVALHO; JONES; LIEBMANN, 2004). The implications of climate change on the  
215 intensity and permanence of these features and other regional atmospheric systems have already  
216 been observed (REBOITA et al., 2018; REBOITA et al., 2019; NGUYEN et al., 2015; VERA  
217 et al., 2006; HE et al., 2017; VILLAMAYOR; AMBRIZZI; MOHINO, 2018). However,  
218 changes in the frequency of atmospheric patterns related to these circulation characteristics have  
219 not been quantified yet.

220 The outputs of global climate models (GCMs) are essential to support and understand  
221 climate changes around the world (SWART; FYFE, 2012; FANT; SCHLOSSER; STRZEPEK,  
222 2016; CHERCHI et al., 2018; CAGIGAL et al., 2020; KREIENKAMP; LORENZ; GEIGER,  
223 2020; BERG; MCCOLL, 2021). Since the early 1990s, the World Climate Research Program  
224 (WCRP) has coordinated the Coupled Models Intercomparison Project (CMIP) to promote  
225 common simulations with different GCMs to better understand the climate variability in the  
226 past, present, and future (MEEHL et al., 1997; MEEHL et al., 2005; BOCK et al., 2020;  
227 TOUZÉ-PEIFFER; BARBEROUSSE; LE TREUT, 2020). GCMs outputs are also used as input  
228 in dynamic and statistical downscaling experiments, in order to generate information that is not  
229 directly simulated by GCMs, or that has limited resolution for regional studies (e.g., waves,  
230 storm surge, river discharge, precipitation) (FOWLER; BLENKINSOP; TEBALDI, 2007;  
231 CAMUS et al., 2017; PEREZ et al., 2015).

232 Several studies show the applicability and performance of GCMs in different regions  
233 (REICHLER; KIM, 2008; HALL et al., 2019; FASULLO, 2020; FASULLO; PHILLIPS;  
234 DESER, 2020; references of all GCMs used in Supplementary Table 1 – APÊNDICE A). In the  
235 South Atlantic, GCMs are widely used to support climate change studies (REBOITA et al.,  
236 2018; REBOITA et al., 2019; VERA et al., 2006; HE et al., 2017; VILLAMAYOR;  
237 AMBRIZZI; MOHINO, 2018), but the performance of these models in this region is still barely  
238 explored (HOFSTADTER; BIDEGAIN, 1997; YIN et al., 2013; ABADI et al., 2018). One of  
239 the ways applied to evaluate the performance of GCMs is by assessing their capability to  
240 reproduce the atmospheric circulation patterns (i.e., weather types) (ABADI et al., 2018;

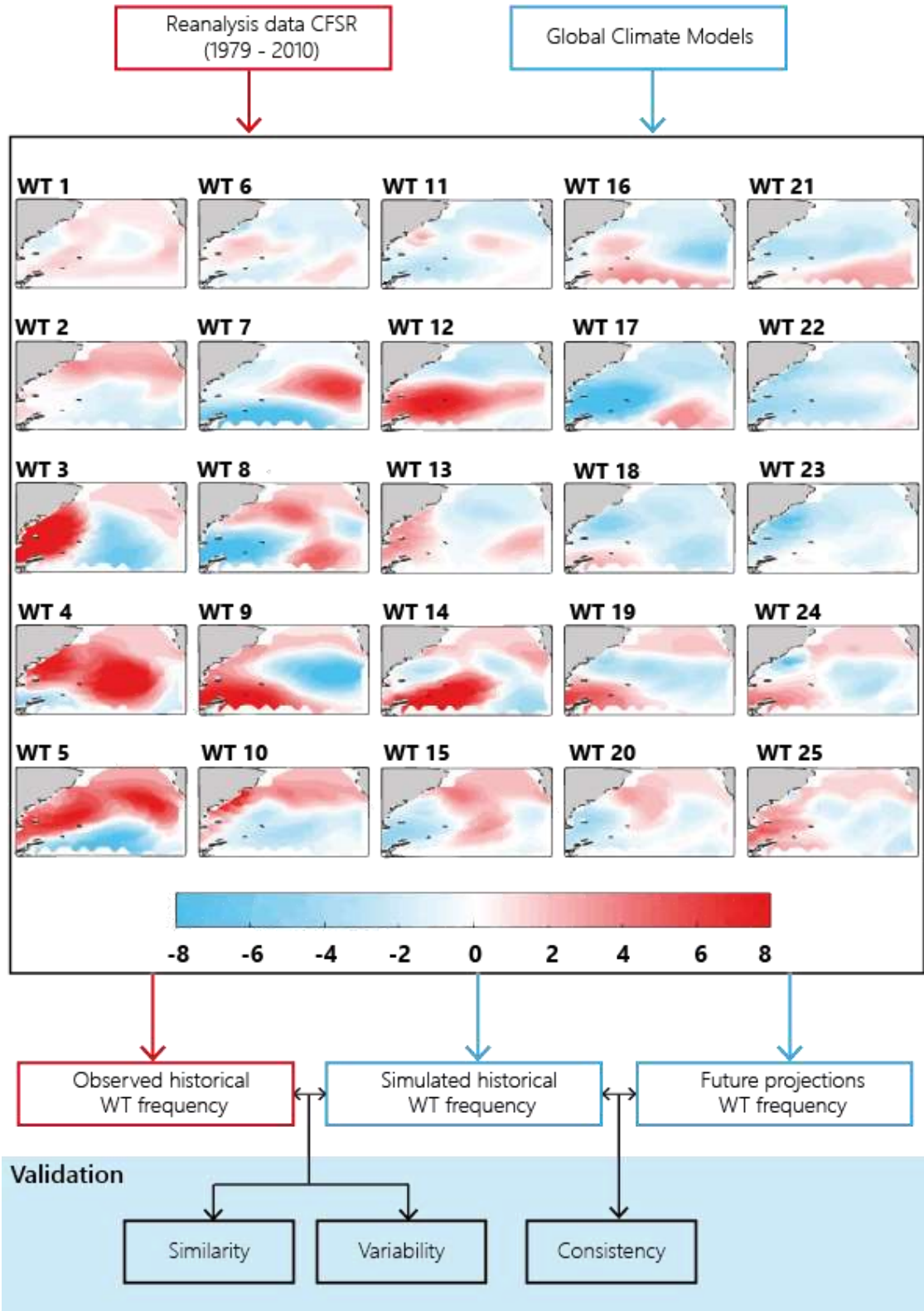
241 HUTH; 2000; PASTOR; CASADO, 2012; PEREZ et al., 2014a). In the North Atlantic, analyses  
242 of GCMs in terms of their ability to reproduce the frequency of weather types have already  
243 been described (PEREZ et al., 2014a; CAMUS et al., 2014). However, for the South Atlantic  
244 region, little is known regarding the performance of GCMs on reproducing atmospheric  
245 pressure systems (REBOITA et al., 2019).

246 This work presents a dataset consisting of the frequency of the main weather types  
247 over the South Atlantic, obtained from historical and future projections of several global climate  
248 models (GCM). We used sea-level pressure patterns (SLP) defined from daily SLP fields and  
249 SLP gradient (SLPG) to define the typical weather types over the South Atlantic Ocean and  
250 assess the ability of the GCMs to reproduce their frequency in the past and future projections.  
251 This method, based on the classification by weather types and statistical metrics (scatter index  
252 and relative entropy), aims to analyze the performance of 48 GCMs of the CMIP5 (TAYLOR;  
253 STOUFFER; MEEHL, 2012) and CMIP6 (EYRING et al., 2016) (see Supplementary Table 1  
254 – APÊNDICE A). GCM's ability to reproduce historical synoptic conditions, seasonal and  
255 interannual variability are evaluated (Figure 1). The consistency of future projections for the  
256 RCPs (Representative Concentration Pathways) (VAN VUUREN et al., 2011) and SSPs  
257 (Shared Socioeconomic Pathways) (O'NEILL et al., 2017) scenarios are assessed for each set  
258 of CMIP models.

259

260 Figure 1 – Diagram with the main steps of the methodology. Historical reanalysis data from CFSR were used to  
261 define the main WTs over the South Atlantic and estimate the frequencies of this WT in the past 32 years.  
262 The historical simulations and future projections of the GCMs were projected on the WTs to obtain the  
263 frequencies of each WT for the projections in both time periods. Historical frequencies from CFSR and  
264 GCMs are compared in terms of similarity and variability, and future projections are assessed regarding the  
265 consistency between GCMs.





266  
267  
268

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 269 2.2 METHODS

270

271 In this section, we detail the processes presented in Figure 1. The reanalysis data were  
272 used to define the WTs and obtain their frequency for the historical reference period. The  
273 historical and future synoptic patterns obtained from the GCMs were projected on the most  
274 similar WT, and each group's frequency was estimated. Based on the comparison between the  
275 reference frequencies from CFSR and those obtained from GCMs, we assessed the ability of  
276 models to reproduce the historical synoptic conditions and their seasonal and interannual  
277 variability. Finally, by comparing past and future frequencies from GCMs, we estimated the  
278 changes in the occurrence of the WTs for each scenario. We evaluated the consistency between  
279 GCMs for different horizons: short-term (2015-2039), mid-term (2040-2069), and long-term  
280 (2070-2100).

281

### 282 2.2.1 Source data

283

#### 284 Historical data

285 The use of atmospheric data, especially sea-level pressure (SLP), has been shown to  
286 be a good predictor for waves, storm surge and total water level (CAGIGAL et al., 2020;  
287 CAMUS et al., 2014; RUEDA et al., 2016). Based on these references, we chose to test this  
288 same application for the South Atlantic Ocean. The daily average of the sea-level pressure  
289 (SLP) fields of the Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) (SAHA et al., 2010) were used  
290 as reference data for the historical period (1979-2010). CFSR reanalysis data is available on the  
291 National Center for Atmospheric Research portal at [https://climatedataguide.ucar.edu/climate-](https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr)  
292 [data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr](https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr).

293

#### 294 Data of general circulation models

295 We used data from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 and Phase 6  
296 (CMIP5 and CMIP6) (TAYLOR; STOUFFER; MEEHL, 2012; EYRING et al., 2016,  
297 coordinated by the World Climate Research Programme are used. The data consist of sea level  
298 pressure daily fields and were mapped at 2° x 2° atmospheric resolution, following the  
299 reanalysis data (See Supplementary Table 1 - APÊNDICE A).

300 We analyzed 48 simulations for the historical period (1979-2004), 27 from CMIP5 and  
301 21 from CMIP6. 122 future projections of RCP 2.6, RCP 4.5, and RCP 8.5 scenarios were  
302 evaluated for CMIP5, and scenarios SSP126, SSP245, SSP370, and SSP585 for CMIP6. All

303 data from the GCMs and their future projections are available on the ESGF data portal  
304 (<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip5/> e <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>). It is  
305 noteworthy that not all GCMs presented projections for all scenarios (see Supplementary Table  
306 1 – APÊNDICE A).

307

### 308 **2.2.2 Climate Data Operator (CDO)**

309

310 We used the collection of operators of the Climate Data Operator (CDO) software for  
311 data processing (SCHULZWEIDA, 2019). The SLP data were interpolated at  $2^\circ \times 2^\circ$  over the  
312 area from  $1.5^\circ\text{S}$  and  $69.5^\circ\text{S}$  and  $69.5^\circ\text{W}$  and  $18.5^\circ\text{E}$ . For the interpolation and spatial clipping,  
313 we used the *cdo remapbil* function (SCHULZWEIDA, 2019). The *grid\_require.txt* file (see  
314 Code Availability) contains grid type specifications, latitude, and longitude for area selection  
315 and resolution in degrees.

316

### 317 **2.2.3 Classification method (definition of the main weather types)**

318

319 The classification of the atmospheric patterns into weather types is based on the  
320 methodologies already proposed for the North Atlantic (CAMUS et al., 2014; RUEDA et al.,  
321 2016). For reproduction of this work and reuse of the generated data, data referring to the  
322 weather types are provided (see Data Records section). In this section, we only present a brief  
323 description of the classification process to situate the reader who wants to reproduce weather  
324 types in other regions of the world.

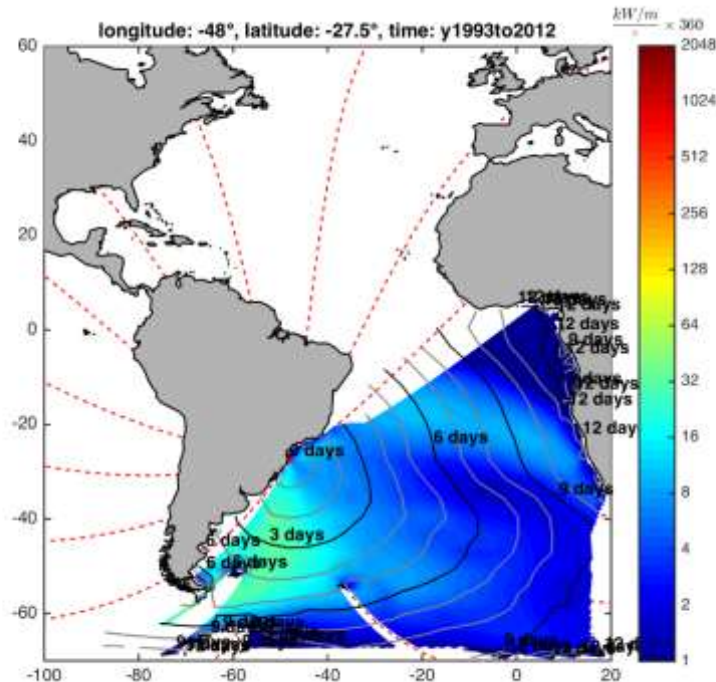
325 The SLP and SLP gradient (SLPG) (the central difference derivation of the SLP) daily  
326 fields from CFSR reanalysis were modified according to the wave propagation time, which is  
327 the time that waves take to travel from the generation area to the east coast of South America.  
328 For the generation zones from which the waves take an average of 2 days to reach the coast,  
329 data from SLP and SLPG of t-2 days were used, for areas from which the waves take 3 days,  
330 data from t-3 days and so on. The ESTELA method (PEREZ et al., 2014b) (a method for  
331 Evaluating the Source and Travel-time of the wave Energy reaching a Local Area) was applied  
332 is this stage (Figure 2). This method consists of obtaining the areas of energy gain and loss from  
333 the spectrum reconstruction and the evaluation of the effective energy flux. The wave  
334 propagation time is particularly important for this dataset since weather type data will be used  
335 in future studies for wave downscaling experiments. It is worth noting that, although SLP and  
336 SLPG fields were modified, the final weather types presented a shape similar to the original

337 atmospheric fields, allowing the identification of the typical pressure system over the South  
 338 Atlantic.

339 The modified SLP and SLPG fields were organized in the same matrix [SLP SLPG],  
 340 and a principal component analysis was applied to reduce the dimensionality of the dataset.  
 341 Only the principal components (PCs) that represented 99% of the variability of the dataset were  
 342 used, and a linear combination of those PCs represented each day in the time series. The k-  
 343 means algorithm (HASTIE et al., 2001) was applied to the PCs to group similar atmospheric  
 344 conditions into classes. Each class was represented by the centroid of the group, which is called  
 345 weather type. A sensitivity analysis with different classes was carried out to ensure the higher  
 346 variability between groups and the lower variability within each data group. The analysis with  
 347 25 classes showed the best results. Finally, the frequency of each weather type was estimated  
 348 considering the amount of data in each class. The weather types identified in this process are  
 349 represented in Figure 1.

350

351 Figure 2 - Propagation time and wave energy reaching at a point on the east coast South America (state of Santa  
 352 Catarina – BR). The more intense colors in the southwest and northeast of the South Atlantic indicate  
 353 the origin of the higher energy waves. The propagation isochrones indicate the displacement time of the  
 354 waves from the point of origin to the area of interest.



355

356

357

Fonte: Fernando Javier Mendez Incera, comunicação pessoal.

## 358 2.2.4 Projection of GCM data on WTs

359

360 The SLP and SLPG data from GCMs were organized in the same matrix [SLP SLPG].  
361 Next, we projected daily fields on the weather types and associated each day with the weather  
362 type that was the most similar to it. The similarity between daily atmospheric patterns and the  
363 weather types was calculated using the Euclidean norm. From the number of data associated  
364 with each class, the frequencies of the weather types from the projections were obtained for the  
365 historical period and three future horizons: short-term (2015-2039), mid-term (2040-2069), and  
366 long-term (2070-2100).

367

## 368 2.3 DATA RECORDS

369

370 The data presented here consists of two main sets: the data referring to weather types  
371 (*WT\_data*) and the data generated from the analysis of the GCMs (*Data\_results*).

372

373 The *WT\_data* directory consists of three files: *mask*, *Results*, and *ColorMap*. In  
374 *Results*, the user will find the Principal Components (PCs), the Empirical Orthogonal Functions  
375 (EOFs), and the centroids (weather types) identified in the classification process. A vector with  
376 the weather types associated with each day of the time series from CFSR (best matching units  
377 – Bmus) and a vector with the date of the case positioned closest to the centroids are also  
378 available. The user is referred to the Code Availability section for accessing the codes to plot  
379 the weather types. The *mask* file contains a mask over the continent used in the weather type  
380 code, and the *ColorMap* file contains the colormap used in the figures.

381

382 The *Data\_results* directory contains the final data from this work. In *magchanges\_\**  
383 matrices, the user will find the magnitude of changes of each weather type for each model and  
384 period analyzed (short, mid, and long term). The *prob\_occurr\_\** matrices contain the relative  
385 frequency of each weather type for each model analyzed. The *WT\_ass\_CFSR* matrix contains  
386 the weather type associated with each day in relation to the CFSR reanalysis data, used as a  
387 reference for the historical period. All the mentioned data are available and can be accessed at  
388 [https://figshare.com/projects/Characterization\\_and\\_future\\_projections\\_of\\_the\\_Weather\\_Type  
389 s\\_over\\_the\\_South\\_Atlantic\\_Ocean/118449](https://figshare.com/projects/Characterization_and_future_projections_of_the_Weather_Types_over_the_South_Atlantic_Ocean/118449).

390

391

392 2.4 TECHNICAL VALIDATION

393

394 We estimated the observed historical frequency of weather types from the CFSR  
 395 reanalysis data (1979-2010). The frequencies obtained by each GCM's projection on the  
 396 weather types were also calculated for the same period. We evaluated the similarity between  
 397 the synoptic conditions obtained from CFSR and from GCM's using the scatter index of the  
 398 mean square error normalized by the mean frequency (SI) (Eq. 1) and the relative entropy (RE)  
 399 (Eq. 2) (Figure 3 columns 1a, 1b, and 2) (PEREZ et al., 2014a):

400

$$401 \quad SI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (p_i - p'_i)^2}{N}} / \left( \frac{\sum_{i=1}^N p_i}{N} \right), \quad (1)$$

$$402 \quad RE = \sum_{i=1}^N p_i \left| \log \frac{p_i}{p'_i} \right|, \quad (2)$$

403 where  $p_i$  is the relative frequency of the  $i$ th weather type from the reanalysis data;  $p'_i$  is the  
 404 relative frequency of the  $i$ th weather type from a GCM simulation, and  $N$  is the number of  
 405 weather types.

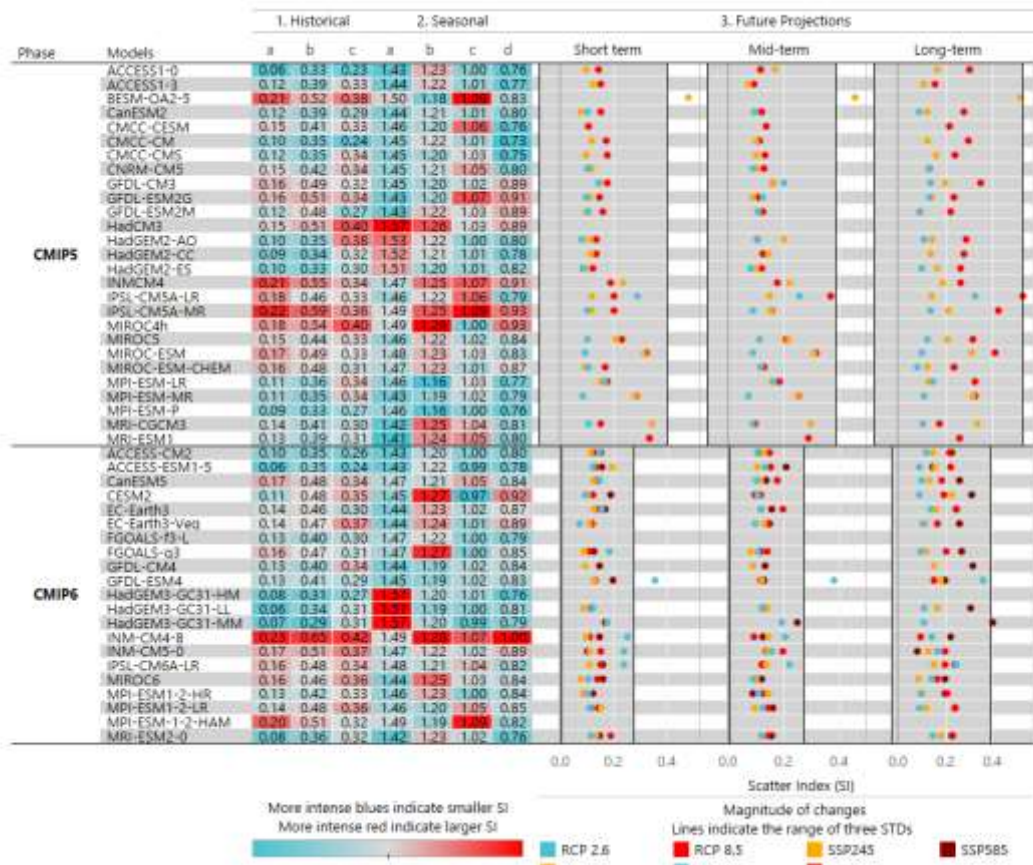
406 To assess the skill of the GCMs to reproduce interannual variability, we compared the  
 407 annual standard deviation of the frequencies obtained from the reanalysis data and those from  
 408 the GCMs simulations. The performance of the models was measured through the standard  
 409 deviation scatter index (stdSI) (Eq. 3) (Figure 3 column 1c) (PEREZ et al., 2014a).

$$410 \quad stdSI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (std(p_i) - std(p'_i))^2}{N}} / \frac{\sum_{i=1}^N (std(p_i))}{N}, \quad (3)$$

411 where  $std()$  represents the standard deviation of the argument.

412 The consistency of future projections was assessed for three time periods: short-term  
 413 (2015-2039), mid-term (2040-2069), and long-term (2070-2100). The projections were  
 414 evaluated in terms of consistency when compared to the other models. In this analysis, we used  
 415 the magnitude of the changes in the frequencies of each weather type. The magnitude of the  
 416 changes was obtained through the SI (Eq. 1). For each model and scenario, we estimated the SI  
 417 between the frequency of future projections and the frequency of the historical period from the  
 418 same model (PEREZ et al., 2014a). Inconsistent projections were considered those with SI  
 419 outside the range of three standard deviations of the SI from the set of models.

420 Figure 3 – Summary of the performance of the 48 global climate models. The column “1. Historical” presents (a)  
 421 relative entropy (RE), (b) scatter index (SI), and (c) standard deviation of the scatter index (stdSI)  
 422 between the CFSR reference frequencies and those simulated by the models. The column “2. Seasonal”  
 423 presents the scatter index (SI) values for each model in each season, where (a) represents the summer  
 424 months (DJF), (b) autumn (MAM), (c) winter (JJA), and (d) the spring months (SON). The intense blues  
 425 indicate better performance of the model (lower SI), and the intense reds, worse performance (higher  
 426 SI). The color scale is comparative between models (vertically), for each column the numerical scale is  
 427 different. The column “3. Future Projections” shows the scatter index (SI) (colored dots on the graph)  
 428 between the frequencies simulated and projected by each model for each period (short, mid, and long-  
 429 term) and scenario (see color legend). The gray bars bounded by the black lines indicate the limit of  
 430 three standard deviations for each CMIP phase. Please note that not all GCMs presented projections for  
 431 all scenarios (see Supplementary Table 1 – APÊNDICE A).



Fonte: Elaborado pelo autor.

432  
 433  
 434

435 Figure 3 shows the 48 selected models and their respective performances. Historical  
 436 analysis was carried out in comparison with CFSR reanalysis data between 1979-2004 for  
 437 CMIP5 and until 2014 for CMIP6 (“1. Historical” and “2. Seasonal” in Figure 3). We computed  
 438 the scatter index (SI) and the relative entropy (RE) between the historical frequencies, obtained  
 439 through reanalysis and the simulations of each model. Smallest SI and RE indicate the best  
 440 performances. The standard deviation of the scatter index (stdSI) was used to access the  
 441 performance of models in reproducing interannual variability (“1. Historical, c” in Figure 3).  
 442 The magnitude of changes in the frequency of each weather type was used to obtain the  
 443 consistency of the projections for each model. The “3. Future Projections” section in Figure 3

444 shows the SI of each model for each scenario (in colors) and time interval (columns). The dark  
445 gray band between black lines within each column indicates the range of three standard  
446 deviations, projections outside this range are considered inconsistent.

447 Lower SI and RE indicate better performance when describing historical (“1.  
448 Historical”) and seasonal (“2.Seasonal”) frequencies, while lower stdSI indicate better  
449 performance on describing interannual variability. SI from future projections fitting inside the  
450 bar of three standard deviations (“3. Future Projections”) are considered consistent with the  
451 whole set of models.

452 The Bureau of Meteorology and Commonwealth Scientific and Industrial Research  
453 Organization (ACCESS), and Hadley Centre for Climate Prediction and Research (HadGEM)  
454 models showed the best performances in general in reproducing the historical synoptic  
455 conditions. Except for the models ACCESS1-3 and HadCM3, from CMIP5, the other models  
456 of the mentioned centers, both for CMIP5 and for CMIP6, presented a maximum SI of 0.35 and  
457 a maximum RE of 0.10.

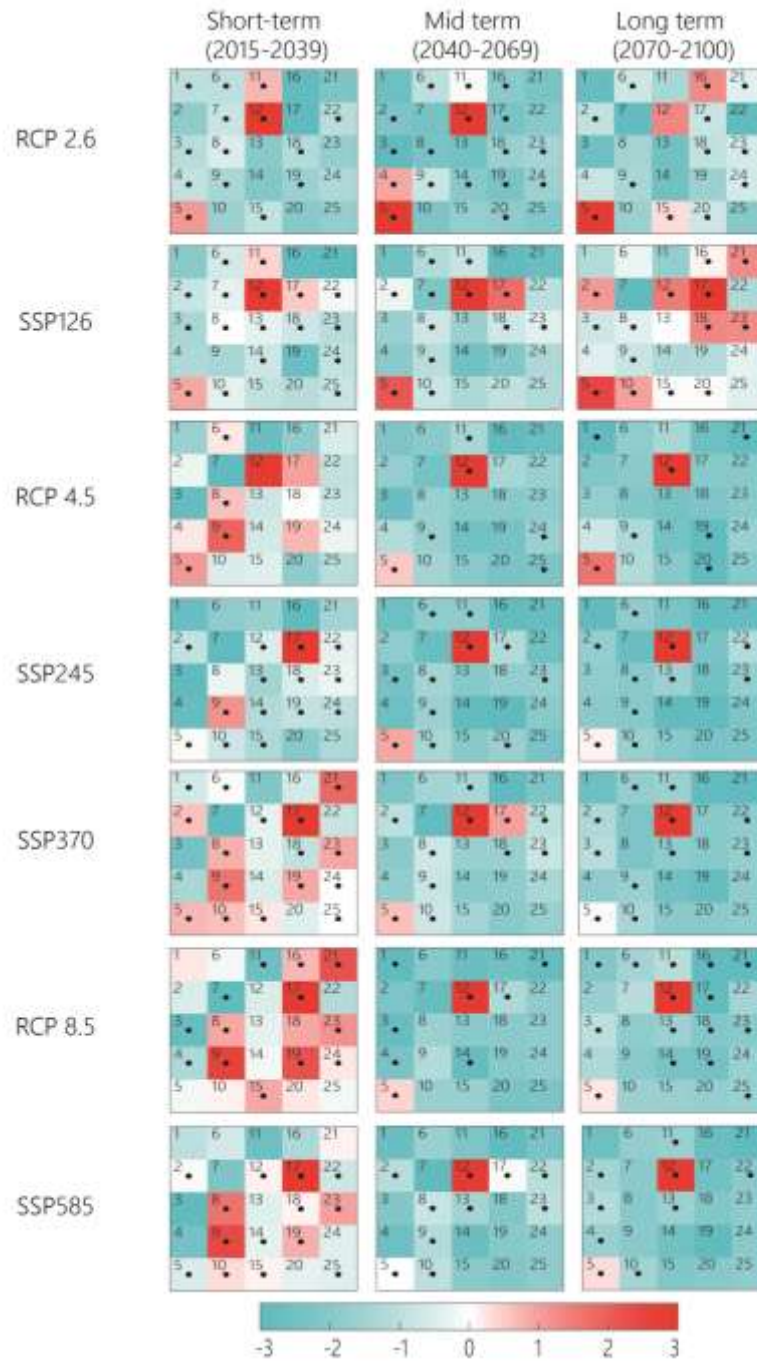
458 In average, the results from CMIP5 and CMIP6 showed similar performances.  
459 However, some improvements for CMIP6 can be noted when assessing the results from each  
460 model individually. For instance, the model GFDL-CM4 (SI = 0.40 and RE = 0.13) showed  
461 improvement in relation to GFDL-CM3 (SI = 0.49 and RE = 0.16), the INM-CM5-0 (SI = 0.51  
462 and RE = 0.17) showed improvement in relation to INM- CM4 (SI = 0.55 and RE = 0.21), and  
463 MRI-ESM2-0 (SI = 0.36 and RE = 0.08) showed improvement in relation to MRI-ESM1 (SI =  
464 0.39 and RE = 0.13).

465 Regarding the seasonality, we observed that the performance of the models depends  
466 on the season and is not necessarily related to the performance in the historical period, as  
467 observed by Perez et al., 2014a. For example, our results show that the HadGEM models, which  
468 performed well in the historical analysis (SI less than 0.5 and RE less than or equal to 0.10),  
469 performed poorly when estimating the seasonal frequency, especially during the summer (SI  
470 greater than 1.50). From this, we can conclude that the choice of the most appropriate models  
471 may vary according to the purpose of the analysis.

472 In the analysis of the future projections, BESM-AO2-5 and IPSL-CM5A-LR models  
473 presented inconsistent projections in relation to the other CMIP5 models. Bias was also  
474 previously verified in the dataset from these models, although former studies focused on  
475 different variables from those assessed here (frequency of SLP and SLPG) (NOBRE et al.,  
476 2013; DUFRESNE et al., 2013; MIGNOT; BONY, 2013; DUNNE et al., 2020; ANDREWS et  
477 al., 2019).



478 Figure 4 – Average changes in the frequency of each weather type (WT) projected for each scenario and time  
 479 interval. Inconsistent projections were not considered in the analysis. The black dots indicate agreement  
 480 in the sign of change (increase or decrease) between more than 80% of the models.



Fonte: Elaborado pelo autor.

481  
 482  
 483  
 484

#### 485 **2.4.1 Magnitude of changes in the frequency of each weather type**

486

487           The difference between the frequency of each weather type for the historical period  
488 and the future projections of each scenario was estimated through the average of the results  
489 from all consistent models. Figure 4 shows the results for low emission scenarios (RCP 2.6 and  
490 SSP126), intermediate emission scenarios (RCP 4.5, SSP245, and SSP370), and high emission  
491 scenarios (RCP 8.5 and SSP585); for short (2015-2039), mid (2040-2069), and long-term  
492 (2070-2100). In the mid and long-term, all scenarios indicate an increase in the frequency of  
493 WT12 (average change of 3%). The same was observed in the short term when considering low  
494 emission scenarios. In the short term, there is also an increase in the frequency of WT9 and  
495 WT17. Low emission scenarios result in variations in the frequency of all weather types, and,  
496 in the long term, more intense positive variations are observed. For intermediate and high  
497 emission scenarios, the pattern is reversed: the short-term period reveals an increase in the  
498 frequency of most weather types. In contrast, reductions in frequency are more common in the  
499 mid and long term. In these cases, the increase in the frequency is recurrent for WT12 and,  
500 occasionally, for WT5 and WT17.

501

#### 502 **2.5 USAGE NOTES**

503

504           The frequency of each weather type and the performance of each model for the South  
505 Atlantic are relevant to infer about any variables associated with the sea level pressure fields.  
506 Some examples are the precipitation, wind patterns, and oceanographic variables related to  
507 atmospheric processes. We analyzed the historical frequency of the typical weather types over  
508 the South Atlantic, using data from 48 models and 122 future projections considering 7 different  
509 scenarios. The historical frequencies made available here can be used to assess the seasonal and  
510 interannual variability of any variable linked to the regional climate. Regarding the results  
511 obtained from future projections, our dataset allows analyses using the average frequency of all  
512 models (as shown in Figure 3), the mean of the models with the best performance, or the  
513 individual projections of each model and scenario. As an example, sea state parameters, such  
514 as wave height and period, can be associated with sea level pressure patterns (weather types) to  
515 project changes in wave climate and flood levels in coastal regions (CAMUS et al., 2017;  
516 PASTOR; CASADO, 2012; RUEDA et al., 2016). In addition, the results indicated by the  
517 performance analysis can be used to support the choice of different models for different research  
518 objectives in the South Atlantic.

## 519 2.6 CODE AVAILABILITY

520

521 CDO code: *CDO1\_concatenate\_files.txt*; *CDO2\_regrid\_seldate*; *grid\_require.txt*

522 The code consists of a set of commands for spatial clipping of data, interpolation in  
523 the 2°x2° grid, and time clipping for the desired period. The *grid\_require.txt* file is used in the  
524 code to define the desired interpolation and spatial clipping settings. Documentation with usage  
525 details for each CDO command is available at <https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo>  
526 (SCHULZWEIDA, 2019). The commands can be executed directly in the Linux terminal or  
527 using a similar interface for Windows, such as Cygwin Terminal  
528 (<https://cygwin.com/index.html>).

529

530 Matlab code: *MAT1-8\_\*.m*; *dist2.m*

531 The codes are developed in Matlab R2019b (Master License: 31462642/ License:  
532 40873872) and are separated by stages of execution. The scripts (.m) must be executed in order  
533 (1-8) as the outputs from one script are used as input for the next. The main matrices (.mat) of  
534 the script's output are also available in the Data Records.

535 The README file explains the logic of using the codes and their order of execution. Each code  
536 contains a header where the requirements for its correct functioning are indicated. The *dist2*  
537 Matlab function used is also available. This material can be found at  
538 [https://github.com/boratuana/cmip\\_evaluation](https://github.com/boratuana/cmip_evaluation).

539

540

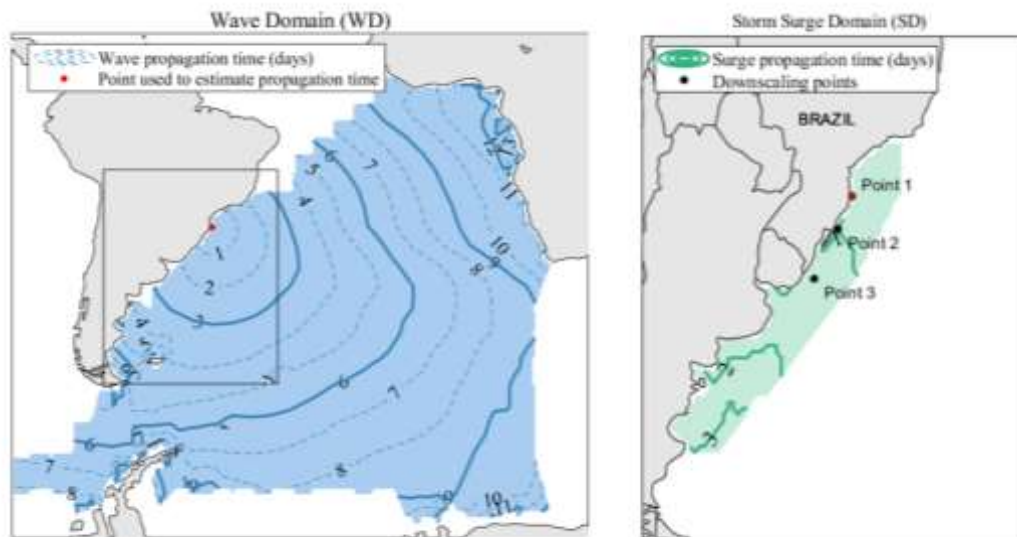
### 541 3 APLICABILIDADE PARA CARACTERIZAÇÃO DE EXTREMOS E 542 VARIABILIDADE CLIMÁTICA

543

544 Os resultados aqui apresentados fazem parte do artigo, ainda em construção, “*An*  
545 *atmospheric predictor to characterize average and extreme Atmospheric Induced Water Level*  
546 *in shallow continental shelves: the example of the Southern Brazilian Coast*”.

547 Eventos extremos de inundação costeira podem ocorrer como resultado de um único  
548 fator, mas são comumente associadas a uma combinação de diferentes fatores, como maré  
549 astronômica, maré meteorológica (*storm surge*), ondas, descargas fluviais e precipitação. Como  
550 forma de exemplificar o uso dos padrões atmosféricos para caracterização desses eventos, nós  
551 utilizamos o nível total (*total water level - TWL*) e suas componentes para observar o  
552 comportamento de extremos a região de interesse (Ponto 1) (Figura 5).

553 Figura 5 – Área de interesse com tempos de propagação de onda (esquerda) e onda de tempestade (direita) obtidos  
554 da ESTELA e da análise de correlação, respectivamente.



555

556

Fonte: Paula Gomes da Silva, comunicação pessoal.

557

558 Nós utilizamos os dados de altura significativa de onda ( $H_s$ ), período de pico ( $T_p$ ) e  
559 maré meteorológica (*storm surge SS*), com intervalos de 6 horas, para o período de 1993 a  
560 2010. Os dados de onda são provenientes de hindcast desenvolvido pelo *Center for Australian*  
561 *Weather and Climate Research*, CSIRO (DURRANT et al., 2014; SMITH et al., 2020) e os  
562 dados de maré meteorológica da base de dados global Dynamic Atmospheric Correction, DAC  
563 (CARRÈRE; LYARD, 2003). A partir desses dados foi calculado o TWL segundo a equação 4  
564 (RUEDA et al., 2016). A equação leva em consideração uma estimativa empírica do *runup* em  
praias dissipativas (STOCKDON et al., 2006).

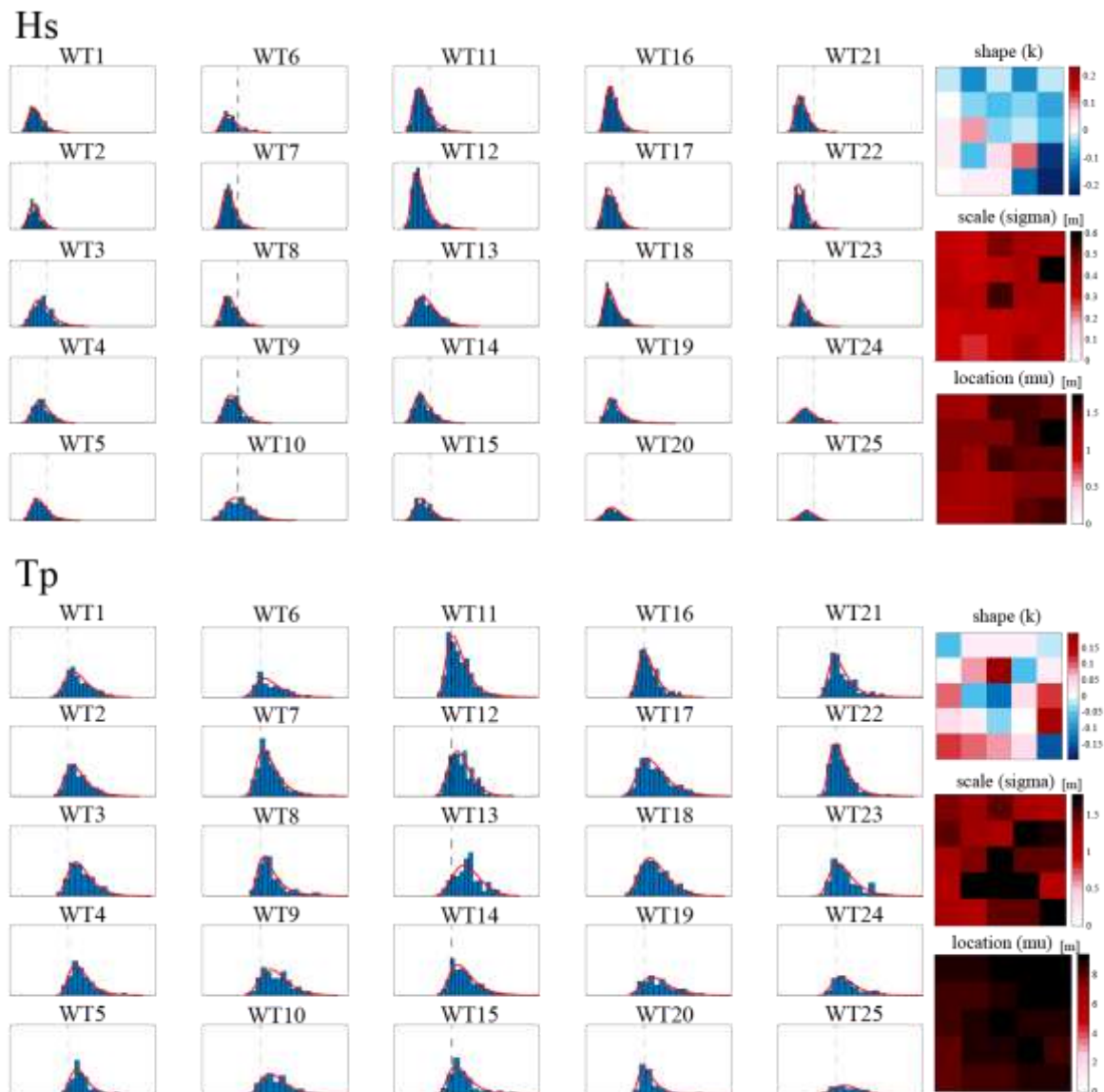
565 
$$TWL = SS + 0,043 \cdot \sqrt{H_S \cdot L_0}, \quad (4)$$

566 
$$\text{onde } L_0 = \frac{g}{2\pi} T_p^2.$$

567 Os dados de cada variável, referente ao horário de maior TWL diário, foram utilizados  
 568 para análise da distribuição marginal de extremos e para análise de distribuição conjunta através  
 569 das cópulas gaussianas. Foram considerados três pontos ao longo da costa sul do Brasil, como  
 570 indicado na Figura 5 (direita). Os resultados para o ponto 1 são apresentados nas Figura 6,  
 571 Figura 7 e Figura 8.

572 Cada variável (Hs, Tp, SS e TWL) foi associada aos padrões atmosféricos a partir das  
 573 suas datas de ocorrência. A distribuição marginal de cada variável foi ajustada para cada padrão  
 574 atmosférico utilizando a distribuição de extremos generalizada (*generalized extreme value*  
 575 *distribution* - GEV). Assim, a distribuição GEV nos dá a distribuição de probabilidade dos  
 576 máximos valores que ocorrem naquele padrão atmosférico. O processo foi repetido para cada  
 577 variável individualmente.

578 Figura 6 – Função de densidade de probabilidade GEV para altura significativa de onda (Hs) em metros e período  
 579 de pico (Tp) em segundos para cada padrão atmosférico (WT) para o ponto 1. Hs: eixo X [0 8]m, eixo  
 580 Y [0 1], linha pontilhada em X=2m; Tp: eixo X [0 20]s, eixo Y [0 1], linha pontilhada em X=8s.  
 581 Parâmetros de distribuição (forma (k), escala (sigma) e localização (mu)) nos gráficos na lateral direita.



582  
583

Fonte: Elaborado pelo autor.

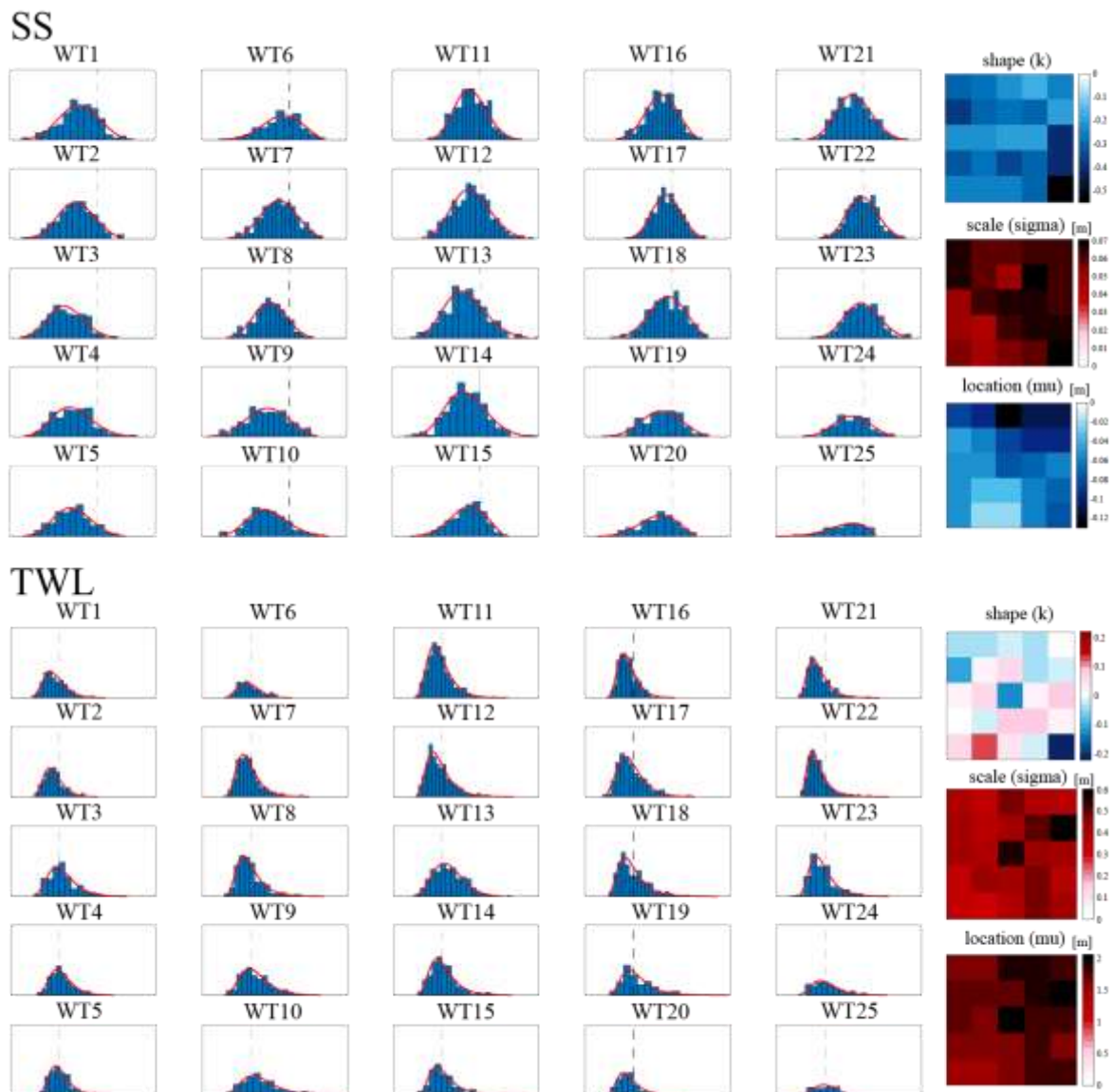
584 As distribuições analisadas correspondem com o clima médio de ondas da região Sul  
585 do Brasil. Para os padrões atmosféricos predominantes de verão (canto superior direito do  
586 quadro de padrões atmosféricos), as médias de Hs são de 1 – 2m, e o Tp fica entorno de 6 – 8s,  
587 com poucos eventos que chegam até 12s. Já nos padrões atmosféricos predominantes de inverno  
588 (canto inferior esquerdo), há predominância de ondas maiores (2 – 3m) e períodos mais longos  
589 (10-12s a média). Ondas extremas durante esse período podem apresentar Hs de até 6,9m  
590 (ALVES; MELO, 2001; PIANCA et al., 2010).

591 Observando de forma conjunta as distribuições marginais dos extremos apresentadas  
592 na Figura 6 e Figura 7, existe uma combinação de maiores altura de ondas significativa (Hs) e  
593 períodos de pico (Tp) mais longos que resulta em um TWL mais elevado no padrão WT13.

594 Esse padrão corresponde a anomalias de alta pressão localizada sobre a área de estudo,  
595 combinada com a anomalias de baixa pressão na porção norte do Atlântico Sul (WT13), padrão  
596 com maior frequência nos meses de primavera (MAM). Nos padrões de inverno (canto inferior  
597 esquerdo do quadro de padrões atmosféricos – Figure 1) esta combinação (Hs e Tp) também  
598 resulta em maiores TWL.

599 Por outro lado, a combinação de maré meteorológica (SS) elevada e maiores períodos  
600 de pico (Tp) não apresentou tanto efeito no TWL. As maiores médias de SS estão relacionadas  
601 a padrões com predominância de baixa pressão em todo o Atlântico Sul (WT17, WT18, WT22  
602 e WT23). Esses padrões são mais frequentes durante o outono, que coincide com o período de  
603 maior número de eventos extremos de onda na região (cerca de 50%) (CAMPOS et al., 2013).  
604 Embora esses padrões também apresentem maiores Tp, o TWL, especialmente em WT22 e  
605 WT23, é baixo.

606 Figura 7 – Função de densidade de probabilidade GEV para maré meteorológica (SS) em metros e nível total  
607 (TWL) em metros para cada padrão atmosférico (WT) para o ponto 1. SS: eixo X [-0,3 0,2]m, eixo Y  
608 [0 0,7], linha pontilhada em X=0; TWL: eixo X [0 6]m, eixo Y [0 1], linha pontilhada em X=2m.  
609 Parâmetros de distribuição (forma (k), escala (sigma) e localização (mu)) nos gráficos na lateral direita.



610  
611

Fonte: Elaborado pelo autor.

612

613

614

615

616

617

618

619

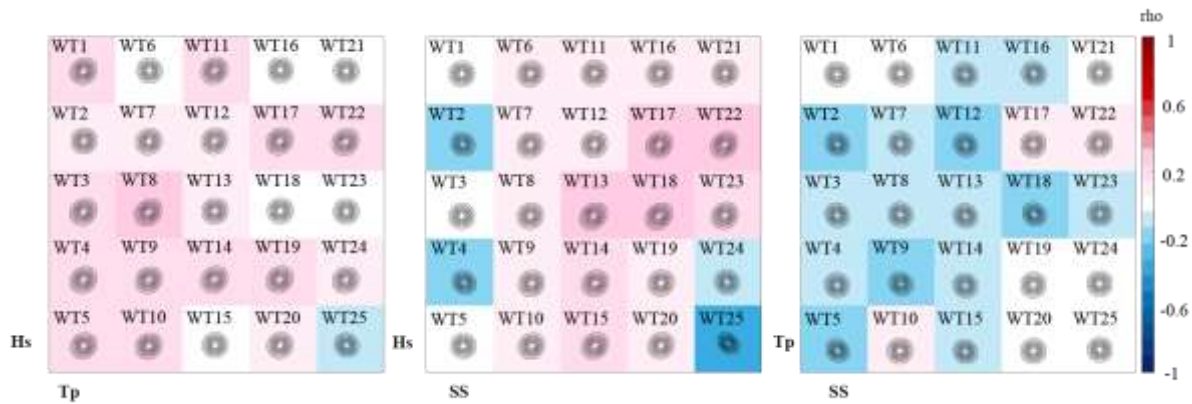
620

621

A estrutura de dependência associada a cada padrão atmosférico é modelada usando uma cópula gaussiana multivariada. Esta ferramenta é útil para avaliar a relação entre variáveis com diferentes distribuições marginais. A correlação entre as variáveis (Hs, Tp e SS) para o ponto 1 é mostrada na Figura 8. As correlações foram bastante variáveis em todos os padrões atmosféricos. Em sua maioria, para altura significativa de onda (Hs) e período de pico (Tp), foram baixas correlações positivas, com exceção do padrão WT25. Esse padrão corresponde a anomalias de pressão mais suaves e, de maneira geral, baixas pressões sobre a área de geração de ondas. Para Hs e maré meteorológica (SS), correlações negativas mais intensas foram verificadas que corresponde aos padrões com alta pressão próximo da área de interesse (WT2, WT4 e WT25).



622 Figura 8 – Cópulas gaussianas associadas a cada padrão atmosférico (WT) representadas em pares para o ponto 1  
 623 (da esquerda para a direita: Hs-Tp; Hs-SS; Tp-SS). A cor de fundo mostra o coeficiente de correlação  
 624 correspondente ( $\rho$ ). As cópulas gaussianas também analíticas são representadas para cada padrão  
 625 atmosférico.



626  
 627

Fonte: Elaborado pelo autor.

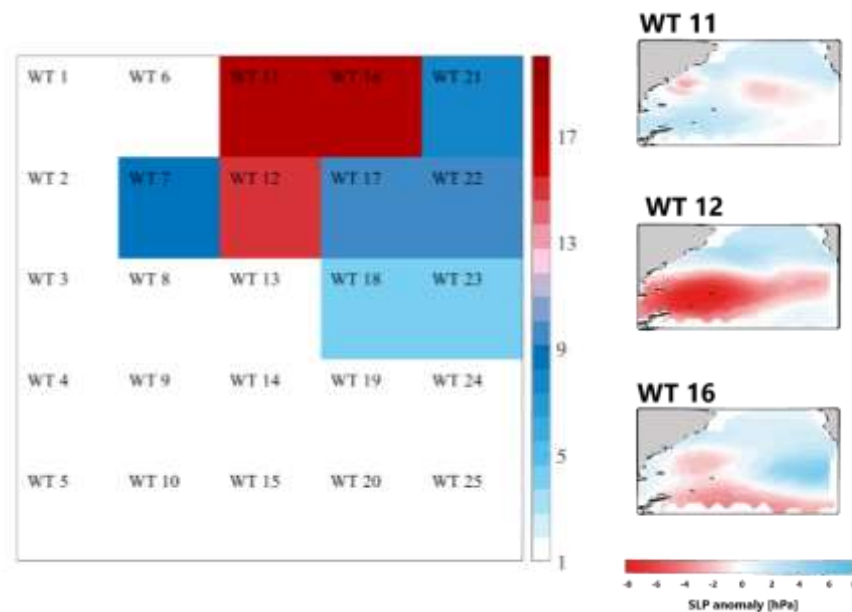
628 Em relação à variabilidade climática na região do Atlântico Sul, foram observados  
 629 brevemente o comportamento da Zona de Convergência do Atlântico Sul e do Modo Anular  
 630 Sul em relação à frequência nos padrões atmosféricos.

631 A análise de ocorrência da Zona de Convergência do Atlântico Sul foi conduzida  
 632 através das datas de ocorrência levantadas por Rosso et al. (2018). As datas foram vinculadas  
 633 às datas de ocorrência dos padrões atmosféricos para identificar os padrões associados.

634 A análise apontou para a predominância dos padrões WT11, WT12 e WT16 durante  
 635 os períodos de ZCAS estabelecida (Figura 9). Foram consideradas as datas de início e os dias  
 636 de persistência da ZCAS.

637 Os resultados indicaram que 17,5% dos casos de ocorrência da ZCAS são  
 638 concomitantes com o padrão WT11, 17,4 % com o padrão WT16 e 14,7% com o padrão WT12.  
 639 Esses três padrões juntos representam quase 50% dos eventos de estabelecimento da ZCAS no  
 640 Brasil (Figura 9).

641 Figura 9 – Frequência de ocorrência histórica dos eventos de ZCAS em relação a cada padrão atmosférico (WT).  
 642 As frequências são relativas ao total de eventos em relação aos 25 padrões atmosféricos (%). A direita  
 643 os padrões atmosféricos relacionados com a maior frequência de ocorrência da ZCAS.



644  
645

Fonte: Elaborado pelo autor.

646

647

A predominância dos eventos de estabelecimento da ZCAS sobre os padrões atmosféricos de verão, também serve como indicador da acurácia da metodologia para estudo de eventos atmosféricos.

648

649

650

651

652

653

Em estudos prévios são identificadas mudanças na posição e intensidade da ZCAS nos últimos anos (ZILLI et al., 2016; ZILLI; CARVALHO; LINTNER, 2019). Essa mudança impacta o regime de precipitação, ocasionando uma redução nas médias diárias na porção equatorial (ao norte) da ZCAS e um aumento na porção sul e sudeste do Brasil (ZILLI et al., 2016; ZILLI; CARVALHO; LINTNER, 2019).

654

655

656

657

658

659

660

Em relação as projeções futuras, os resultados analisados no capítulo 2 desta dissertação não são conclusivos para a ZCAS. Entre os padrões associados, os WT11 e WT16 apresentam redução na frequência, enquanto que o WT12 apresenta aumento na frequência. Entretanto, os resultados podem apenas estar reforçando que dependendo do posicionamento da ZCAS, que afetaria o padrão atmosférico predominante, diferentes projeções futuras são esperadas. Esse resultado está de acordo com o verificado por Ambrizzi e Ferraz (2015) e Zilli e Carvalho (2021).

661

662

663

664

665

Em Ambrizzi e Ferraz (2015) há um indicativo de uma pequena redução dos eventos de ZCAS em projeções futuras, mas ao mesmo tempo, existe o aumento de precipitação média acumulada para a região sudeste do Brasil. Se entendemos a ZCAS como uma característica mais frequente dos padrões WT11 e WT16, considerando as projeções futuras analisadas, há um indicador de redução na sua frequência de ocorrência. Por outro lado, o aumento da

666 precipitação média acumulada, citada por Ambrizzi e Ferraz (2015), poderia estar relacionada  
 667 aos eventos de ZCAS associados ao WT12, que apresentou aumento na frequência de  
 668 ocorrência em quase 80% dos cenários analisados.

669 Já o trabalho de Zilli e Carvalho (2021) é coerente com as tendências observadas em  
 670 trabalhos prévios, onde há o deslocamento para sul da ZCAS. Para as tendências de precipitação  
 671 a o resultado é bastante incerto, dada as grandes discrepâncias entre modelos utilizados no  
 672 trabalho. Todas essas questões são hipóteses que podem ser mais exploradas em trabalhos  
 673 futuros.

674 Outro mecanismo importante de variabilidade no Atlântico Sul é o Modo Anular Sul  
 675 (Southern Annular Mode - SAM) ou Oscilação Antártica (AAO). O SAM é o padrão dominante  
 676 de variações não sazonais da circulação troposférica no Hemisfério Sul.

677 Os dados do NCEP/NCAR disponibilizados pela *World Meteorological Organization*  
 678 foram utilizados na análise da frequência de ocorrência dos eventos de SAM (positivo e  
 679 negativo). Os dados foram associados aos padrões atmosféricos também pelas datas de  
 680 ocorrência, assim como na análise da ZCAS.

681 A Figura 10 (esquerda) mostra os padrões com maior probabilidade de ocorrência de  
 682 modos de SAM positivos (WT4, WT10 e WT13). A Oscilação Antártica, também conhecida  
 683 como Modo Anular do Sul (SAM), está fortemente associado com mudanças na posição das  
 684 correntes de jato, que possuem forte influência na formação e passagem de sistemas transientes  
 685 na região de estudo (THOMPSON; WALLACE, 2000; REBOITA; AMBRIZZI; DA ROCHA,  
 686 2009). Se olharmos para as distribuições marginais nesses padrões, verificamos grandes alturas  
 687 de onda significativas e período de pico mais longos, mas com a maré meteorológica baixa.  
 688 Isso é esperado, visto que o principal responsável pela geração de eventos de maré  
 689 meteorológica na região são os sistemas transientes, que sofrem redução durante a fase positiva  
 690 do SAM.

691 Figura 10 – Frequência de eventos SAM (AAO) em cada padrão atmosférico em eventos positivos (SAM>2,5) e  
 692 negativos (SAM<-2,5). Dados do NCEP/NCAR disponibilizados pela *World Meteorological*  
 693 *Organization*<sup>1</sup>.

---

1

[https://climexp.knmi.nl/getindices.cgi?WMO=NCEPData/cpc\\_aao\\_daily&STATION=AAO&TYPE=i&id=someone@somewhere&NPERYEAR=366](https://climexp.knmi.nl/getindices.cgi?WMO=NCEPData/cpc_aao_daily&STATION=AAO&TYPE=i&id=someone@somewhere&NPERYEAR=366)



694  
695  
696

Fonte: Paula Gomes da Silva, comunicação pessoal.

697 Com base nas projeções futuras investigadas no presente trabalho, os padrões  
698 predominantes na fase positiva apresentam redução na frequência de forma geral, com exceção  
699 do WT10, que apresenta aumento da frequência nos cenários SSP126 para longo prazo e  
700 SSP370 e SSP585 ambos para curto prazo. Para a fase negativa, se destaca a ocorrência dos  
701 padrões WT2, WT8 e WT21. Segundo as projeções futuras analisadas, o WT8 é o único que  
702 apresenta aumento na frequência para curto prazo nos cenários RCP4.5, RCP8.5, SSP370 e  
703 SSP585, com concordância de mais de 80% dos modelos analisados. Para o WT21 a frequência  
704 aumenta nos cenários SSP126 para longo prazo e nos cenários SSP370 e RCP8.5 para curto  
705 prazo. O futuro comportamento do SAM também é diverso na literatura, pois suas projeções  
706 divergem em resposta a diferentes forçantes (ex. taxas de aumento gases de efeito estufa e a  
707 taxa de recuperação de ozônio) (FOGT; MARSHALL, 2020). Entretanto, tendências positivas  
708 já são verificadas ao longo do século XX para fases de SAM positivo, especialmente durante o  
verão (FOGT et al., 2017).

709 Estas são apenas algumas das aplicabilidades para os padrões atmosféricos que podem  
710 ser analisadas partindo apenas das dadas de ocorrência dos eventos. Outras variáveis também  
711 podem ser testadas e projeções futuras seguras podem ser usadas para inferir sobre os efeitos  
712 das mudanças climáticas em diferentes eventos.

713

#### 714 4 CONCLUSÕES

715

716 A metodologia aqui apresentada é complementar ao trabalho de Perez et al. (2014a) e  
717 foi utilizada para compreender melhor o comportamento dos padrões atmosféricos atuais sobre  
718 o Oceano Atlântico Sul, e as suas variações na frequência de ocorrência em diferentes cenários

719 de projeções futuras. Modelos climáticos globais do CMIP5 e CMIP6 e diferentes cenários  
720 foram utilizados para dar suporte a essa análise. Os padrões atmosféricos foram definidos a  
721 partir dos campos de pressão ao nível do mar entre os anos de 1979 a 2010, utilizando dados de  
722 reanálise do CFSR.

723 Os modelos do CMIP5 e CMIP6 foram avaliados em função da sua capacidade em  
724 reproduzir a frequência de ocorrência histórica dos padrões atmosféricos e também suas  
725 variabilidades sazonais e interanuais. Dos 48 modelos analisados, os melhores desempenhos  
726 foram apresentados pelos modelos HadGEM2-ES, ACCESS1-0 e MPI-ESM-P do CMIP5 e  
727 HadGEM3-GC31-MM, HadGEM3-GC31-HM e HadGEM3-GC31-LL do CMIP6. Na análise  
728 das variabilidades interanuais além desses modelos também apresentaram bom desempenho o  
729 GFDL-ESM2M no CMIP5 e as duas versões do modelo ACCESS no CMIP6.

730 A consistência das projeções futuras foi avaliada a partir do limite de três desvios  
731 padrões do SI médio da magnitude das mudanças de todas as projeções. No cenário RCP2.6 o  
732 modelo IPSL-CM5A-LR e, no cenário RCP4.5 o modelo BESM-AO2-5 demonstraram  
733 magnitudes de mudança inconsistentes para o CMIP5. No cenário SSP126 o modelo GFDL-  
734 ESM4 também demonstrou inconsistência.

735 Com base nos resultados apresentados, conseguimos caracterizar a partir da frequência  
736 de ocorrência os padrões atmosféricos existentes sobre o Oceano Atlântico Sul, como proposto  
737 inicialmente nas nossas perguntas de pesquisa. De forma mais detalhada, conseguimos  
738 comparar como diferentes modelos climáticos globais simulam esses padrões. Identificamos,  
739 entre os modelos com melhor desempenho, que há uma superestimação dos padrões WT3,  
740 WT5, WT9, WT12 e WT17, e uma subestimação dos padrões WT11, WT13 e WT18. Mas as  
741 métricas estatísticas utilizadas para avaliar os modelos individualmente apresentaram valores  
742 satisfatórios.

743 Nossa hipótese se confirma e respondemos a última pergunta de pesquisa, através da  
744 diferença entre as projeções futuras e as simulações históricas dos modelos climáticos globais.  
745 As variações nas frequências de ocorrências de até 3% apontam para a existência de mudanças  
746 nos padrões atmosféricos em função das mudanças climáticas.

747 Os resultados obtidos ao longo desta dissertação contribuem para maior compreensão  
748 dos eventos de interação oceano-atmosfera no Oceano Atlântico Sul. Por ser uma região ainda  
749 pouco explorada, a análise de desempenho dos modelos climáticos globais do CMIP5 e CMIP6  
750 especificamente nessa região é fundamental para futuras pesquisas. Além disso, os dados

751 produzidos no artigo do capítulo 2 são disponibilizados e podem ser utilizados em uma ampla  
752 gama de estudos com variáveis meteoceanográficas para a região sul do Brasil. Uma parte das  
753 aplicações possíveis foram exploradas no capítulo 3, e o uso dos padrões atmosféricos do  
754 Atlântico Sul para a região sul do Brasil tem se mostrado bastante satisfatório. Novos estudos  
755 podem abordar o uso dos padrões atmosféricos para outras regiões, bem como partir dos  
756 mesmos padrões citados neste trabalho mas explorar características individuais de cada padrão  
757 e sua relação com diferentes variáveis (precipitação, descarga de rios, etc.).

758 Os resultados aqui obtidos já são aplicados no trabalho “Análise estatística dos  
759 indicadores climáticos que influenciam os portos de São Francisco do Sul (setor público) e  
760 Itapoá (setor privado)”, de Miriã Figueira de Souza Gollmann. Como mencionado  
761 anteriormente, os impactos dos padrões atmosféricos em processos meteoceanográficos vêm  
762 sendo trabalhados no artigo em construção “*An atmospheric predictor to characterize average  
763 and extreme Atmospheric Induced Water Level in shallow continental shelves: the example of  
764 the Southern Brazilian Coast*”, de autoria de Paula Gomes da Silva, Luana Borato, Antonio  
765 Fernando Härter Fetter Filho, Fernando Javier Mendez e Antonio Henrique da Fontoura Klein.

766

## 767 **5 CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS**

768

- 769 1. Esse estudo é um dos pioneiros no uso da metodologia de padrões atmosféricos para o  
770 Atlântico Sul;
- 771 2. Os dados gerados no capítulo 2 possibilitam uma ampla gama de estudos para a região,  
772 como alguns exemplos demonstrados no capítulo 3.
- 773 3. A avaliação do desempenho das simulações dos modelos climáticos globais é muito  
774 relevante para que estudos futuros possam escolher os modelos com melhor  
775 desempenho naquilo que desejam. Além do mais, existem poucos trabalhos nesse  
776 sentido para o Atlântico Sul;
- 777 4. Nós utilizamos dados dos modelos mais recentes, do CMIP6, e pudemos identificar  
778 pontos de melhora em relação ao CMIP5;
- 779 5. Toda a metodologia aqui apresentada (Capítulos 2 e 3) possibilita maior compreensão  
780 de inúmeras variáveis de interação oceano-atmosfera nessa região e suas projeções para  
781 o futuro em função de diferentes cenários de gases de efeito estufa (relacionado ao  
782 aquecimento global).

## REFERÊNCIAS

783

784

785 ABADI, A. M. *et al.* Evaluation of GCMs historical simulations of monthly and seasonal  
786 climatology over Bolivia. **Climate Dynamics**, v. 51, n. 1, p. 733–754, 1 jul. 2018.

787

788 About — IPCC. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/about/>>. Acesso em: 20 ago. 2020.

789

790 ALMEIDA, L. Q. de; PASCOALINO, A. Gestão de risco, desenvolvimento e (meio)  
791 ambiente no Brasil – um estudo de caso sobre desastres naturais de Santa Catarina. **Simpósio**  
792 **Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, 13, 2009.

793

794 ALVES, J. H. G. M.; MELO, E. Measurement and modeling of wind waves at the northern  
795 coast of Santa Catarina, Brazil. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 49, p. 13–28, 2001.

796

797 AMBRIZZI, T.; FERRAZ, S. E. T. An objective criterion for determining the South Atlantic  
798 Convergence Zone. **Frontiers in Environmental Science**, v. 3, p. 23, 2015.

799

800 ANDREWS, T. *et al.* Forcings, Feedbacks, and Climate Sensitivity in HadGEM3-GC3.1 and  
801 UKESM1. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 11, n. 12, p. 4377–4394,  
802 2019.

803

804 ARORA, V. K. *et al.* Carbon emission limits required to satisfy future representative  
805 concentration pathways of greenhouse gases. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 5,  
806 2011.

807

808 BERG, A.; MCCOLL, K. A. No projected global drylands expansion under greenhouse  
809 warming. **Nature Climate Change**, v. 11, n. 4, p. 331–337, abr. 2021.

810

811 BI, D. *et al.* The ACCESS coupled model: description, control climate and evaluation.  
812 **Australian Meteorological and Oceanographic Journal**, v. 63, n. 1, p. 41–64, mar. 2013.

813

814 BI, D. *et al.* Configuration and spin-up of ACCESS-CM2, the new generation Australian  
815 Community Climate and Earth System Simulator Coupled Model. **Journal of Southern**  
816 **Hemisphere Earth Systems Science**, v. 70, p. 225–251, 2020.

817

818 BIDEGAIN, M.; CAMILLONI, I. Performance of GCMs and climate future scenarios for  
819 Southeastern South America. **Proceedings of 8 ICSHMO**, Foz do Iguaçu, Brazil, April 24-  
820 28, 2006, INPE, p. 223-226.

821

822 BOCK, L. *et al.* Quantifying progress across different CMIP phases with the ESMValTool.  
823 **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 125, n. 21, p. e2019JD032321, 2020.

824

825 BOTHE, O.; JUNGCLAUS, J. H.; ZANCHETTIN, D. Consistency of the multi-model  
826 CMIP5/PMIP3-past1000 ensemble. **Climate of the Past**, v. 9, n. 6, p. 2471–2487, 5 nov.  
827 2013.

828

829 BOUCHER, O. *et al.* Presentation and evaluation of the IPSL-CM6A-LR climate model.  
830 **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 12, n. 7, p. e2019MS002010, 2020.

831

- 832 CAGIGAL, L. *et al.* Historical and future storm surge around New Zealand: from the 19th  
833 century to the end of the 21st century. **International Journal of Climatology**, v. 40, n. 3, p.  
834 1512–1525, 2020.
- 835  
836 CAMPOS, R. M.; PARENTE, C.E.; DE CAMARGO, R. Extreme Wave Analysis in Campos  
837 Basin (Rio de Janeiro - Brazil) Associated With Extra-Tropical Cyclones and Anticyclones.  
838 **Proceedings of the ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and**  
839 **Arctic Engineering. Volume 2: Structures, Safety and Reliability.** Rio de Janeiro, Brazil.  
840 July 1–6, 2012. pp. 71-80. ASME. <https://doi.org/10.1115/OMAE2012-83117>  
841
- 842 CAMUS, P. *et al.* A weather-type statistical downscaling framework for ocean wave climate.  
843 **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 119, n. 11, p. 7389–7405, 2014.  
844
- 845 CAMUS, P. *et al.* Statistical wave climate projections for coastal impact assessments:  
846 STATISTICAL WAVE CLIMATE PROJECTIONS. **Earth's Future**, v. 5, n. 9, p. 918–933,  
847 2017.  
848
- 849 CARRÈRE, L.; LYARD, F. Modeling the barotropic response of the global ocean to  
850 atmospheric wind and pressure forcing - comparisons with observations. **Geophysical**  
851 **Research Letters**, v. 30, n. 6, 2003.  
852
- 853 CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. Extreme precipitation events in  
854 southeastern South America and large-scale convective patterns in the South Atlantic  
855 Convergence Zone. **Journal of Climate**, v. 15, n. 17, p. 2377–2394, 1 set. 2002.  
856
- 857 CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic Convergence Zone:  
858 intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and  
859 extreme rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, n. 1, p. 88–108, 1 jan. 2004.  
860
- 861 CARTON, J. A.; GRODSKY, S. A.; LIU, H. Variability of the oceanic mixed layer, 1960–  
862 2004. **Journal of Climate**, v. 21, n. 5, p. 1029–1047, 1 mar. 2008.  
863
- 864 CASAS-PRAT, M.; WANG, X. L.; SIERRA, J. P. A physical-based statistical method for  
865 modeling ocean wave heights. **Ocean Modelling**, v. 73, p. 59–75, 1 jan. 2014.  
866
- 867 CHERCHI, A. *et al.* The response of subtropical highs to climate change. **Current Climate**  
868 **Change Reports**, v. 4, n. 4, p. 371–382, 1 dez. 2018.  
869
- 870 **CMIP**. Disponível em: <<https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip>>. Acesso em:  
871 20 ago. 2020.  
872
- 873 COLLINS, W. J. *et al.* Evaluation of HadGEM2 model. p. 47, [s.d.].  
874
- 875 DANABASOGLU, G. *et al.* The Community Earth System Model Version 2 (CESM2).  
876 **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 12, n. 2, p. e2019MS001916, 2020.  
877
- 878 DAVINI, P. *et al.* European blocking and Atlantic jet stream variability in the NCEP/NCAR  
879 reanalysis and the CMCC-CMS climate model. **Climate Dynamics**, v. 43, n. 1, p. 71–85, 1  
880 jul. 2014.  
881



- 882 DE ALMEIDA, R. A. F. *et al.* Negative ocean-atmosphere feedback in the South Atlantic  
883 Convergence Zone. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 18, 2007.
- 884
- 885 DEBORTOLI, N. S. *et al.* An index of Brazil's vulnerability to expected increases in natural  
886 flash flooding and landslide disasters in the context of climate change. **Natural Hazards**, v.  
887 86, n. 2, p. 557–582, 1 mar. 2017.
- 888
- 889 DERECZYNSKI, C. P.; MENEZES, W. F. METEOROLOGIA DA BACIA DE CAMPOS.  
890 *In: Meteorologia e Oceanografia*. [s.l.]: Elsevier, 2015, p. 1–54. Disponível em:  
891 <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9788535262087500088>>.
- 892
- 893 DONNER, L. J. *et al.* The dynamical core, physical parameterizations, and basic simulation  
894 characteristics of the atmospheric component AM3 of the GFDL global coupled model CM3.  
895 **Journal of Climate**, v. 24, n. 13, p. 3484–3519, 1 jul. 2011.
- 896
- 897 DUFRESNE, J.-L. *et al.* Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System  
898 Model: from CMIP3 to CMIP5. **Climate Dynamics**, v. 40, n. 9, p. 2123–2165, 1 maio 2013.
- 899
- 900 DUNNE, J. P. *et al.* GFDL's ESM2 Global Coupled Climate–Carbon Earth System Models.  
901 Part I: Physical Formulation and Baseline Simulation Characteristics. **Journal of Climate**, v.  
902 25, n. 19, p. 6646–6665, 1 out. 2012.
- 903
- 904 DUNNE, J. P. *et al.* The GFDL Earth System Model Version 4.1 (GFDL-ESM 4.1): overall  
905 coupled model description and simulation characteristics. **Journal of Advances in Modeling  
906 Earth Systems**, v. 12, n. 11, p. e2019MS002015, 2020.
- 907
- 908 DURRANT, T. *et al.* A global wave hindcast focussed on the Central and South Pacific. p.  
909 54, 2014 (technical report).
- 910
- 911 EYRING, V.; *et al.* Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6  
912 (CMIP6) experimental design and organization. **Geoscientific Model Development**, v. 9,  
913 n. 5, p. 1937–1958, 2016.
- 914
- 915 FANT, C.; ADAM SCHLOSSER, C.; STRZEPEK, K. The impact of climate change on wind  
916 and solar resources in southern Africa. **Applied Energy**, v. 161, p. 556–564, 1 jan. 2016.
- 917
- 918 FASULLO, J. T. Evaluating simulated climate patterns from the CMIP archives using  
919 satellite and reanalysis datasets using the Climate Model Assessment Tool (CMATv1).  
920 **Geoscientific Model Development**, v. 13, n. 8, p. 3627–3642, 21 ago. 2020.
- 921
- 922 FASULLO, J. T.; PHILLIPS, A. S.; DESER, C. evaluation of leading modes of climate  
923 variability in the CMIP archives. **Journal of Climate**, v. 33, n. 13, p. 5527–5545, 1 jul. 2020.
- 924
- 925 FERNANDES, L. G.; RODRIGUES, R. R. Changes in the patterns of extreme rainfall events  
926 in southern Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 3, p. 1337–1352, 2018.
- 927
- 928 FOGLI, P. G. *et al.* **INGV-CMCC Carbon (ICC): A Carbon Cycle Earth System Model**.  
929 Rochester, NY: Social Science Research Network, 1 abr. 2009. Disponível em:  
930 <<https://papers.ssrn.com/abstract=1517282>>. Acesso em: 4 fev. 2021.
- 931

- 932 FOGT, R. L. *et al.* A twentieth century perspective on summer Antarctic pressure change and  
 933 variability and contributions from tropical SSTs and ozone depletion. **Geophysical Research**  
 934 **Letters**, v. 44, n. 19, p. 9918–9927, 2017.
- 935  
 936 FOGT, R. L.; MARSHALL, G. J. The Southern Annular Mode: Variability, trends, and  
 937 climate impacts across the Southern Hemisphere. **WIREs Climate Change**, v. 11, n. 4, p.  
 938 e652, 2020.
- 939  
 940 FOWLER, H. J.; BLENKINSOP, S.; TEBALDI, C. Linking climate change modelling to  
 941 impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling.  
 942 **International Journal of Climatology**, v. 27, n. 12, p. 1547–1578, 2007.
- 943  
 944 FRÖLICHER, T. L.; FISCHER, E. M.; GRUBER, N. Marine heatwaves under global  
 945 warming. **Nature**, v. 560, n. 7718, p. 360–364, ago. 2018.
- 946  
 947 GIORGETTA, M. A. *et al.* Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-  
 948 ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. **Journal of**  
 949 **Advances in Modeling Earth Systems**, v. 5, n. 3, p. 572–597, 2013.
- 950  
 951 GORDON, C. *et al.* The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a  
 952 version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. **Climate Dynamics**, v.  
 953 16, n. 2, p. 147–168, 1 fev. 2000.
- 954  
 955 HALL, A. *et al.* Progressing emergent constraints on future climate change. **Nature Climate**  
 956 **Change**, v. 9, n. 4, p. 269–278, abr. 2019.
- 957  
 958 HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R.; FRIEDMAN, J. **The elements of statistical learning**. 2<sup>a</sup> ed.  
 959 [s.l.] Springer, 2001.
- 960  
 961 HE, B. *et al.* CAS FGOALS-f3-L model dataset descriptions for CMIP6 DECK experiments.  
 962 **Atmospheric and Oceanic Science Letters**, v. 13, n. 6, p. 582–588, 1 nov. 2020.
- 963  
 964 HE, C. *et al.* Responses of the Summertime Subtropical Anticyclones to Global Warming.  
 965 **Journal of Climate**, v. 30, n. 16, p. 6465–6479, 15 ago. 2017.
- 966  
 967 HELD, I. M. *et al.* Structure and performance of GFDL’s CM4.0 climate model. **Journal of**  
 968 **Advances in Modeling Earth Systems**, v. 11, n. 11, p. 3691–3727, 2019.
- 969  
 970 HERRMANN, M.L de P.; *et al.* Frequência de desastres naturais no estado de Santa Catarina  
 971 no período de 1980 a 2007. **XII Encuentro de Geógrafos de América Latina**, 2009.
- 972  
 973 HOFSTADTER, R.; BIDEKAIN, M. Performance of general circulation models in  
 974 southeastern South America. **Climate Research - CLIMATE RES**, v. 9, p. 101–105, 29 dez.  
 975 1997.
- 976  
 977 HURRELL, J.; VISBECK, M.; PIRANI, P. WCRP Coupled Model Intercomparison Project-  
 978 Phase 5-CMIP5, **CLIVAR Exchanges**, 15(56), 51, 2011.
- 979  
 980 HUTH, R. A circulation classification scheme applicable in GCM studies. **Theoretical and**  
 981 **Applied Climatology**, v. 67, n. 1, p. 1–18, 1 out. 2000.

- 982  
 983 HUTH, R.; *et al.* Classifications of atmospheric circulation patterns. **Annals of the New**  
 984 **York Academy of Sciences**, v. 1146, n. 1, 2008.
- 985  
 986 JORGETTI, T.; DA SILVA DIAS, P. L.; DE FREITAS, E. D. The relationship between  
 987 South Atlantic SST and SACZ intensity and positioning. **Climate Dynamics**, v. 42, n. 11, p.  
 988 3077–3086, 1 jun. 2014.
- 989  
 990 KIM, Y.-H. *et al.* Evaluation of the CMIP6 multi-model ensemble for climate extreme  
 991 indices. **Weather and Climate Extremes**, v. 29, p. 100269, 1 set. 2020.
- 992  
 993 KODAMA, Y. Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the Baiu  
 994 Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ) Part I: characteristics of subtropical frontal zones.  
 995 **Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II**, v. 70, n. 4, p. 813–836, 1992.
- 996  
 997 KREIENKAMP, F.; LORENZ, P.; GEIGER, T. Statistically downscaled CMIP6 projections  
 998 show stronger warming for Germany. **Atmosphere**, v. 11, n. 11, p. 1245, nov. 2020.
- 999  
 1000 LAMB, P. J. Large-scale tropical atlantic surface circulation patterns associated with  
 1001 Subsaharan weather anomalies. **Tellus**, v. 30, n. 3, p. 240–251, 1 jan. 1978.
- 1002  
 1003 LEE, T. *et al.* Evaluation of CMIP3 and CMIP5 wind stress climatology using satellite  
 1004 measurements and atmospheric reanalysis products. **Journal of Climate**, v. 26, n. 16, p.  
 1005 5810–5826, 15 ago. 2013.
- 1006  
 1007 LI, L. *et al.* The Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System model grid-point version 3  
 1008 (FGOALS-g3): description and evaluation. **Journal of Advances in Modeling Earth**  
 1009 **Systems**, v. 12, n. 9, p. e2019MS002012, 2020.
- 1010  
 1011 LIMA, M.; *et al.* Análise da configuração atmosférica associada a eventos extremos de chuva  
 1012 no litoral do estado de Santa Catarina, sul do Brasil. **III Simpósio Internacional de**  
 1013 **Climatologia**, 2009.
- 1014  
 1015 MACHADO, A. A. **Estudo dos padrões atmosféricos sinópticos geradores de eventos**  
 1016 **extremos de altura de onda, intensidade de vento, marés meteorológicas e**  
 1017 **erosão na costa do Rio Grande do Sul**. 2014. 87 f. Tese (Doutor em Oceanografia Física,  
 1018 Química e Geológica) – Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande,  
 1019 Porto Alegre, 2014.
- 1020  
 1021 MÄCHEL, H.; KAPALA, A.; FLOHN, H. Behaviour of the centres of action above the  
 1022 Atlantic since 1881. Part I: Characteristics of seasonal and interannual variability.  
 1023 **International Journal of Climatology**, v. 18, n. 1, p. 1–22, 1998.
- 1024  
 1025 MASSONNET, F. *et al.* Replicability of the EC-Earth3 Earth system model under a change in  
 1026 computing environment. **Geoscientific Model Development**, v. 13, n. 3, p. 1165–1178, 12  
 1027 mar. 2020.
- 1028  
 1029 MAURITSEN, T. *et al.* Developments in the MPI-M Earth System Model version 1.2 (MPI-  
 1030 ESM1.2) and its response to increasing CO<sub>2</sub>. **Journal of Advances in Modeling Earth**  
 1031 **Systems**, v. 11, n. 4, p. 998–1038, 2019.

- 1032  
 1033 MEEHL, G. A. *et al.* Intercomparison makes for a better climate model. **Eos, Transactions**  
 1034 **American Geophysical Union**, v. 78, n. 41, p. 445–451, 1997.  
 1035  
 1036 MEEHL, G. A. *et al.* Overview of the Coupled Model Intercomparison Project. **Bulletin of**  
 1037 **the American Meteorological Society**, v. 86, n. 1, p. 89–93, 2005.  
 1038  
 1039 MEEHL, G.A.; *et al.* The WCRP CMIP3 multimodel dataset: a new era in climate change  
 1040 research. **Bulletin of the American Meteorological Society**, **88**, 1383-1394, 2007.  
 1041  
 1042 MEINSHAUSEN, M. *et al.* Historical greenhouse gas concentrations for climate modelling  
 1043 (CMIP6). **Geoscientific Model Development**, v. 10, n. 5, p. 2057–2116, 31 maio 2017.  
 1044  
 1045 MEINSHAUSEN, M. *et al.* The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas  
 1046 concentrations and their extensions to 2500. **Geoscientific Model Development**, v. 13, n. 8,  
 1047 p. 3571–3605, 13 ago. 2020.  
 1048  
 1049 MELO FILHO, E. **Maré meteorológica na costa brasileira**. 2016. 328 f. Tese (Professor  
 1050 Titular de Engenharia Civil Costeira e Portuária) – Escola de Engenharia, Universidade  
 1051 Federal do Rio Grande, Porto Alegre, 2017.  
 1052  
 1053 MIGNOT, J.; BONY, S. Presentation and analysis of the IPSL and CNRM climate models  
 1054 used in CMIP5. **Climate Dynamics**, v. 40, n. 9, p. 2089–2089, 1 maio 2013.  
 1055  
 1056 MÜLLER, W. A. *et al.* A higher-resolution version of the Max Planck Institute Earth System  
 1057 Model (MPI-ESM1.2-HR). **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 10, n. 7, p.  
 1058 1383–1413, 2018.  
 1059  
 1060 NAKICENOVIC, N.; *et al.* **Special Report on Emissions Scenarios**. IPCC Special Report  
 1061 on Emissions Scenarios. 2000. Disponível em:  
 1062 <<http://www.grida.no/climate/ipcc/emission/index.htm>>. Acesso em: 26 nov. 2019.  
 1063  
 1064 NGUYEN, H. *et al.* Expansion of the Southern Hemisphere Hadley Cell in response to  
 1065 greenhouse gas forcing. **Journal of Climate**, v. 28, n. 20, p. 8067–8077, 15 out. 2015.  
 1066  
 1067 NOBRE, P. *et al.* Climate simulation and change in the brazilian climate model. **Journal of**  
 1068 **Climate**, v. 26, n. 17, p. 6716–6732, 1 set. 2013.  
 1069  
 1070 OLIVER, E. C. J. *et al.* Longer and more frequent marine heatwaves over the past century.  
 1071 **Nature Communications**, v. 9, n. 1, p. 1324, 10 abr. 2018.  
 1072  
 1073 O’NEILL, B. C. *et al.* The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for  
 1074 CMIP6. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 9, p. 3461–3482, 28 set. 2016.  
 1075  
 1076 O’NEILL, B. C. *et al.* The roads ahead: narratives for shared socioeconomic pathways  
 1077 describing world futures in the 21st century. **Global Environmental Change**, v. 42, p. 169–  
 1078 180, 1 jan. 2017.  
 1079

- 1080 PACHAURI, R. K.; MAYER, L. Intergovernmental Panel on Climate Change (Orgs.).  
1081 **Climate change 2014: synthesis report**. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on  
1082 Climate Change, 2015.
- 1083  
1084 PARISE, C. K.; CALLIARI, L. J.; KRUSCHE, N. Extreme storm surges in the south of  
1085 Brazil: atmospheric conditions and shore erosion. **Brazilian Journal of Oceanography**,  
1086 v. 57, n. 3, p. 175–188, 2009.
- 1087  
1088 PASTOR, M. A.; CASADO, M. J. Use of circulation types classifications to evaluate AR4  
1089 climate models over the Euro-Atlantic region. **Climate Dynamics**, v. 39, n. 7, p. 2059–2077,  
1090 1 out. 2012.
- 1091  
1092 PEREZ, J.; *et al.* Evaluating the performance of CMIP3 and CMIP5 global climate models  
1093 over the north-east Atlantic region. **Climate Dynamics**, v. 43, n. 9–10, p. 2663–2680, 2014a.
- 1094  
1095 PEREZ, J. *et al.* ESTELA: a method for evaluating the source and travel time of the wave  
1096 energy reaching a local area. **Ocean Dynamics**, v. 64, n. 8, p. 1181–1191, 1 ago. 2014b.
- 1097  
1098 PEREZ, J. *et al.* Statistical multi-model climate projections of surface ocean waves in Europe.  
1099 **Ocean Modelling**, Waves and coastal, regional and global processes. v. 96, p. 161–170, 1  
1100 dez. 2015.
- 1101  
1102 PETERSON, R. G.; STRAMMA, L. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean.  
1103 **Progress in Oceanography**, v. 26, n. 1, p. 1–73, 1991.
- 1104  
1105 REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. DA. Relationship between the southern  
1106 annular mode and southern hemisphere atmospheric systems. **Revista Brasileira de**  
1107 **Meteorologia**, v. 24, p. 48–55, mar. 2009.
- 1108  
1109 REBOITA, M. S. *et al.* Extratropical cyclones over the southwestern South Atlantic Ocean:  
1110 HadGEM2-ES and RegCM4 projections. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 6,  
1111 p. 2866–2879, 2018.
- 1112  
1113 REBOITA, M. S. *et al.* The South Atlantic Subtropical Anticyclone: present and future  
1114 climate. **Frontiers in Earth Science**, v. 7, 2019.
- 1115  
1116 REICHLER, T.; KIM, J. How well do coupled models simulate today's climate? **Bulletin of**  
1117 **the American Meteorological Society**, v. 89, n. 3, p. 303–312, 1 mar. 2008.
- 1118  
1119 REIS, R. Para ser grande sê inteiro. **Revista Presença**, Coimbra, n. 37, fev. 1933.
- 1120  
1121 PIANCA, C.; MAZZINI, P. L. F.; SIEGLE, E. Brazilian offshore wave climate based on  
1122 NWW3 reanalysis. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 58, n. 1, p. 53–70, mar. 2010.
- 1123  
1124 ROCHA, R. P. da; SUGAHARA, S.; SILVEIRA, R. B. da. Sea waves generated by  
1125 extratropical cyclones in the South Atlantic Ocean: hindcast and validation against altimeter  
1126 data. **Weather and Forecasting**, v. 19, p. 398–410, 2004.
- 1127  
1128 RODRIGUES, R. R. *et al.* Common cause for severe droughts in South America and marine  
1129 heatwaves in the South Atlantic. **Nature Geoscience**, v. 12, n. 8, p. 620–626, ago. 2019.

- 1130  
1131 ROSSO, F. V. *et al.* Influence of the Antarctic Oscillation on the South Atlantic Convergence  
1132 Zone. **Atmosphere**, v. 9, n. 11, p. 431, nov. 2018.
- 1133  
1134 RUEDA, A.; *et al.* A multivariate extreme wave and storm surge climate emulator based on  
1135 weather patterns. **Ocean Modelling**, v. 104, p. 242–251, 2016.
- 1136  
1137 SAHA, S. *et al.* The NCEP climate forecast system reanalysis. **Bulletin of the American**  
1138 **Meteorological Society**, v. 91, n. 8, p. 1015–1058, 1 ago. 2010.
- 1139  
1140 SAKAMOTO, T. T. *et al.* MIROC4h—A new high-resolution atmosphere-ocean coupled  
1141 general circulation model. **Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II**, v. 90, n.  
1142 3, p. 325–359, 2012.
- 1143  
1144 SCHULZWEIDA, U. **CDO User Guide** (Version 1.9.8).  
1145 <http://doi.org/10.5281/zenodo.3539275> (2019).
- 1146  
1147 SCOCCIMARRO, E. *et al.* Effects of tropical cyclones on ocean heat transport in a high-  
1148 resolution coupled general circulation model. **Journal of Climate**, v. 24, n. 16, p. 4368–4384,  
1149 15 ago. 2011.
- 1150  
1151 SEN GUPTA, A. *et al.* Drivers and impacts of the most extreme marine heatwave events.  
1152 **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 19359, 9 nov. 2020.
- 1153  
1154 SMITH, G. A. *et al.* Global wave hindcast with Australian and Pacific Island Focus: From  
1155 past to present. **Geoscience Data Journal**, v. 8, n. 1, p. 24–33, 2021.
- 1156  
1157 SOUZA, D. C. DE; SILVA, R. R. DA. Ocean-Land Atmosphere Model (OLAM)  
1158 performance for major extreme meteorological events near the coastal region of southern  
1159 Brazil. **Climate Research**, v. 84, p. 1–21, 3 jun. 2021.
- 1160  
1161 STERL, A.; HAZELEGER, W. Coupled variability & air-sea interaction in the South Atlantic  
1162 Ocean. **Climate Dynamics**, v. 21, p. 559–571, 1 dez. 2003.
- 1163  
1164 STOCKDON, H. F. *et al.* Empirical parameterization of setup, swash, and runup. **Coastal**  
1165 **Engineering**, v. 53, n. 7, p. 573–588, 1 mai. 2006.
- 1166  
1167 STRYHAL, J.; HUTH, R. Classifications of winter atmospheric circulation patterns:  
1168 validation of CMIP5 GCMs over Europe and North Atlantic. **Climate Dynamics**, v. 52, p.  
1169 3575–3598, 2019.
- 1170  
1171 SUN, X.; COOK, K. H.; VIZY, E. K. The South Atlantic Subtropical High: Climatology and  
1172 Interannual Variability. **Journal of Climate**, v. 30, n. 9, p. 3279–3296, 1 mai. 2017.
- 1173  
1174 SWART, N. C.; FYFE, J. C. Observed and simulated changes in the Southern Hemisphere  
1175 surface westerly wind-stress. **Geophysical Research Letters**, v. 39, n. 16, 2012.
- 1176  
1177 SWART, N. C. *et al.* The Canadian Earth System Model version 5 (CanESM5.0.3).  
1178 **Geoscientific Model Development**, v. 12, n. 11, p. 4823–4873, 25 nov. 2019.
- 1179

- 1180 TATEBE, H. *et al.* Description and basic evaluation of simulated mean state, internal  
 1181 variability, and climate sensitivity in MIROC6. **Geoscientific Model Development**, v. 12, n.  
 1182 7, p. 2727–2765, 8 jul. 2019.
- 1183  
 1184 TAYLOR, K. E.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G. A. An overview of CMIP5 and the  
 1185 experiment design. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 4, p. 485–  
 1186 498, 1 abr. 2012.
- 1187  
 1188 THOMPSON, D. W. J.; WALLACE, J. M. Annular modes in the extratropical circulation.  
 1189 part i: month-to-month variability. **Journal of Climate**, v. 13, n. 5, p. 1000–1016, 1 mar.  
 1190 2000.
- 1191  
 1192 TOUZÉ-PEIFFER, L.; BARBEROUSSE, A.; LE TREUT, H. The Coupled Model  
 1193 Intercomparison Project: history, uses, and structural effects on climate research. **WIREs**  
 1194 **Climate Change**, v. 11, n. 4, p. e648, 2020.
- 1195  
 1196 VAN VUUREN, D. P.; *et al.* The representative concentration pathways: an overview.  
 1197 **Climatic Change**, v. 109, n. 1–2, p. 5–31, 2011.
- 1198  
 1199 VENEGAS, S. A.; MYSAK, L. A.; STRAUB, D. N. Atmosphere–ocean coupled variability  
 1200 in the South Atlantic. **Journal of Climate**, v. 10, n. 11, p. 2904–2920, 1 nov. 1997.
- 1201  
 1202 VERA, C.; *et al.* Climate change scenarios for seasonal precipitation in South America from  
 1203 IPCC-AR4 models. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 13, 2006.
- 1204  
 1205 VILLAMAYOR, J.; AMBRIZZI, T.; MOHINO, E. Influence of decadal sea surface  
 1206 temperature variability on northern Brazil rainfall in CMIP5 simulations. **Climate Dynamics**,  
 1207 v. 51, n. 1, p. 563–579, 1 jul. 2018.
- 1208  
 1209 VOLDOIRE, A. *et al.* The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic  
 1210 evaluation. **Climate Dynamics**, v. 40, n. 9, p. 2091–2121, 1 maio 2013.
- 1211  
 1212 VOLODIN, E. M. *et al.* Simulation of modern climate with the new version of the INM RAS  
 1213 climate model. **Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics**, v. 53, n. 2, p. 142–155, 1 mar.  
 1214 2017a.
- 1215  
 1216 VOLODIN, E. M. *et al.* Simulation of the present-day climate with the climate model  
 1217 INMCM5. **Climate Dynamics**, v. 49, n. 11, p. 3715–3734, 1 dez. 2017b.
- 1218  
 1219 VOLODIN, E. M. *et al.* Simulation of the modern climate using the INM-CM48 climate  
 1220 model. **Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling**, v. 33, n. 6,  
 1221 p. 367–374, 1 dez. 2018.
- 1222  
 1223 VOLODIN, E. M.; DIANSKII, N. A.; GUSEV, A. V. Simulating present-day climate with the  
 1224 INMCM4.0 coupled model of the atmospheric and oceanic general circulations. **Izvestiya,**  
 1225 **Atmospheric and Oceanic Physics**, v. 46, n. 4, p. 414–431, 1 ago. 2010.
- 1226  
 1227 WATANABE, M. *et al.* Improved climate simulation by MIROC5: mean states, variability,  
 1228 and climate sensitivity. **Journal of Climate**, v. 23, n. 23, p. 6312–6335, 1 dez. 2010.
- 1229

- 1230 WATANABE, S. *et al.* MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-  
1231 20c3m experiments. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 4, p. 845–872, 4 out. 2011.  
1232
- 1233 WYSER, K. *et al.* On the increased climate sensitivity in the EC-Earth model from CMIP5 to  
1234 CMIP6. **Geoscientific Model Development**, v. 13, n. 8, p. 3465–3474, 4 ago. 2020.  
1235
- 1236 YIN, L. *et al.* How well can CMIP5 simulate precipitation and its controlling processes over  
1237 tropical South America? **Climate Dynamics**, v. 41, n. 11, p. 3127–3143, 1 dez. 2013.  
1238
- 1239 YUKIMOTO, S. *et al.* A new global climate model of the Meteorological Research Institute:  
1240 MRI-CGCM3 —model description and basic performance—. **Journal of the Meteorological**  
1241 **Society of Japan. Ser. II**, v. 90A, p. 23–64, 2012.  
1242
- 1243 YUKIMOTO, S. *et al.* Meteorological Research Institute-Earth System Model Version 1  
1244 (MRI-ESM1). **Technical Report No. 64**, <http://doi.org/10.11483/mritechrepo.64>  
1245 (Meteorological Research Institute, 2011).  
1246
- 1247 YUKIMOTO, S. *et al.* The Meteorological Research Institute Earth System model version  
1248 2.0, MRI-ESM2.0: description and basic evaluation of the physical component. **Journal of**  
1249 **the Meteorological Society of Japan. Ser. II**, v. 97, p. 931–965, 2019.  
1250
- 1251 ZIEHN, T. *et al.* The Australian Earth System Model: ACCESS-ESM1.5. **Journal of**  
1252 **Southern Hemisphere Earth Systems Science**, v. 70, n. 1, p. 193–214, 24 ago. 2020.  
1253
- 1254 ZILLI, M. T. *et al.* A comprehensive analysis of trends in extreme precipitation over  
1255 southeastern coast of Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 5, p. 2269–  
1256 2279, 2016.  
1257
- 1258 ZILLI, M. T.; CARVALHO, L. M. V.; LINTNER, B. R. The poleward shift of South Atlantic  
1259 Convergence Zone in recent decades. **Climate Dynamics**, v. 52, n. 5, p. 2545–2563, 1 mar.  
1260 2019.  
1261
- 1262 ZILLI, M. T.; CARVALHO, L. M. V. Detection and attribution of precipitation trends  
1263 associated with the poleward shift of the South Atlantic Convergence Zone using CMIP5  
1264 simulations. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 5, p. 3085–3106, 2021.



## APÊNDICE A – SUPPLEMENTARY TABLE

### CMIP5 and CMIP6 Global Climate Models

Table 1 – CMIP5 and CMIP6 Global Climate Models (GCMs) used in the analyses. Note that not all models had versions in both phases of CMIP or all scenarios considered. References from all GCMs are included in the manuscript reference list (references 19-57 in the order of the table below).

Model	Version	Atm Model	Atm resolution (EWxNS)	CMIP5	CMIP6	Scenarios	Institute	Country	Reference
ACCESS	1-0	AGCM v1-0	1.875°x1.25°	x		RCP 4.5, 8.5	Bureau of Meteorology (Bureau) and Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO)	Australia	BI et al. (2013)
	1-3	AGCM v1-0	1.875°x1.25°	x		RCP 4.5, 8.5			
	CM2	MetUM-HadGEM3-GA7.1	N96L85 (192 x 144 lon/lat)		x	SSP 126, 245, 370, 585			BI et al. (2020)
	ESM1-5	HadGAM2	192 x 145 (lon/lat)		x	SSP 126, 245, 370, 585			ZIEHN et al. (2020)
BESM	OA2-5	CPTEC/INP AGCM	1.875°x1.875° (T62L28)	x		RCP 4.5	National Institute for Space Research	Brazil	NOBRE et al. (2013)
CanESM	2	CanAM4 (AGCM15i)	T63L35	x		RCP 2.6, 4.5, 8.5	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	Canada	ARORA et al. (2011)
	5	CanAM5	T63L49 (128 x 64 lon/lat)		x	SSP 126, 245, 370, 585			SWART et al. (2019)

Model	Version	Atm Model	Atm resolution (EWxNS)	CMIP5	CMIP6	Scenarios	Institute	Country	Reference
CMCC	CESM	ECHAM5	T31L39 (96 x 48 lon/lat)	x		RCP 8.5	Centro EuroMediterraneo per I Cambiamenti Climatici	Italy	FOGLI et al. (2009)
	CM	ECHAM5	0.75°x 0.75°	x		RCP 4.5, 8.5			SCOCCIMARRO et al. (2011)
	CMS	ECHAM5	T63L95	x		RCP 4.5, 8.5			DAVINI et al. (2014)
CNRM	CM5	ARPEGE-Climat (V5.2.1)	TL127L31	x		RCP 2.6, 4.5, 8.5	Center National Weather Research	France	VOLDOIRE et al. (2013)
CESM	2	CAM6	0.9°x1.25° (288 x 192 lon/lat)		x	SSP 126, 245, 370, 585	Community Earth System Model Contributors	EUA	DANABASOGLU et al. (2020)
EC-Earth	3	IFS cy36r4	TL255 (512 x 256 lon/lat)		x	SSP 126, 245, 370, 585	EC -EARTH consortium	European group	MASSONNET et al. (2020); WYSER et al. (2020)
	3-Veg	IFS cy36r4	TL255 (512 x 256 lon/lat)		x	SSP 126, 245, 370, 585			
FGOALS	f3-L	FAMIL2.2	360 x 180 (lon/lat)		x	none	Institute of Atmospheric Physics (LASG) and Centre for Earth System Science (CESS)	China	HE et al. (2020)
	g3	GAMIL2	180 x 90 (lon/lat)		x	SSP 126, 245, 370, 585			LI et al. (2020)
GFDL	CM3	AM3p9	C48L48	x		RCP 2.6, 4.5, 8.5	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (NOAA)	EUA	DONNER et al. (2011)
	ESM2G	AM2p14	M45L24	x		RCP 2.6, 4.5, 8.5			DUNNE et al. (2012)
	ESM2M	AM2p14	M45L24	x		RCP 2.6, 4.5, 8.5			HELD et al. (2019)
	CM4	GFDL-AM4.0.1	360 x 180 (lon/lat)		x	SSP 245, 585			DUNNE et al. (2020)
	ESM4	GFDL-AM4.1	360 x 180 (lon/lat)		x	SSP 126, 245, 370, 585			

Model	Version	Atm Model	Atm resolution (EWxNS)	CMIP5	CMIP6	Scenarios	Institute	Country	Reference
HadGEM	HadCM3	HadAM3	N48L19	x		none	Hadley Centre for Climate Prediction and Research	United Kingdom	GORDON et al. (2000)
	2-AO	HadGAM2	N96L38	x		RCP 2.6, 4.5, 8.5			COLLINS et al. (2008)
	2-CC	HadGAM2	N96L60	x		RCP 4.5, 8.5			
	2-ES	HadGAM2	L38N96L38 (1.25° × 1.875°)	x		RCP 2.6, 4.5, 8.5			
	3-GC31-HM	MetUM-HadGEM3-GA7.1	N512L85 (1024 x 768 lon/lat)		x	none			ANDREWS et al. (2019)
	3-GC31-LL	MetUM-HadGEM3-GA7.1	N96L85 (192 x 144 lon/lat)		x	SSP 126, 245, 585			
	3-GC31-MM	MetUM-HadGEM3-GA7.1	N216L85 (432 x 324 lon/lat)		x	SSP 126, 585			
INMCM	4		1.5° x 2°	x		RCP 4.5, 8.5	Institute for Numerical Mathematics	Russia	VOLODIN et al. (2010)
	4-8	INM-AM4-8	2°x1.5° (180 x 120 lon/lat)		x	SSP 126, 245, 370, 585			VOLODION et al. (2018)
	5-0	INM-AM5-0	2°x1.5° (180 x 120 lon/lat)		x	SSP 126, 245, 370, 585			VOLODIN et al. (2017a); VOLODIN et al. (2017b)
IPSL	CM5A-LR	LMDZ5_NPv3.1	96x95 (lon/lat)	x		RCP 2.6, 4.5, 8.5	Institut Pierre -Simon Laplace	France	DUFRESNE et al. (2013); MIGNOT et al. (2013)
	CM5A-MR	LMDZ4_v5	144x143 (lon/lat)	x		RCP 2.6, 4.5, 8.5			
	CM6A-LR	NPv6	N96L79 (144 x 143 lon/lat)		x	SSP 126, 245, 370, 585			BOUCHER et al. (2020)

Model	Version	Atm Model	Atm resolution (EWxNS)	CMIP5	CMIP6	Scenarios	Institute	Country	Reference
MIROC	4h	AGCM5.8	T213L56	x		none	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for marine -Earth Science and Technology	Japan	SAKAMOTO et al. (2012)
	5	MIROC-AGCM6	T85L40	x		RCP 2.6, 4.5, 8.5			WATANABE et al. (2010)
	ESM	MIROC-AGCM 2010	T42L80	x		RCP 2.6, 4.5, 8.5			WATANABE et al. (2011)
	ESM-CHEM	MIROC-AGCM 2010	T42L80	x		RCP 2.6, 4.5, 8.5			
	6	CCSR AGCM	T85L81 (256 x 128 lon/lat)		x	SSP 126, 245, 370, 585			TATEBE et al. (2019)
MPI-ESM	LR	ECHAM6	T63L47	x		RCP 2.6, 4.5, 8.5	Max Planck Institute für Meteorologie	Germany	GIORGETTA et al. (2013)
	MR	ECHAM6	T63L47	x		RCP 2.6, 4.5, 8.5			
	P	ECHAM6	T63L47	x		none			
	1-2-HAM	ECHAM6.3	T63L47 (192 x 96 lon/lat)		x	none			MAURITSEN et al. (2019); MÜLLER et al. (2018)
	1-2-HR	ECHAM6.3	T127L95 (384 x 192 lon/lat)		x	SSP 126, 245, 370, 585			
	1-2-LR	ECHAM6.3	T63L47 (192 x 96 lon/lat)		x	SSP 126, 245, 370, 585			
MRI	CGCM3	GSMUV-110112	TL159L48	x		RCP 2.6, 4.5, 8.5	Meteorological Research Institute	Japan	YUKIMOTO et al. (2012)
	ESM1	GSMUV-110120oc	TL159L48	x		RCP 8.5			YUKIMOTO et al. (2011)
	ESM2-0	MRI-AGCM3.5	TL159 (320 x 160 lon/lat)		x	SSP 126, 245, 370, 585			YUKIMOTO et al. (2019)

## **APÊNDICE B – ACKNOWLEDGMENTS**

We would like to thank the climate modeling groups (listed in Figure 3 and Supplementary Table 1 of this work) for making the results from different models available to the scientific community. We also acknowledge the Federal University of Santa Catarina (UFSC) and the Graduate Program in Oceanography (PPGOceano) for their support in reviewing the text of this paper. Finally, we thank the whole team of the Regional Oceanic and Atmospheric Downscaling Project (ROAD) and partner universities (Federal University of Rio Grande - FURG, Federal University of Rio Grande do Sul - UFRGS, and the University of Cantabria) for their contributions to the project discussions. This work was funded by the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES) through the call for Development of Modeling of the Terrestrial System No. 11/2016, Process Number: 88887.145393 / 2017-00 Regional Oceanic and Atmospheric Downscaling Project (ROAD-BESM - Regional Oceanic and Atmospheric Downscaling).

## **APÊNDICE C – AUTHOR CONTRIBUTIONS**

L.B. led the processing of GCM data, the performance analysis, and the manuscript writing.

A.F.H.F.F. is the paper supervisor. He supervised data processing and statistical analysis, provided scripts and base codes, and contributed to the writing of the manuscript.

P.G.S led the weather type classification process, assisted in statistical analysis, and contributed to the manuscript writing.

F.J.M.I am one of the developers of the methodology applied in the paper, contributing to supervising the statistical analysis and manuscript writing.

A.H.F.K is the paper reviewer and associated project coordinator.