

Universidade de São Paulo  
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas  
Departamento de Ciências Atmosféricas

Ronaldo Maia de Jesus Palmeira

**Impacto das mudanças climáticas nas projeções  
de extremos de onda sobre as Bacias  
Sedimentares Brasileiras**

São Paulo

2024



Ronaldo Maia de Jesus Palmeira

**Impacto das mudanças climáticas nas projeções  
de extremos de onda sobre as Bacias  
Sedimentares Brasileiras**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação  
em Meteorologia do Instituto de Astronomia,  
Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universi-  
dade de São Paulo como requisito parcial para  
a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Meteorologia

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Camargo

Co-Orientador: Dr. Ricardo Martins Campos

São Paulo

2024



# Agradecimentos

Agradeço a Deus por guiar meus passos e iluminar meu caminho ao longo desta jornada acadêmica, permitindo-me alcançar com saúde este momento tão significativo em minha vida.

À minha esposa, Ana Cristina, meu porto seguro e fonte inesgotável de amor, apoio e muuuita compreensão. Seu encorajamento e paciência foram fundamentais para que eu pudesse me dedicar plenamente aos estudos e superar os desafios que surgiram.

Ao meu filho, João Vítor, por trazer alegria, orgulho e motivação constante aos meus dias, seja através das demonstrações de carinho, nos momentos de lazer ou nas conversas mais pedagógicas.

Aos meus orientadores Ricardo de Camargo e Ricardo Martins Campos, que por coincidência (ou não) possuem o mesmo nome do meu pai biológico e cuja orientação foram indispensáveis para o desenvolvimento e conclusão desta tese. Suas contribuições, críticas e incentivo fizeram toda diferença ao moldar minhas ideias e me ajudar a alcançar os mais altos padrões de excelência acadêmica.

Aos pesquisadores do projeto WESACEx Rosmeri Porfirio, Ricardo de Camargo, Natália Crespo, Natália Pillar, Andressa Cardoso, José Antônio, Moreira Lima, Clarisse Kauffmann e Marcelo Andrioni, pela construção e condução do projeto que serviu como alicerce para o desenvolvimento desta tese.

Ao Centro de Pesquisas da Petrobras (CENPES) pelo financiamento desta pesquisa através do projeto WeSACEx e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida nos meses finais do doutorado. Este suporte foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho, destacando a importância do papel de instituições públicas e privadas na pesquisa brasileira.

Aos meus estimados colegas de trabalho da AtmosMarine, pelo apoio, colaboração, camaradagem e compreensão especialmente nesta fase final. Fiquem com a certeza de que a convivência diária presencial ou remota, tem tornando esta jornada ainda mais gratificante e enriquecedora.

Um agradecimento especial a José Antônio Moreira Lima e Luis Manoel Paiva Nunes, dois grandes amigos que fiz ao longo da vida profissional que acompanharam, de perto ou de longe, desde o início a minha vida profissional e acadêmica, sempre incentivando, acreditando e impulsionando muito além do que seria imaginado.

Por fim, expresso minha profunda gratidão à Universidade de São Paulo pelo apoio institucional, recursos e ambiente de pesquisa fornecidos ao longo deste trabalho. Sou grato pela oportunidade de aprender e crescer dentro de uma instituição pública de excelência tão rica e diversificada. Agradeço também aos professores, funcionários e colegas que contribuíram de maneira significativa para esta jornada. Sem dúvida, a experiência na Universidade de São Paulo foi essencial para minha formação acadêmica e profissional.

*“Ser feliz ao realizar a jornada pode ser muito melhor do que chegar ao destino com sucesso.”*

Jordan B. Peterson



# Resumo

Este trabalho apresenta um estudo de avaliação das condições médias e extremas de ondas na porção oeste do Oceano Atlântico Sul utilizando o modelo WAVEWATCH III (WW3) submetido à forçantes atmosféricas derivadas de regionalizações climáticas com os modelos RegCM4 e WRF, os quais foram aninhados nos modelos climáticos globais HadGEM2-ES e MPI-ESM-MR do CMIP5. O estudo relevou os potenciais efeitos das mudanças climáticas nos parâmetros de ondas que foram investigados através de projeções de clima futuro, considerando o cenário de aquecimento RCP8.5 do IPCC.

Para alcançar o objetivo principal, foram estabelecidas diversas etapas, incluindo a implementação de um sistema de modelagem de ondas usando o modelo WW3, calibração do modelo de ondas para todas as forçantes de vento, obtenção do clima presente das ondas através de simulações com forçantes atmosféricas regionalizadas por reanálise, e avaliação do impacto dos métodos de correção de viés aplicados aos campos de vento na simulação de ondas. Simulações subsequentes foram realizadas com base em projeções do clima presente e futuro, onde tendências e mudanças de regime foram identificadas ao longo de todo o período de simulação.

A pesquisa identificou tendências e mudanças de regime estatisticamente significativas nas condições extremas de ondas ao longo da costa brasileira, com algumas regiões experimentando aumentos enquanto outras registraram diminuições na altura e período das ondas. Uma das descobertas mais significativas foi a identificação de uma tendência de aumento nas condições extremas especialmente ao sul de 50°S. Essa tendência foi consistente tanto no futuro próximo quanto no futuro distante, sugerindo um impacto contínuo e duradouro das mudanças climáticas nessas regiões.



# Abstract

This work presents a study evaluating the mean and extreme wave conditions in the western portion of the South Atlantic Ocean using the WAVEWATCH III (WW3) model subjected to atmospheric forcings derived from climate regionalizations with the RegCM4 and WRF models, which were nested within the global climate models HadGEM2-ES and MPI-ESM-MR from CMIP5. The study revealed the potential effects of climate change on the wave parameters, which were investigated through future climate projections, considering the RCP8.5 warming scenario from the IPCC.

To achieve the main objective, several steps were established, including the implementation of a wave modeling system using the WW3 model, calibration of the wave model for all wind forcings, obtaining present wave climate through simulations with atmospheric forcings regionalized by reanalysis, and assessing the impact of bias correction methods applied to wind fields on wave simulation. Subsequent simulations were conducted based on present and future climate projections, where trends and regime changes were identified throughout the entire simulation period.

The research identified statistically significant trends and regime shifts in mean and extreme wave conditions along the Brazilian coast, with some regions experiencing increases while others recorded decreases in wave height and period. One of the most significant findings was the identification of an increasing trend in extreme conditions, especially south of 50°S. This trend was consistent both in the near and distant future, suggesting a continuous and lasting impact of climate change in these regions.



# Lista de Figuras

1.1	Regiões ciclogênicas encontradas em Gan e Rao (1991) (a), Palmeira (2003) (b), Reboita et al. (2018) (c) e Gramscianinov et al. (2020) . . . . .	33
1.2	Esquema das três situações relacionadas a ondas extremas (representadas por um padrão pontilhado) dentro do ciclone extratropical. (a) Ondas extremas (indicadas por sombras e ondulações) são observadas após a passagem da frente fria; (b) na área de convergência dos ventos, à frente da frente fria; e (c) ao longo da frente quente, no setor quente do ciclone. As frentes frias e quentes são representadas conforme a convenção meteorológica padrão. O centro aproximado de baixa pressão e os sistemas de alta pressão são denotados por "L" e "H", respectivamente. Fonte: Gramscianinov et al. (2020) . . . . .	34
2.1	Domínios dos modelos atmosféricos RegCM4 e WRF e de ondas WW3. . . . .	48
3.1	Campos de diferença da média de Hs no período de 1993 a 2018 entre os experimentos WW3-RegCM4/ERA-Interim (b,d) e WW3-WRF/CFSR (c,e) e as reanálises do WAMRYS (a) . . . . .	67
3.2	Campos de diferença do percentil 95 de Hs no período de 1993 a 2018 entre os experimentos WW3-RegCM4/ERA-Interim (b,d) e WW3-WRF/CFSR (c,e) e as reanálises do WAMRYS (a) . . . . .	69
3.3	Mapa cartográfico da região de estudo com as bacias marinhas e os pontos dos dados utilizados. . . . .	72

3.4	Séries temporais (a), diagrama de Taylor (b), função de distribuição de probabilidade (PDF) (c) e Q-Q plot dos dados de altura significativa de onda na boia de Rio Grande (PNBOIA) comparado com os experimentos WW3-RegCM4/ERA-Interim, WW3-RegCM4/ERA-Interim Ajustado, WW3-WRF/CFSR, WW3-WRF/CFSR Ajustado . . . . .	74
3.5	Séries temporais (a), diagrama de Taylor (b), função de distribuição de probabilidade (PDF) (c) e Q-Q plot dos dados de altura significativa de onda na boia de Itajaí (PNBOIA) comparado com os experimentos WW3-RegCM4/ERA-Interim, WW3-RegCM4/ERA-Interim Ajustado, WW3-WRF/CFSR, WW3-WRF/CFSR Ajustado . . . . .	76
3.6	Séries temporais (a), diagrama de Taylor (b), função de distribuição de probabilidade (PDF) (c) e Q-Q plot dos dados de altura significativa de onda na boia de Santos (PNBOIA) comparado com os experimentos WW3-RegCM4/ERA-Interim, WW3-RegCM4/ERA-Interim Ajustado, WW3-WRF/CFSR, WW3-WRF/CFSR Ajustado . . . . .	78
3.7	Séries temporais (a), diagrama de Taylor (b), função de distribuição de probabilidade (PDF) (c) e Q-Q plot dos dados de altura significativa de onda na boia de Cabo Frio (PNBOIA) comparado com os experimentos WW3-RegCM4/ERA-Interim, WW3-RegCM4/ERA-Interim Ajustado, WW3-WRF/CFSR, WW3-WRF/CFSR Ajustado . . . . .	80
3.8	Séries temporais (a), diagrama de Taylor (b), função de distribuição de probabilidade (PDF) (c) e Q-Q plot dos dados de altura significativa de onda na boia de Cabo Frio 2 (PNBOIA) comparado com os experimentos WW3-RegCM4/ERA-Interim, WW3-RegCM4/ERA-Interim Ajustado, WW3-WRF/CFSR, WW3-WRF/CFSR Ajustado . . . . .	82
3.9	Séries temporais (a), diagrama de Taylor (b), função de distribuição de probabilidade (PDF) (c) e Q-Q plot dos dados de altura significativa de onda na boia do Campo de Frade (CHEVRON) comparado com os experimentos WW3-RegCM4/ERA-Interim, WW3-RegCM4/ERA-Interim Ajustado, WW3-WRF/CFSR, WW3-WRF/CFSR Ajustado . . . . .	84

3.10	Séries temporais (a), diagrama de Taylor (b), função de distribuição de probabilidade (PDF) (c) e Q-Q plot dos dados de altura significativa de onda na boia de Vitória (PNBOIA) comparado com os experimentos WW3-RegCM4/ERA-Interim, WW3-RegCM4/ERA-Interim Ajustado, WW3-WRF/CFSR, WW3-WRF/CFSR Ajustado . . . . .	86
3.11	Séries temporais (a), diagrama de Taylor (b), função de distribuição de probabilidade (PDF) (c) e Q-Q plot dos dados de altura significativa de onda na boia de Porto Seguro (PNBOIA) comparado com os experimentos WW3-RegCM4/ERA-Interim, WW3-RegCM4/ERA-Interim Ajustado, WW3-WRF/CFSR, WW3-WRF/CFSR Ajustado . . . . .	88
3.12	Séries temporais (a), diagrama de Taylor (b), função de distribuição de probabilidade (PDF) (c) e Q-Q plot dos dados de altura significativa de onda na boia de Recife (PNBOIA) comparado com os experimentos WW3-RegCM4/ERA-Interim, WW3-RegCM4/ERA-Interim Ajustado, WW3-WRF/CFSR, WW3-WRF/CFSR Ajustado . . . . .	90
3.13	Séries temporais (a), diagrama de Taylor (b), função de distribuição de probabilidade (PDF) (c) e <i>Q-Q plot</i> dos dados de altura significativa de onda na boia de Fortaleza (PNBOIA) comparado com os experimentos WW3-RegCM4/ERA-Interim, WW3-RegCM4/ERA-Interim Ajustado, WW3-WRF/CFSR, WW3-WRF/CFSR Ajustado . . . . .	92
4.1	Mapas de diferença entre o campo médio da Altura Significativa de Onda (metros) entre o futuro próximo de 2006 a 2030 NF (a), futuro distante de 2031 a 2060 - FF (b) e o período histórico de 1979 a 2005. . . . .	97
4.2	Mapas de diferença entre o campo do percentil 95 (P95) da Altura Significativa de Onda (metros) para futuro próximo (a), futuro distante (b) e o período histórico. . . . .	100
4.3	Mapas de diferença entre o campo médio do Período de Pico (s) para futuro próximo (a), futuro distante (b) e o período histórico. . . . .	103
4.4	Mapas de tendência da média mensal do Hs (m) para os períodos histórico (a), futuro próximo (b) e futuro distante (c). . . . .	106

4.5	Mapas de tendência do percentil 95 do Hs (metros/década) para os períodos histórico (a), futuro próximo (b) e futuro distante (c). . . . .	107
4.6	Mapas de tendência da média mensal (a) e percentil 95 (b) do Hs (metros/década) para o períodos total de 1979 a 2060. . . . .	109
4.7	Mapas de tendência da média mensal do período de pico (segundos/década) para o período total (1979 a 2060). . . . .	112
4.8	Mudança de regime na média anual da altura significativa de onda para a Bacia de Campos no experimento WW3-WRF/MPI. . . . .	114
4.9	Contornos ambientais de Hs (m) e Tp (s) para a Bacia de Santos nos experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-RegCM4/MPI (b), WW3-WRF/Had (c) e WW3-WRF/MPI (d). . . . .	120
A.1	Mapas de diferença entre o campo médio dos meses de dezembro, janeiro e fevereiro (DJF) da Altura Significativa de Onda (metros) entre o futuro próximo de 2006 a 2030 NF (a), futuro distante de 2031 a 2060 - FF (b). .	144
A.2	Mapas de diferença entre o campo do p95 dos meses de dezembro, janeiro e fevereiro (DJF) da Altura Significativa de Onda (metros) entre o futuro próximo de 2006 a 2030 NF (a), futuro distante de 2031 a 2060 - FF (b). .	145
A.3	Mapas de diferença entre o campo médio dos meses de março, abril e maio (MAM) da Altura Significativa de Onda (metros) entre o futuro próximo de 2006 a 2030 NF (a), futuro distante de 2031 a 2060 - FF (b). . . . .	146
A.4	Mapas de diferença entre o campo do p95 dos meses de março, abril e maio (MAM) da Altura Significativa de Onda (metros) entre o futuro próximo de 2006 a 2030 NF (a), futuro distante de 2031 a 2060 - FF (b). . . . .	147
A.5	Mapas de diferença entre o campo médio dos meses de junho, julho e agosto (JJA) da Altura Significativa de Onda (metros) entre o futuro próximo de 2006 a 2030 NF (a), futuro distante de 2031 a 2060 - FF (b). . . . .	148
A.6	Mapas de diferença entre o campo do p95 dos meses de junho, julho e agosto (JJA) da Altura Significativa de Onda (metros) entre o futuro próximo de 2006 a 2030 NF (a), futuro distante de 2031 a 2060 - FF (b). . . . .	149

A.7	Mapas de diferença entre o campo médio dos meses de setembro, outubro e novembro (SON) da Altura Significativa de Onda (metros) entre o futuro próximo de 2006 a 2030 NF (a), futuro distante de 2031 a 2060 - FF (b).	150
A.8	Mapas de diferença entre o campo do p95 dos meses de setembro, outubro e novembro (SON) da Altura Significativa de Onda (metros) entre o futuro próximo de 2006 a 2030 NF (a), futuro distante de 2031 a 2060 - FF (b).	151
A.9	Mapas de diferença entre o campo médio dos meses de dezembro, janeiro e fevereiro (DJF) do Período de Pico das Onda (segundos) entre o futuro próximo de 2006 a 2030 NF (a), futuro distante de 2031 a 2060 - FF (b).	153
A.10	Mapas de diferença entre o campo médio dos meses de março, abril e maio (MAM) do Período de Pico das Onda (segundos) entre o futuro próximo de 2006 a 2030 NF (a), futuro distante de 2031 a 2060 - FF (b).	154
A.11	Mapas de diferença entre o campo médio dos meses de junho, julho e agosto (JJA) do Período de Pico das Onda (segundos) entre o futuro próximo de 2006 a 2030 NF (a), futuro distante de 2031 a 2060 - FF (b).	155
A.12	Mapas de diferença entre o campo médio dos meses de setembro, outubro e novembro (SON) do Período de Pico das Onda (segundos) entre o futuro próximo de 2006 a 2030 NF (a), futuro distante de 2031 a 2060 - FF (b).	156
B.1	Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Pelotas.	159
B.2	Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Pelotas.	160
B.3	Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Santos.	161

B.4	Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Santos.	162
B.5	Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Campos. . . . .	163
B.6	Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Campos. . . . .	164
B.7	Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia do Espírito Santo. . . . .	165
B.8	Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia do Espírito Santo. . . . .	166
B.9	Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Mucuri. . . . .	167
B.10	Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Mucuri. . . . .	168
B.11	Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Cumuruxatiba. . . . .	169

B.12 Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Cumuruxatiba. . . . .	170
B.13 Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Jequitinhonha. . . . .	171
B.14 Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Jequitinhonha. . . . .	172
B.15 Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Camamu-Almada. . . . .	173
B.16 Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Camamu-Almada. . . . .	174
B.17 Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Jacuipe. . . . .	175
B.18 Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Jacuipe. . . . .	176
B.19 Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Sergipe-Alagoas. . . . .	177

B.20 Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Sergipe-Alagoas. . . . .	178
B.21 Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Pernambuco-Paraíba. . . . .	179
B.22 Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Pernambuco-Paraíba. . . . .	180
B.23 Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Potiguar. . . . .	181
B.24 Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Potiguar. . . . .	182
B.25 Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia do Ceará. . . . .	183
B.26 Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia do Ceará. . . . .	184
B.27 Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Barreirinhas. . . . .	185

B.28	Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Barreirinhas. . . . .	186
B.29	Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Pará-Maranhão. . . . .	187
B.30	Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia do Pará-Maranhão. . . . .	188
B.31	Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia da Foz do Amazonas. . . . .	189
B.32	Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia da Foz do Amazonas. . . . .	190
C.1	Contornos ambientais (IFORM) do Hs com Tp associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Pelotas. . . . .	192
C.2	Contornos ambientais (IFORM) do Hs com Tp associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Santos. . . . .	193
C.3	Contornos ambientais (IFORM) do Hs com Tp associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Campos. . . . .	194

C.4	Contornos ambientais (IFORM) do Hs com Tp associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia do Espírito Santo. . . . .	195
C.5	Contornos ambientais (IFORM) do Hs com Tp associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Mucuri. . . . .	196
C.6	Contornos ambientais (IFORM) do Hs com Tp associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Cumuru-xatiba. . . . .	197
C.7	Contornos ambientais (IFORM) do Hs com Tp associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Jequitinhonha. . . . .	198
C.8	Contornos ambientais (IFORM) do Hs com Tp associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Camamu-Almada. . . . .	199
C.9	Contornos ambientais (IFORM) do Hs com Tp associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Jacuípe. . . . .	200
C.10	Contornos ambientais (IFORM) do Hs com Tp associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Sergipe-Alagoas. . . . .	201
C.11	Contornos ambientais (IFORM) do Hs com Tp associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Pernambuco-Paraíba. . . . .	202

C.12 Contornos ambientais (IFORM) do Hs com Tp associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia Potiguar. . .	203
C.13 Contornos ambientais (IFORM) do Hs com Tp associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia do Ceará. . .	204
C.14 Contornos ambientais (IFORM) do Hs com Tp associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Barreirinhas.	205
C.15 Contornos ambientais (IFORM) do Hs com Tp associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Pará-Maranhão.	206
C.16 Contornos ambientais (IFORM) do Hs com Tp associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia da Foz do Amazonas. . . . .	207



## Lista de Tabelas

2.1	Experimentos numéricos de ondas e suas forçantes de vento. . . . .	49
2.2	Configuração dos experimentos de modelagem de numérica de ondas com o WW3. . . . .	51
2.3	Resumo das configurações dos experimentos de regionalização atmosférica.	54
3.1	Boias meteo-oceanográficas utilizadas no estudo. . . . .	70
4.1	Média do Hs (m) obtida pelas projeções climáticas para as bacias sedimentares.	99
4.2	Percentil 95 do Hs (m) obtido pelas projeções climáticas para as bacias sedimentares. . . . .	101
4.3	Período de pico médio das ondas (em segundos) nas bacias sedimentares brasileiras . . . . .	104
4.4	Tendências da média anual da altura significativa de onda no período de 1979 a 2060 . . . . .	110
4.5	Tendências do extremo anual (P95) da altura significativa de onda de 1979 a 2060 . . . . .	111
4.6	Tendências da média anual do período de pico no período de 1979 a 2060 .	113
4.7	Mudança de regime da média anual do Hs no período de 1979 a 2060 . . .	116
4.8	Mudança de regime do extremo anual (p95) do Hs de 1979 a 2060 . . . . .	118
4.9	Altura Significativa das ondas (m) e Período de Pico (s) associado para um período de retorno de 100 anos . . . . .	122



# Sumário

1. <i>Introdução</i> . . . . .	29
1.1 Objetivos . . . . .	29
1.2 Ondas no litoral brasileiro . . . . .	31
1.3 Clima de ondas . . . . .	35
1.3.1 Mudança Climática nas Ondas . . . . .	38
1.4 Regionalização Climática . . . . .	43
1.5 Projeto WeSACEx . . . . .	44
2. <i>Bases de Dados, Modelos e Métodos Utilizados</i> . . . . .	47
2.1 Descrição dos Experimentos . . . . .	47
2.2 Modelagem de Ondas . . . . .	49
2.3 Forçantes Atmosféricas Globais . . . . .	51
2.3.1 Reanálise CFSR . . . . .	51
2.3.2 Reanálise ERA-Interim . . . . .	52
2.3.3 Modelo Climático HagGEM2-ES . . . . .	52
2.3.4 Modelo Climático MPI-ESM-MR . . . . .	52
2.4 Forçantes Atmosféricas Regionais . . . . .	53
2.4.1 Regionalização Dinâmica com o RegCM4 . . . . .	53
2.4.2 Regionalização Dinâmica com WRF . . . . .	54
2.5 Bases Complementares . . . . .	54
2.5.1 WAVERYS . . . . .	54
2.5.2 CCMP . . . . .	55
2.6 Correção de Viés . . . . .	55

2.7	Métodos de Análise Estatística . . . . .	57
2.7.1	Análise de Tendência . . . . .	58
2.7.2	Mudança de Regime . . . . .	59
2.7.3	Período de Retorno . . . . .	61
3.	<i>Avaliação das Simulações</i> . . . . .	65
3.1	Avaliação Espacial . . . . .	66
3.2	Avaliação Pontual . . . . .	70
3.2.1	Boia de Rio Grande - PNBOIA . . . . .	73
3.2.2	Boia de Itajaí - PNBOIA . . . . .	75
3.2.3	Boia de Santos - PNBOIA . . . . .	77
3.2.4	Boia de Cabo Frio - PNBOIA . . . . .	79
3.2.5	Boia de Cabo Frio 2 - PNBOIA . . . . .	81
3.2.6	Boia do Campo de Frade - CHEVRON . . . . .	83
3.2.7	Boia de Vitória - PNBOIA . . . . .	85
3.2.8	Boia de Porto Seguro - PNBOIA . . . . .	87
3.2.9	Boia de Recife - PNBOIA . . . . .	89
3.2.10	Boia de Fortaleza - PNBOIA . . . . .	91
4.	<i>Resultados</i> . . . . .	95
4.1	Análise dos Campos Médios . . . . .	95
4.2	Análise de Tendências . . . . .	104
4.3	Mudanças de Regime . . . . .	113
4.4	Períodos de Retorno e Contornos Ambientais . . . . .	118
5.	<i>Conclusões</i> . . . . .	123
5.1	Trabalhos Futuros . . . . .	127
	<i>Referências</i> . . . . .	129
	<i>Apêndice</i> . . . . .	141
A.	<i>Mapas sazonais de diferença média e percentil 95</i> . . . . .	143
A.1	Altura Significativa de Ondas . . . . .	143

A.2 Período de Pico . . . . .	152
B. <i>Teste de Rodionov para mudança de regime por bacia</i> . . . . .	157
C. <i>Análises I-FORM (contornos ambientais) por bacia</i> . . . . .	191



## Introdução

As ondas na superfície do mar podem ser geradas por várias forças, incluindo ventos, marés, distúrbios sísmicos e distúrbios na pressão atmosférica. A força restauradora mais importante que tende a retornar a superfície até sua posição de equilíbrio é a gravidade. Sem ela, nenhuma onda existiria na superfície do mar.

O objeto deste estudo são as ondas da superfície do mar geradas devido à ação do vento que se formam quando o mesmo produz uma tensão sobre a água, transferindo energia e criando pequenas irregularidades na superfície, que evoluem para ondulações e, em seguida, para ondas mais pronunciadas através de um processo de transferência de energia. O tamanho e a velocidade das ondas dependem da força do vento, da distância percorrida e da duração do vento (intensidade, pista e persistência). Outros fatores, como a topografia do leito e as correntes oceânicas, também podem influenciar as características das ondas. Conforme as ondas se afastam do local de origem, podem ser modificadas por interações complexas entre sistemas atmosféricos e fatores oceânicos, resultando na variedade de ondas observadas em diferentes áreas e momentos. Dito isto, sempre que o termo **onda** for citado no texto, o mesmo se refere exclusivamente às ondas geradas na superfície do mar pela ação do vento.

### *1.1 Objetivos*

O objetivo geral desta pesquisa foi avaliar, através de diferentes forçantes atmosféricas provenientes de regionalizações dinâmicas, as condições extremas de ondas na costa leste da América do Sul, considerando os efeitos das mudanças climáticas que possam acarretar em alterações nos parâmetros de onda que impactam nas condições de segurança no mar.

Na condução desta investigação foram considerados os cenários de forçante radiativa RCP8.5, regionalizados sobre a porção oeste do Oceano Atlântico Sul. A necessidade dessas regionalizações se deu pela demanda de uma base mais acurada de projeções das condições extremas de ventos e ondas, considerando os efeitos das mudança climática na frequência e intensidade de fenômenos geradores destes extremos, como os ciclones extratropicais ou subtropicais. A partir das calibrações dos modelos regionais atmosférico e de ondas e da correção dos erros sistemáticos na base de dados climática, foram realizadas as simulações de longo período o clima presente, avaliando-se como as regionalizações climáticas reproduzem as características observadas dos extremos de onda e sua associação o clima presente.

As etapas que foram estabelecidas para o cumprimento do objetivo principal desta pesquisa são:

- Implementar um sistema para modelagem de ondas utilizando o modelo WW3;
- Realizar uma calibração do modelo de ondas para todas as forçantes de vento;
- Obter o clima presente de ondas através simulações com forçantes atmosféricas regionalizadas por reanálise;
- Avaliar o impacto do método de correção de viés aplicado aos campos de vento na simulação de ondas;
- Simular o campo de ondas a partir das projeções de clima presente e clima futuro regionalizada;
- Analisar o comportamento dos extremos de onda em diferentes cenários de aquecimento e períodos distintos;
- Identificar tendências e mudanças de regime ao longo de todo período de simulação.

Com base nesta exposição direta e objetiva das premissas e do objetivo do estudo, as seções seguintes delinearão os pontos que contextualizam o estado atual do conhecimento no assunto e que fundamentam a abordagem empregada.

## 1.2 Ondas no litoral brasileiro

Os primeiros estudos sobre o clima de ondas no Atlântico Sul datam do final dos anos 80, quando Parente e Souza (1989) analisaram o clima de ondas na região *offshore* do Rio de Janeiro e identificaram dois modos, o primeiro associado ao Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul, com ventos calmos/moderados de nordeste e ondas de até 3 metros de altura e o segundo modo gerado por ciclones extratropicais e frentes frias, quando ondas maiores e ventos mais intensos vêm das direções sudeste e sul.

No início dos anos 90, Melo Filho (1993) através do projeto Sentinelas do Mar organizou uma rede de monitoramento visual das condições do mar com a participação de surfistas voluntários que cobriu a costa brasileira do Ceará ao Rio Grande do Sul. A segunda campanha, conduzida de 2001 a 2005, foi realizada ao largo da Ilha de Santa Catarina usando um ondógrafo direcional que, pela primeira vez no país, disponibilizava, gratuitamente, dados sobre as condições do mar em tempo real via internet.

Candella et al. (1993) criaram o primeiro Sistema de Previsão de Ondas (SISPRON) e Innocentini e Caetano Neto (1996) deram continuidade aos primeiros estudos numéricos investigando o impacto de uma tempestade intensa originada sobre o Uruguai e intensificada no Oceano Atlântico Sul. O evento foi estudado por meio de análises do modelo meteorológico e de ondas do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), onde o modelo atmosférico destacou uma persistente extensão da pista de vento, enquanto o modelo de ondas simulou a propagação em direção à costa do Rio de Janeiro.

Parente (1997) desenvolveu a metodologia DAAT (*Directional Analysis with Adaptive Techniques*) para análise direcional de ondas, o que aprimorou a compreensão do clima de ondas, possibilitando que Violante-Carvalho e Parente (1998) associassem o clima de ondas na Bacia de Campos com quatro situações meteorológicas distintas: Bom Tempo com Marulho, Bom Tempo sem Marulho, Mau Tempo com Tempestade de Sudoeste e Mau Tempo com Tempestade de Sudeste.

Segundo Violante-Carvalho e Parente (1998) o clima de "Bom Tempo" é associado à predominância do sistema de alta pressão subtropical do Atlântico Sul (ASAS) sobre a região, resultando em ventos nordeste e um mar local com ondulações na mesma direção dos ventos. Em algumas situações, podem coexistir ondulações distantes vindas do sul, caracterizando a condição de "Bom Tempo com swell". O "Mau Tempo de sudoeste" é

caracterizado por mares originados do sudoeste e sul devido à passagem de uma frente fria seguida por um ciclone. Enquanto o "Mau Tempo de sudeste" ocorre quando, após a passagem de uma frente fria, um anticiclone polar domina a circulação na região.

Um período de onze anos dos resultados das reanálises de onda do NWW3/NCEP foram analisados por Pianca et al. (2010), que descreveram os resultados relativos ao clima sazonal de ondas, dividindo do sul ao norte o litoral brasileiro em seis setores costeiros. A variabilidade da distribuição da altura e do período das ondas ao longo dos setores indicaram uma diminuição no sentido norte da potência das ondas, com maior energia das ondas durante os meses de outono, inverno e primavera do hemisfério sul, enquanto para os pontos na região norte, os meses de verão foram os mais energéticos.

de Sa Cotrim et al. (2022) investigaram extremos de onda na região do Atlântico Sul por meio do percentil 95, alturas máximas e potência das ondas. Essas variáveis apresentaram uma distribuição geográfica semelhante, com valores mais baixos próximos à costa e ao longo da região equatorial, e valores mais altos na região extratropical, que provavelmente representam as áreas de geração de tempestades do Oceano Austral.

Destaca-se a existência de três áreas preferenciais para a ocorrência de ciclogêneses na costa leste da América do Sul. Uma sobre o golfo de San Matias, na Argentina, uma sobre o Uruguai e outra na região leste do sul/sudeste, ao norte de 30°S, sobre o oceano Atlântico (Figura 1.1, Gan e Rao (1991), Palmeira (2003), Reboita et al. (2018), Gramcianinov et al. (2020)). Em relação à variação anual da ciclogênese, de acordo com Gan e Rao (1991), a estação do ano mais favorável à ciclogênese é o outono. E especialmente, dos ciclones que se formam no sul/sudeste do Brasil cerca de 30% são subtropicais e se mantêm próximos à costa, com ventos intensos, por um longo período do seu ciclo de vida (Gozzo et al. (2014)).

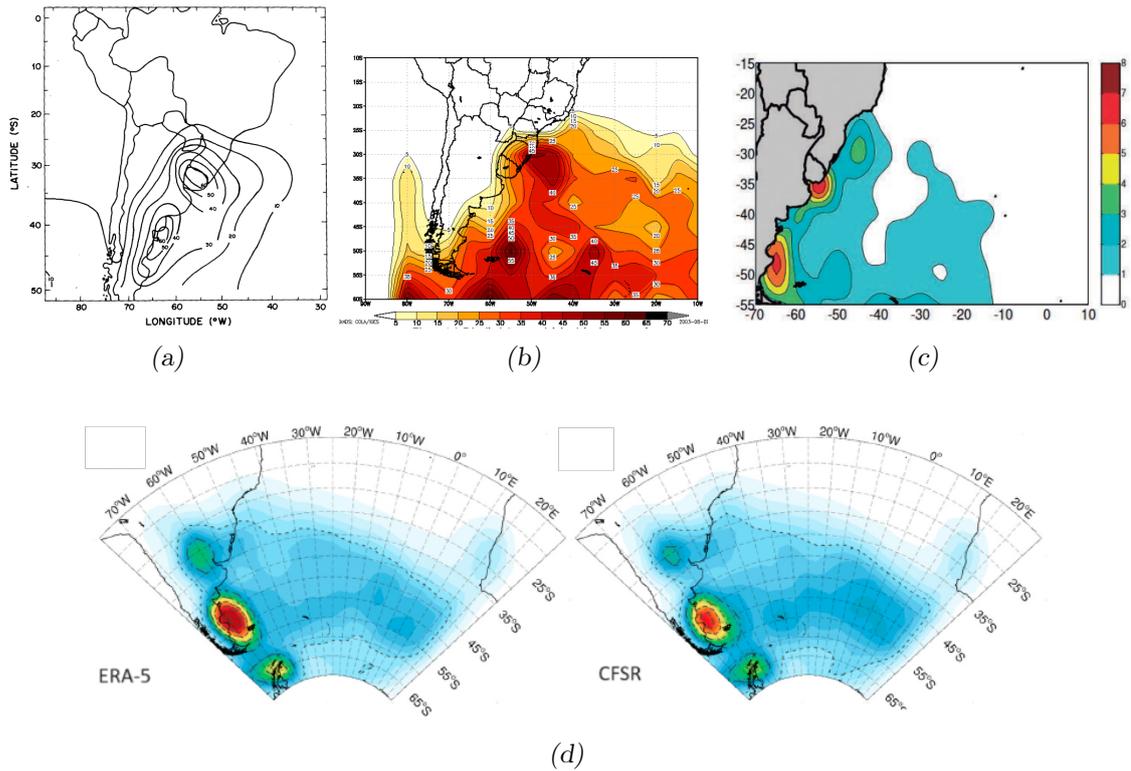


Figura 1.1: Regiões ciclogênicas encontradas em Gan e Rao (1991) (a), Palmeira (2003) (b), Reboita et al. (2018) (c) e Gramscianinov et al. (2020)

Gramscianinov et al. (2020) realizaram um estudo das condições atmosféricas responsáveis pelos processos de geração de ondas no sul e sudeste do Brasil. Utilizando uma abordagem espacial para a seleção de eventos extremos, eles identificaram que o padrão sinótico de eventos extremos de onda podem ocorrer em três regiões dos ciclones ilustradas na Figura 1.2: (1) atrás da frente fria; (2) ao longo da frente quente; e (3) à frente da frente fria.

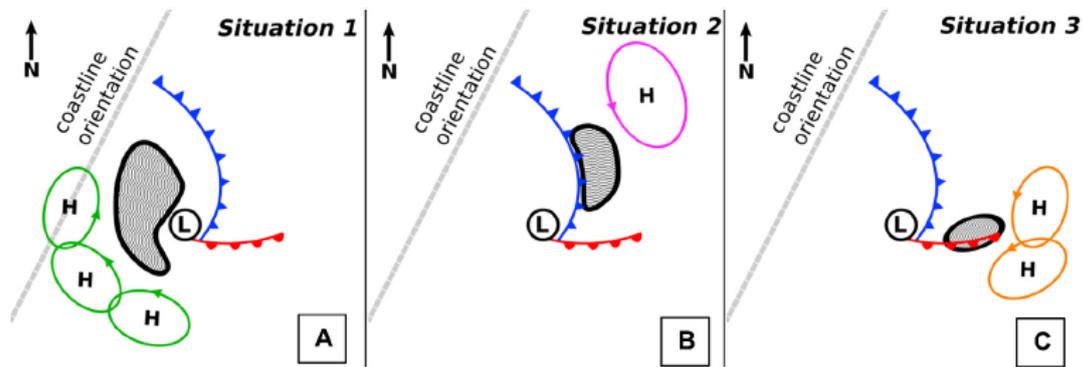


Figura 1.2: Esquema das três situações relacionadas a ondas extremas (representadas por um padrão pontilhado) dentro do ciclone extratropical. (a) Ondas extremas (indicadas por sombras e ondulações) são observadas após a passagem da frente fria; (b) na área de convergência dos ventos, à frente da frente fria; e (c) ao longo da frente quente, no setor quente do ciclone. As frentes frias e quentes são representadas conforme a convenção meteorológica padrão. O centro aproximado de baixa pressão e os sistemas de alta pressão são denotados por "L" e "H", respectivamente. Fonte: Gramscianinov et al. (2020)

Já em relação à região Norte, segundo Cavalcanti et al. (2009) os ventos alísios e a Zona de Convergência Intertropical (ITCZ) desempenham um papel importante na formação de ondas. Os ventos alísios são quase constantes nessa região, resultando em pouca variação na altura significativa das ondas ( $H_s$ ) e produzindo um espectro de onda unimodal de NE (Espindola e Araújo (2017)).

De acordo com Muehe (2010), a costa brasileira é caracterizada por uma variedade de formações costeiras, como falésias sedimentares, estuários, promontórios cristalinos e planícies costeiras de baixa altitude. A resposta da morfologia costeira às oscilações do nível do mar é influenciada por fatores como a incidência de ondas, disponibilidade de sedimentos, morfologia costeira e resistência das rochas. Além disso, é esperado que a mudança climática tenha impacto significativo na costa brasileira, com inundações sendo uma preocupação particular, especialmente nas áreas urbanizadas e nas grandes cidades costeiras.

O estudo realizado por Marengo et al. (2012) analisou o impacto, a vulnerabilidade e a adaptação das cidades costeiras brasileiras diante das mudanças climáticas. Na ocasião, eles observaram que o Brasil carecia de uma abordagem integrada da vulnerabilidade das cidades costeiras em escala nacional, especialmente em relação à elevação do nível do mar e impacto das ondas. Além disso, os autores destacaram a insuficiência de dados no país para avaliar os cenários de impacto decorrentes das mudanças climáticas nas zonas costei-

ras, apontando para a necessidade de estudos regionais mais coordenados e metodologias consistentes.

Alguns esforços têm sido realizados no sentido de melhorar a compreensão acerca do comportamento das ondas no Atlântico Sul. Dentre esses podemos destacar os programas observacionais PNBOIA (Programa Nacional de Boias), SIMCOSTA (Sistema de Monitoramento da Costa Brasileira) e a Rede de Modelagem Oceânica (REMO-Observacional) descritos em Franz et al. (2021) e o programa SMC-Brasil (Ministério do Meio Ambiente, MMA (2018), Quetzalcóatl et al. (2019)).

Outra fonte importante de informação são os Programas de Caracterização Regional (PCR) para Bacia de Campos (Martins e Grossmann-Matheson (2017)) e Bacia de Santos (Martins et al. (2022)) que trazem boas revisões sobre a dinâmica das ondas na porção oeste do Atlântico Sul utilizando reanálises e dados observacionais coletados nas áreas de exploração e produção de petróleo operadas pela Petrobras.

### 1.3 Clima de ondas

Muitos são os estudos do clima global de ondas (Sterl et al. (1998), Young (1999) Alves et al. (2009) Hemer et al. (2010), Semedo et al. (2011), Young et al. (2011), Stopa e Cheung (2014)) que, utilizando simulações numéricas ou dados de reanálise, fornecem informações importantes a respeito da distribuição global das ondas bem como da sua variação sazonal e interanual.

As ondas podem ser classificadas em dois tipos. As vagas (*windsea*) que são as ondulações que ainda sofrem com o efeito do vento e geralmente possuem período mais curto e menos energia e os marulhos (*swell*) que são ondas geradas pelo vento, que se propagam por muitos quilômetros antes de chegarem à costa geralmente com períodos mais altos e mais energia. Semedo et al. (2011) investigaram o padrão espacial de predominância de marulho nos oceanos globais, considerando o equilíbrio energético do campo de ondas e suas características. Um índice de probabilidade foi calculado para cada ponto de grade em cada estação, visando quantificar a frequência de ocorrência de campos de ondas dominados por marulho. As distribuições espaciais globais do índice de probabilidade durante ao longo dos meses revelaram uma predominância sistemática de marulho nos oceanos do mundo, com a probabilidade de campos de ondas dominados por marulho sendo superior

a 75% em quase todos os lugares. Esta distribuição espacial do índice de probabilidade assemelha-se à distribuição da energia das ondas.

Young et al. (2011) avaliaram tendências médias globais na velocidade do vento e na altura das ondas, utilizando dados de sensor especial de micro-ondas/imager (SSM/I) no período de 1987 a 2006. Eles identificaram a existência de uma tendência média global positiva na velocidade do vento, sendo verificado um aumento sendo maior para os percentis maiores. Tal resultado indica que a intensidade de eventos extremos está aumentando a uma taxa mais rápida do que a das condições médias. Já a tendência da altura média das ondas mostrou uma condição relativamente neutra. Grandes regiões do Pacífico norte e do Atlântico norte mostram uma tendência negativa fraca, assim como grande parte das regiões equatoriais de todas as bacias oceânicas. No entanto, o Hemisfério Sul tem uma tendência positiva fraca consistente de aproximadamente 0,25% ao ano. Em quase nenhuma dessas regiões, no entanto, a tendência é estatisticamente significativa. De acordo com Dobrynin et al. (2012), estimativas de probabilidade mostram que ventos e ondas extremos se tornam mais dominantes no Hemisfério Sul, Ártico e Oceano Índico, enquanto ventos e ondas de baixa e média intensidade são altamente prováveis no Atlântico Norte e Equatorial e no Pacífico.

O Modo Anular do Sul (SAM) ou Oscilação Antártica (AAO) é um padrão climático caracterizado por um cinturão de fortes ventos de oeste que circunda o Oceano Antártico, localizado entre 40 e 60 graus de latitude. É um importante modo de variabilidade na circulação atmosférica do Hemisfério Sul e diversos estudos demonstram sua influência nas características das ondas oceânicas no Hemisfério Sul.

Hemer et al. (2010) identificaram que a tendência positiva do SAM nas últimas décadas está associada ao aumento da altura das ondas no Oceano Austral e nas médias latitudes do leste do Oceano Pacífico durante o outono e inverno. A análise também identificou o SAM como o principal *driver* de variabilidade nas alturas e direções das ondas no Hemisfério Sul, com efeitos propagando-se por diversos oceanos do mundo. A influência dos padrões de circulação atmosférica em larga escala sobre o clima de ondas foi investigada por meio de correlações com os índices NAO, SOI e SAM por de Sa Cotrim et al. (2022) e embora em diferentes níveis, tanto o NAO quanto o SAM mostraram ter uma correlação negativa com a maior parte da área de estudo.

Fan et al. (2014) investigaram, através de simulação global acoplada (atmosfera-onda),

as mudanças no clima de ondas devido às anomalias de temperatura da superfície do mar (SST) e gelo marinho no final do século XXI. As circulações atmosféricas são impulsionadas pela temperatura da superfície do oceano e o deslocamento para os polos das correntes de jato resultaram em uma ocorrência mais frequente da fase positiva da NAO e SAM, que são determinadas principalmente pelo aquecimento ou resfriamento geral da superfície do oceano. A resposta mais significativa nas ondulações é o forte aumento de energia no setor oeste do Pacífico e do Oceano Índico do Oceano Austral durante o inverno austral (JAS) e outono (AMJ), que está associado ao aumento das vagas na região. Em geral, as respostas dos marulhos ao aquecimento global são menos robustas entre as diferentes projeções em comparação com as respostas das vagas. Esse comportamento ocorre porque as vagas são impulsionadas pelo vento superficial. Assim, as mudanças no campo de vagas estão altamente correlacionadas com as mudanças na velocidade do vento local. Por outro lado, os marulhos são não locais, pois carregam informações das ondas e se propagam por milhares de quilômetros através do oceano.

Usando um histórico global de ondas (ERA5) de 72 anos produzido pelo Centro Europeu de Previsão de Médio Prazo (ECMWF) Maia et al. (2023) identificaram que altura das ondas ( $H_s$ ) está aumentando em toda a região, e os eventos extremos estão se tornando mais fortes, mais longos e mais frequentes. Eles identificaram que a variação nas propriedades das ondas apresenta correlações com os índices climáticos da Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO), do Atlântico Sul Tropical (TSA) e do Modo Anular Sul (SAM). Durante as fases positivas (negativas) de cada índice, são observadas alturas de onda ( $H_s$ ) mais altas (mais baixas) e fluxo de energia de onda (WEF) mais elevados, bem como predominância de ondulações predominantemente do oeste (leste).

O estudo de Gramcianinov et al. (2022) analisou as tendências de ondas extremas relacionadas a ciclones extratropicais nos Oceanos Atlântico Norte e Sul ao longo de 42 anos e identificou a influência significativa dos ciclones extratropicais nas tendências de ondas extremas, relacionando-as às mudanças nas trajetórias das tempestades e eventos de ondas. O estudo utilizou um esquema automatizado para identificar eventos de ondas extremas associados a ciclones, excluindo eventos dominados por *swell* com critérios como fluxo de energia das ondas e idade das ondas. As regiões de maior ocorrência de ondas relacionadas a ciclones coincidem com estudos anteriores, relacionando-se com a região de ciclogênese e a orientação das trajetórias das tempestades.

Reguero et al. (2015) identificaram uma tendência de aumento da altura média anual da onda, principalmente no Sul do Brasil, com valores ao redor de 6 mm/ano. Para a altura significativa de onda máxima anual, as tendências foram maiores, com valores máximos também no Sul do Brasil, ao redor de 3 cm/ano. Os resultados mostram ainda uma tendência de rotação horária da direção da onda, definida através do fluxo médio de energia das ondas, provavelmente relacionada com a tendência de ocorrência de mais tempestades em altas latitudes e menos em médias latitudes, fator pronunciado no Hemisfério Sul. Enquanto Maia et al. (2022) explorou a influência da Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO) nas condições de ondas no sul do Brasil. A AMO é um ciclo natural que afeta as temperaturas da superfície do mar no Atlântico Norte e está relacionada a mudanças em padrões climáticos globais. No sul do Brasil, a AMO influencia o fluxo de energia das ondas e pode causar interrupções nas tendências desse fluxo.

Em uma abordagem paleoclimática, Silva et al. (2020) utilizaram a morfologia de antigas linhas costeiras preservadas em cristas de praia e dunas dentro de uma enseada protegida na costa de Santa Catarina para reconstruir as mudanças nas direções predominantes das ondas no Atlântico Sul Subtropical nos últimos 3000 anos. Eles analisaram as cristas de praia e dunas para identificar ciclos multisseculares de oscilação na direção predominante das ondas, de acordo com o gradiente de pressão média do nível do mar nas latitudes médias a altas do Atlântico Sul e indicaram que o Modo Anular do Sul (SAM), influencia a força e a posição dos ventos de oeste, o que, por sua vez, afeta o clima de ondas no hemisfério Sul e mostraram que o SAM passou por mudanças significativas nos últimos milênios.

### 1.3.1 Mudança Climática nas Ondas

A mudança climática tem impacto significativo na região oceânica, incluindo alterações na temperatura do mar (Rodrigues et al. (2019)), na circulação das correntes marítimas (Franco et al. (2020)), aumento do nível (Marengo et al. (2017)) e alterações na frequência e intensidade de eventos extremos de vento e onda (Gramcianinov et al. (2023)). Estas mudanças podem afetar a biodiversidade marinha, a pesca, a aquicultura, a exploração de recursos energéticos e a segurança marítima.

Segundo a definição do Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática - IPCC (Field et al. (2012)), a mudança climática é definida como uma mudança no estado médio

e/ou na variabilidade do clima que pode ser identificada através de análises estatísticas de suas propriedades e que persistem por um período extenso, tipicamente décadas ou mais. A mudança climática é causada por alterações na composição da atmosfera e/ou na cobertura do solo, e promovidas através de processos naturais, forçantes externas ou por ação antropogênica.

Portanto, torna-se fundamental a realização de estudos sobre o impacto da mudança climática na frequência de eventos extremos no sentido de compreender as consequências e desenvolver estratégias de adaptação e mitigação para lidar com essas mudanças. Só assim será possível reduzir os impactos negativos na economia e no meio ambiente, além de promover uma gestão mais eficiente e sustentável dos recursos marinhos.

O Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas IPCC (2014) propôs cenários que são identificados pela forçante radiativa e concentração de CO<sub>2</sub> em partes por milhão (ppm) denominados *Representative Concentration Pathways* - RCPs [ RCP2.6 (475 ppm; 2,6 W/m<sup>2</sup>), RCP4.5 (630 ppm; 4,5 W/m<sup>2</sup>), RCP6.0 (800 ppm; 6,0 W/m<sup>2</sup>) e RCP8.5 (1313 ppm; 8,5 W/m<sup>2</sup>) ]. Nesses cenários a temperatura do ar próximo à superfície média global poderá sofrer aumento até o final do século XXI, ultrapassando 1,5°C. Nos dois cenários mais alarmantes de concentração de CO<sub>2</sub>, RCP6.0 e RCP8.5, os aumentos projetados de temperatura ultrapassam 2,0°C.

O principal objetivo dos RCPs é fornecer informações sobre possíveis trajetórias de desenvolvimento para os principais agentes das mudanças climáticas, permitindo sua análise através de simulações de Modelos Climáticos (van Vuuren et al. (2011)). Os RCPs foram desenvolvidos por meio de um processo de três fases pela comunidade de pesquisa, que incluiu o desenvolvimento de um conjunto de cenários contendo trajetórias de emissões, concentrações e uso da terra, uma fase de desenvolvimento paralelo com simulações de modelos climáticos e o desenvolvimento de novos cenários socioeconômicos, e uma fase final de integração e disseminação. O processo completo de desenvolvimento, desde os resultados iniciais dos modelos até o conjunto de dados fornecido para apoiar o Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do IPCC, é descrito em Meinshausen et al. (2011).

A quinta fase do *Coupled Model Intercomparison Project* - CMIP5 (Taylor et al. (2012)) é um projeto do *World Climate Research Programme* (WCRP) que visa fornecer ao AR5 do IPCC projeções climáticas. Diversas equipes de modelagem climática do mundo contribuíram para esse trabalho e um grande repositório de dados foi gerados por essa iniciativa, dis-

ponibilizados para a comunidade científica e acessíveis a através do portal ESGF/PCMDI (<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5>).

À medida que diferentes grupos de modelagem ao redor do mundo incorporam maior resolução espacial, novos processos físicos e ciclos biogeoquímicos, os modelos climáticos estão sendo constantemente atualizados. Sob coordenação do IPCC estes esforços são organizados de forma a cumprirem um cronograma que resulta nas atualizações dos relatórios de avaliação (ARs). Cabe citar que em 2023, o IPCC divulgou o Sexto Relatório de Avaliação - AR6 (IPCC (2023)), onde os resultados da sexta fase do CMIP (CMIP6) foram analisados, porém os resultados do CMIP6 não foram incorporados neste estudo.

A mudança climática tem um impacto significativo nas ondas do oceano, resultando em alterações na sua altura, frequência e padrões de distribuição ao redor do globo. Como resultado do aumento da temperatura global, é esperado que a intensidade e a frequência de eventos climáticos extremos, como tempestades e furacões, aumentem em várias partes do globo, levando a mudanças no padrão das ondas extremas. Além disso, mudanças nos padrões de vento e na circulação atmosférica podem afetar a formação e propagação das ondas oceânicas.

Mori et al. (2010) utilizando projeções climáticas do modelo MRI-JMA realizaram simulações de ondas com o modelo SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*) para os períodos de 1979–2004 (clima presente), 2015–2031 (futuro próximo) e 2075–2100 (clima futuro) e concluíram que a altura das ondas no clima futuro aumentará tanto nas latitudes médias quanto no Oceano Antártico, com uma diminuição no equador. Já Semedo et al. (2012) avaliaram através de simulações com o modelo de ondas WAM forçado com as simulações climáticas do ECHAM5 a mudança no clima médio e extremo das ondas e concluíram que as mudanças até o final do século XXI são pequenas a moderadas, com os maiores sinais em direção aos polos na altura média anual e nas alturas extremas das ondas de ambos os hemisférios, mais pronunciado no Hemisfério Sul e mais provavelmente associado a um deslocamento correspondente nas trajetórias das tempestades de latitudes médias. As mudanças projetadas nos períodos médios das ondas, associadas às mudanças no clima das ondas nas latitudes médias a altas, também são avaliadas, revelando um aumento moderado no lado leste equatorial das bacias oceânicas.

Utilizando modelos da base do COWCLIP (*Coordinated Ocean Wave Climate Project*, Hemer et al. (2012)) como multi-model ensemble, Hemer et al. (2013) identificaram uma

diminuição da altura significativa média das ondas (Hs) ao longo de 25,8% da área oceânica global. Essa área de diminuição projetada é maior durante o inverno boreal (janeiro a março, média; 38,5% da área oceânica global) do que no inverno austral (julho a setembro, média; 8,4%). Um aumento projetado na média anual de Hs é encontrado em 7,1% do oceano global, predominantemente no Oceano Austral, o que é maior durante o inverno austral (julho a setembro; 8,8%). A atividade de ondas aumentada no Oceano Austral influencia uma proporção maior do oceano global à medida que o swell se propaga para o norte para as outras bacias oceânicas, que pode ser evidenciado pelo aumento no período médio anual das ondas (TM) em 30,2% do oceano global. Morim et al. (2021) também utilizando dados de COWCLIP, encontraram resultados que indicam um aumento projetado da altura significativa máxima anual das ondas e em eventos extremos de baixa frequência devido ao forçamento antropogênico. Os padrões de aumento projetados desses eventos extremos de ondas na região do Hemisfério Sul se assemelham à resposta histórica ao Modo Anular do Sul (SAM) positivo.

Analisando as projeções de 20 modelos do CMIP5 através de um método estatístico que estima a altura significativa das ondas a partir do campo de pressão ao nível médio do mar, Wang et al. (2014) identificaram aumentos significativos na altura das ondas nos trópicos (especialmente no leste do Pacífico tropical) e nas altas latitudes do Hemisfério Sul (ao sul de 45°S). Os aumentos projetados na altura das ondas são acompanhados por um aumento na variabilidade. No entanto, Casas-Prat et al. (2018) realizaram simulações de onda com o modelo WW3 a partir de forçantes atmosféricas de cinco modelos climáticos do CMIP5 para os períodos históricos (1979-2005) e futuros do cenário RCP8.5 (2081-2100), onde obtiveram resultados que mostraram que todos os cinco conjuntos de simulações de ondas projetaram ondas mais baixas no Atlântico Norte, correspondendo a velocidades de vento superficiais reduzidas. Entretanto, projetaram consistentemente um aumento na velocidade do vento superficial nas latitudes médias-altas do Hemisfério Sul, o que se traduz em um aumento na altura significativa de onda (Hs). Já Amores e Marcos (2020) analisaram as projeções das componentes das ondas até o final deste século, utilizando um algoritmo para diferenciar a componente de *swell* (marulho) do *wind sea* (vagas), e encontraram que o número de eventos de *swell* gerados no Hemisfério Norte diminuiu, enquanto o oposto foi verificado no Hemisfério Sul. Os autores sugerem que o aumento no Hemisfério Sul esteja diretamente associado a uma intensificação e deslocamento em

direção aos polos das correntes de jato projetadas por modelos climáticos atmosféricos.

Em artigo recente, Morim et al. (2019) avaliaram a robustez e a incerteza de projeções climáticas globais de onda e vento do CMIP5. Eles detectaram regiões oceânicas com mudanças robustas na altura significativa média anual e período das ondas da ordem de 5 a 15% e mudanças nas direções médias das ondas de 5 a 15°, em um cenário de alta emissão. Eles concluíram ainda que, aproximadamente 50% da região costeira do planeta está em risco devido a mudança no clima das ondas. Entretanto Meucci et al. (2020), através de uma abordagem por conjunto (ensemble) com resultados do CMIP5, identificaram uma diminuição na altura significativa das ondas extremas no Atlântico Norte em latitudes baixas a médias (aproximadamente 5 a 15%) e um aumento em latitudes elevadas (aproximadamente 10%) até o final do século 21 para o cenário de aquecimento RCP8.5. Também utilizando a abordagem por conjunto, agora com modelos do CMIP6, Badriana e Lee (2021) encontraram uma diminuição na altura média significativa das ondas ( $H_s$ ) na região do Oeste do Pacífico Norte até o final do século. Por outro lado, eles encontraram aumentos significativos na altura das ondas oceânicas no leste do Pacífico tropical e em latitudes elevadas do Hemisfério Sul.

Lobeto et al. (2021) analisaram valores de retorno de 5, 20, 50 e 100 anos da altura significativa das ondas são as mudanças para o período histórico e para cenários futuros e encontraram que o Oceano Antártico é a região que apresenta o aumento mais nos extremos de  $H_s$  sob o cenário RCP8.5, com aumentos locais de mais de 2 metros, independentemente do período de retorno analisado. A região do Antártica exibiu um aumento consistente nos valores de retorno de  $H_s$ , caracterizado por uma mudança média de até +0,9 metros para o mesmo cenário RCP8.5, mostrando para este último aumentos locais superiores a 3,5 metros para um período de retorno de 20 anos ou mais.

Em virtude deste tipo de estudo, o processo de adaptação às mudanças já começaram na indústria marítima. Na Norma Norueguesa NORSOK (2017), por exemplo, é recomendado aumentar a altura significativa das ondas e a velocidade do vento em 4% nos valores extremos para refletir uma possível alteração desses parâmetros devido às mudanças climáticas. Estudos como os de Vanem (2016) e Bitner-Gregersen et al. (2018) entre outros utilizam contornos ambientais para análises probabilísticas da confiabilidade estrutural, a fim de fornecer uma descrição probabilística conjunta de parâmetros como altura significativa e período das ondas. Neste sentido Mosquera-Mosquera et al. (2020) sugeriram

adotar uma abordagem combinando dados mete-oceanográficos de projeções climáticas e as incertezas associadas para a prática de projeto de navios e estruturas *offshore*. Seus resultados sugeriram que as mudanças climáticas podem afetar a resposta estrutural de maneiras diferentes e indicam uma tendência crescente para a resposta estrutural de longo prazo na Costa Sudeste Brasileira e uma ligeira tendência decrescente no Oceano Atlântico Norte

## 1.4 Regionalização Climática

Apesar dos avanços na resolução espacial dos modelos climáticos globais nos últimos anos, eles ainda não conseguem capturar características importantes em escalas menores, como nuvens, convecção e turbulência. Por essa razão, quando se trata de estudos de impactos locais, esses modelos não são os mais recomendados.

Conforme apontado por Jacob et al. (2007), os modelos globais, operando com escalas espaciais da ordem de 100 km ou mais, falham em representar adequadamente as heterogeneidades da superfície. Para obter informações mais precisas em escalas regionais, têm-se utilizado técnicas de regionalização, como a regionalização estatística (Wilby e Wigley (1997)) e a regionalização dinâmica, empregando simulações numéricas com modelos climáticos regionais (Giorgi e Mearns (1999)).

Wang et al. (2009) compararam resultados da regionalização estatística e regionalização dinâmica para ondas e encontraram que, em termos de reprodução do clima observado e variabilidade interanual, a regionalização estatística geralmente supera a dinâmica. Isso se deve principalmente aos vieses de variabilidade do modelo presentes nas estimativas dinâmicas, os quais são reduzidos nas estimativas estatísticas. Por outro lado, a regionalização estatística tende a produzir uma variabilidade menor do que a observada, devido à perda de parte da variância no processo de conversão da circulação atmosférica em alturas significativas das ondas usando regressão, especialmente em dados com baixa resolução.

A ideia de que os modelos de área limitada poderiam ser utilizados para estudos regionais de clima foi originalmente proposta por Dickinson et al. (1989). Esta ideia foi baseada no conceito do aninhamento de grades em apenas uma direção, no qual os campos meteorológicos de grande escala do Modelo de Circulação Geral da Atmosfera (GCM) fornecem as condições iniciais e de contorno laterais para as simulações do modelo climático regional

de alta resolução, sem que haja retroalimentação deste para o GCM.

Ambrizzi et al. (2018) realizaram uma revisão do estado da arte do desenvolvimento de modelos climáticos regionais e suas aplicações sobre a América do Sul. Os autores destacam a importância da coordenação de atividades relacionadas às projeções regionais de mudanças climáticas e mencionam os projetos CREAS, CLARIS, CLARIS-LPB e CORDEX e destacam como foram importantes para o desenvolvimento de grupos de modelagem climática regional na América do Sul e sua interconexão.

Desta forma é possível compreender que o processo de regionalização dinâmica (ou downscaling dinâmico) das projeções climáticas globais pode fornecer resultados mais realísticos sobre a física dos ciclones, uma vez que processos físicos importantes durante o seu desenvolvimento como a precipitação, transferência de calor e umidade da superfície para a atmosfera etc) normalmente são melhores resolvidos em modelos regionais, que permitem operar com mais alta resolução horizontal e vertical. Além do mais, os ventos obtidos das regionalizações climáticas contribuem também para simulações mais realistas de ondas sobre o oceano.

### 1.5 Projeto WeSACEx

O tema de tese aqui apresentado está inserido como um dos temas de pesquisa do projeto estabelecido através do Termo de Cooperação entre o Centro de Pesquisas da Petrobras (CENPES/PETROBRAS) e a Universidade de São Paulo sob o título de West South Atlantic Climate Experiment - WeSACEx (Crespo et al. (2023)), e cujos resultados foram gerados para subsidiar decisões de projetos referentes às instalações marítimas nas bacias de Santos e Campos.

O objetivo do WeSACEx foi compreender os aspectos mudanças climáticas, uma vez que há uma lacuna de informações nesse nível sobre o Atlântico Sul e o sudeste do Brasil. Dada a importância dos ciclones no controle dos ventos e ondas extremas na região, com influência decisiva no clima e tempo regional, também é necessário compreender os impactos das mudanças climáticas em sua ocorrência e intensidade.

Na fase inicial do projeto, foram analisados os ventos médios e extremos das reanálises CFSR (Saha et al. (2010)), ERA-Interim (Dee et al. (2011)) e ERA5 Hersbach et al. (2020), onde verificou-se que as reanálises mais recentes, como CFSR e ERA5, ofereceram

representações mais realistas dos campos médios e da variabilidade dos ventos na região do Oceano Atlântico Sul em comparação com gerações anteriores, devido ao refinamento da resolução horizontal e melhoria na representação de fenômenos atmosféricos de menor escala. No entanto, os valores extremos dos ventos ainda pareciam subestimados em comparação com observações locais. Além disso, as estatísticas dos ciclones nessas reanálises mostraram densidades mais altas nas versões modernas, ainda que as três principais regiões ciclogênicas costeiras da América do Sul pudessem ser identificadas em todas as reanálises (Cardoso et al. (2022)). Para avaliar os ventos sobre o oceano, o conjunto de dados CCMP foi utilizado em conjunto com as reanálises e observações *in situ*, mostrando boa representação dos ventos médios em todos os conjuntos, mas com menor erro nos valores extremos no CCMP, que foi usado como referência histórica para avaliação das regionalizações climáticas.

Os regionalizações dinâmicas com os modelos WRF utilizando condições iniciais e de contorno do CFSR e RegCM4 com ERA-Interim foram realizadas no período histórico (1979 a 2018) e os resultados foram analisados quanto aos impactos na representação de extremos e nesta etapa foi identificada a presença aos vieses dos modelos. Um ajuste linear do vento com base em dados satelitais (CCMP) foi implementado para mitigar essas diferenças (da Silva et al. (2022)). Os testes iniciais para representar os campos de altura de onda pelo modelo WW3 envolveram então a utilização de diferentes campos de vento como inicialização e foi avaliado o impacto do ajuste linear dos ventos na representação da altura de onda.

Para avaliar as projeções dos campos de vento e de ondas, as simulações climáticas foram divididas em três períodos. Período histórico ou clima presente (1979 a 2005), onde não houve alteração na forçante radiativa; futuro próximo (2006 a 2030) e futuro distante (2031 a 2060) onde o cenário simulado levou em conta a forçante radiativa RCP8.5.

Dado este contexto, a pesquisa descrita neste documento foi conduzida a partir das regionalizações atmosféricas do projeto WeSACEx e seguiu com a implementação, calibração e avaliação das simulações numéricas do campo de ondas, utilizando diferentes forçantes atmosféricas no sentido de reconstituir o clima de ondas no presente e projetar o clima de ondas no futuro, analisando a existência de possíveis mudanças e tendências nestes resultados.



## Bases de Dados, Modelos e Métodos Utilizados

### *2.1 Descrição dos Experimentos*

Os experimentos numéricos foram divididos em duas fases. Na primeira fase, cujo objetivo foi a calibração dos modelos, foram utilizados como forçantes bases de reanálise globais. Nesta etapa testes de sensibilidade foram realizados afim de se encontrar o melhor conjunto de parametrizações para cada uma das regionalizações dinâmicas com os modelos RegCM4 e WRF utilizando como condição inicial e de contorno lateral as reanálises do ERAI e CFSR respectivamente. Os experimentos numéricos com o modelo de ondas por sua vez foram conduzidos utilizando o modelo Wave Watch III (WW3) em duas grades, a primeira cobrindo todo o globo (Global) com resolução espacial de  $1,875 \times 1,875^\circ$  e a segunda (Atlsul) com  $0,25 \times 0,25^\circ$  de resolução cobrindo parte do atlântico sul, dentro dos limites dos domínios das regionalizações atmosféricas.

A Figura 2.1 apresenta os domínios regionalizados nos experimentos tanto atmosférico utilizando os modelos RegCM4 e WRF quanto na modelagem de ondas com o modelo WW3. Estes experimentos foram descritos em mais detalhes em Crespo et al. (2023) e a tabela com o resumo das parametrizações atmosféricas utilizadas são reproduzidas na Tabela 2.3 e as parametrizações do modelo WW3 na Tabela 2.2.

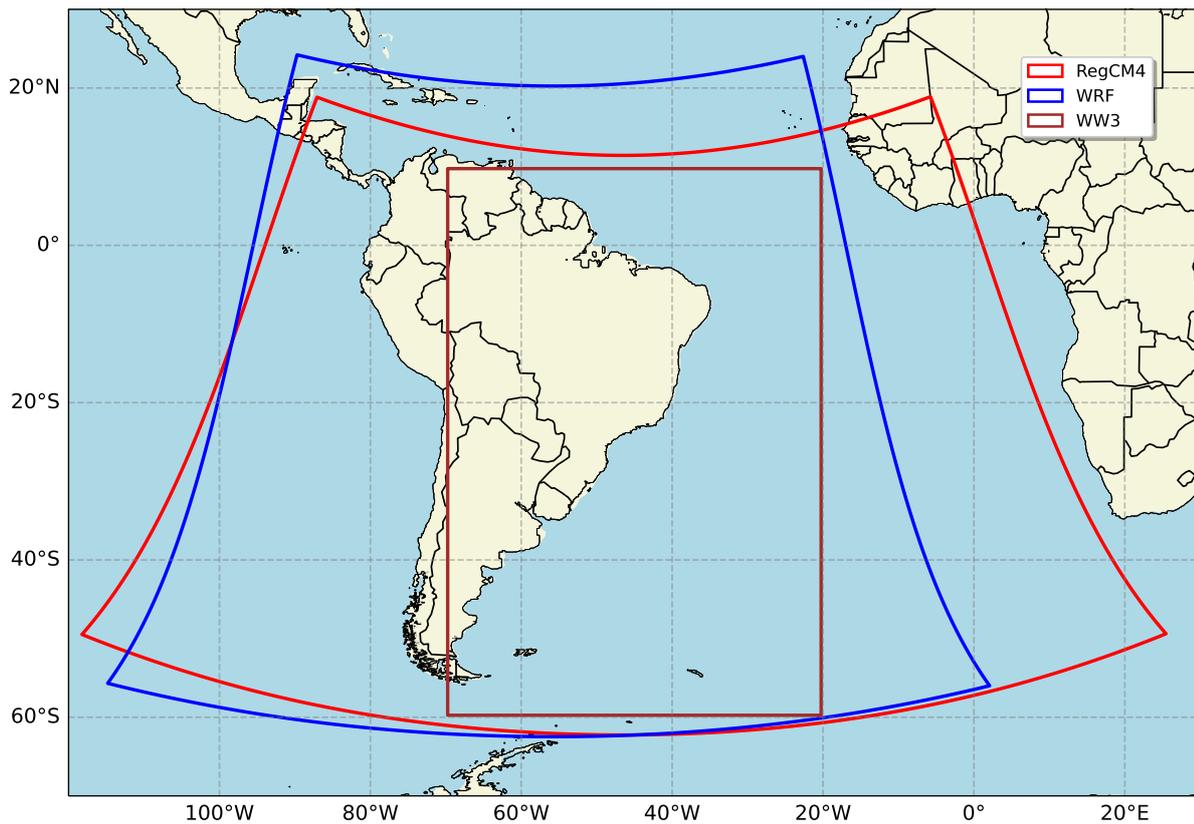


Figura 2.1: Domínios dos modelos atmosféricos RegCM4 e WRF e de ondas WW3.

Na segunda fase do estudo, as configurações derivadas dos testes de sensibilidade realizados na primeira fase foram aplicadas às regionalizações utilizando modelos climáticos globais (GCM) provenientes do CMIP5. Essas simulações numéricas foram conduzidas para o período de 1979 a 2060. Esse intervalo de simulação foi subdividido em três períodos distintos: o período histórico (Hist) de 1979 a 2005, durante o qual o modelo climático foi avaliado quanto à sua capacidade de reproduzir a climatologia observada e a necessidade de correção de viés; o período futuro próximo (NF) de 2006 a 2030; e o período futuro distante (FF) de 2031 a 2060. Ambos os períodos futuros foram simulados sob o cenário de forçamento radiativo RCP8.5, que pressupõe um contínuo aumento nas emissões ao longo do século XXI, resultando em um aquecimento de  $8,5 \text{ W/m}^2$  até o ano de 2100.

Entre os modelos do CMIP5, foram selecionados os modelos HadGEM2-ES e MPI-ESM-MR que em estudos anteriores (Llopart et al. (2014), da Rocha et al. (2014), Reboita et al. (2018), de Jesus et al. (2020)) demonstraram fornecer informações realísticas do clima de grande escala na América do Sul e mostraram-se adequados para regionalizações climáticas na região.

A Tabela 2.1 apresenta todos os experimentos de modelagem de ondas realizados, tanto durante a primeira fase de calibração dos modelos, quanto para a segunda fase de simulação do clima futuro através dos GCMs do CMIP5. Importante ressaltar que todos os experimentos foram simulados com os campos com e sem ajuste linear aplicados, o que na prática equivale ao dobro de simulações apresentado na Tabela 2.1. As bases e modelos utilizados nos experimentos serão descritos em mais detalhes nas próximas seções.

Tabela 2.1 - Experimentos numéricos de ondas e suas forçantes de vento.

Experimento	Domínio	Período	Forçante de Vento	Fronteira	Cenário
WW3-ERA1	Global	1979 a 2018	ERA-Interim	-	-
WW3-Reg/ERA1	Atlsul	1979 a 2018	RegCM4	WW3-ERA1	-
WW3-CFSR	Global	1979 a 2018	CFSR	-	-
WW3-WRF/CFSR	Atlsul	1979 a 2018	WRF	WW3-CFSR	-
WW3-Had	Global	1979 a 2005 (Hist)	HadGEM2-ES	-	-
	Global	2006 a 2030 (NF)	HadGEM2-ES	-	RCP8.5
	Global	2031 a 2060 (FF)	HadGEM2-ES	-	RCP8.5
WW3-Reg/Had	Atlsul	1979 a 2005 (Hist)	RegCM4/HadGEM2-ES	WW3-Had	-
	Atlsul	2006 a 2030 (NF)	RegCM4/HadGEM2-ES	WW3-Had	RCP8.5
	Atlsul	2031 a 2060 (FF)	RegCM4/HadGEM2-ES	WW3-Had	RCP8.5
WW3-WRF/Had	Atlsul	1979 a 2005 (Hist)	WRF/HadGEM2-ES	WW3-Had	-
	Atlsul	2006 a 2030 (NF)	WRF/HadGEM2-ES	WW3-Had	RCP8.5
	Atlsul	2031 a 2060 (FF)	WRF/HadGEM2-ES	WW3-Had	RCP8.5
WW3-MPI	Global	1979 a 2005 (Hist)	MPI-ESM-MR	-	-
	Global	2006 a 2030 (NF)	MPI-ESM-MR	-	RCP8.5
	Global	2031 a 2060 (FF)	MPI-ESM-MR	-	RCP8.5
WW3-Reg/MPI	Atlsul	1979 a 2005 (Hist)	RegCM4/MPI-ESM-MR	WW3-MPI	-
	Atlsul	2006 a 2030 (NF)	RegCM4/MPI-ESM-MR	WW3-MPI	RCP8.5
	Atlsul	2031 a 2060 (FF)	RegCM4/MPI-ESM-MR	WW3-MPI	RCP8.5
WW3-WRF/MPI	Atlsul	1979 a 2005 (Hist)	WRF/MPI-ESM-MR	WW3-MPI	-
	Atlsul	2006 a 2030 (NF)	WRF/MPI-ESM-MR	WW3-MPI	RCP8.5
	Atlsul	2031 a 2060 (FF)	WRF/MPI-ESM-MR	WW3-MPI	RCP8.5

## 2.2 Modelagem de Ondas

Para conduzir as análises do clima de ondas, foram realizadas simulações utilizando o modelo WAVEWATCH III (WW3) versão 6.07 (Tolman (2002), WAVEWATCH III R Development Group (WW3DG) (2019)). No WW3, a evolução do campo de ondas é simulada utilizando o espectro direcional de onda, sendo a energia discretizada em componentes espectrais como variável prognostica e as variáveis como altura significativa, período médio,

direção, etc., são obtidas a partir do espectro. A física do modelo inclui geração de energia, dissipação devido à quebra de ondas e devido ao fundo, refração, advecção e interações não lineares quadruplas. O modelo resolve a equação linear de balanço do espectro de energia de ação em função do número de onda  $\kappa$  e da direção  $\theta$ , a qual é definida como perpendicular à crista da onda. Os termos fonte são considerados como a soma e balanço de quatro principais termos:

- Interação vento-onda ou termo de entrada  $S_{in}$
- Interação não linear onda-onda  $S_{nl}$
- Dissipação  $S_{ds}$
- Termo de interação com o fundo  $S_{bot}$

Esses termos definem a equação geral da fonte de energia:  $S_{tot} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot}$

Os termos de interação vento-onda ( $S_{in}$ ) e o termo de dissipação ( $S_{ds}$ ) representam processos separados que governam as características de crescimento das ondas dentro do modelo. Na versão atual do modelo, cinco combinações desses dois termos estão disponíveis para uso:

- ST1 - Usada pelo antigo WAM ciclo 3;
- ST2 - Proposta por Tolman and Chalikov (1996);
- ST3 - Usada pelo WAM ciclo 4;
- ST4 - Termo fonte descrito por Ardhuin et al. (2007);
- ST6 - Rogers et al. 2012 & Zieger et al. 2015

O termo fonte utilizado neste estudo foi o ST4, uma vez que estudos anteriores mostraram que este termo fonte é adequado na simulação de eventos extremos. O principal parâmetro de calibração do ST4 é o BETAMAX que foi ajustado para o valor de 1,8, valor este encontrado como valor ótimo para as simulações das diferentes forçantes de vento utilizadas neste estudo. O parâmetro BETAMAX regula a transferência de momento do vento para as ondas e é diretamente proporcional à energia do espectro. O WW3 foi configurado

com duas grades, a primeira sobre um domínio global com uma grade de  $1,875^{\circ} \times 1,875^{\circ}$  (Global) e outra sobre o atlântico com resolução espacial de  $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$  (Atlsul).

A Tabela 2.2 apresenta as principais configurações utilizadas nos experimentos numéricos de modelagem da propagação das ondas conduzidas através do modelo WW3.

Tabela 2.2 - Configuração dos experimentos de modelagem de numérica de ondas com o WW3.

	Global	Atlsul
Forçante de Vento	ERA-Interim, CFSR	RegCM4, WRF
Resolução horizontal	$1,875 \times 1,875^{\circ}$	$0,25 \times 0,25^{\circ}$
Número de ptos	193x97	201x281
Batimetria	ETOPO1	
Termos Fonte	ST4	
Betamax	1,8	
Esquema de propagação	UQ	
Fricção com fundo	BT1	
Interação não-linear	NL1	
Dissipação no fundo	DB1	

## 2.3 Forçantes Atmosféricas Globais

Na primeira fase do projeto (fase de calibração), as bases de Reanálise Globais do ERA-Interim e CFSR foram utilizadas como condição inicial e de contorno lateral nas regionalizações com os modelos RegCM4 e WRF respectivamente e também como forçante de vento na superfície na grade de domínio Global do WW3, conforme listado na Tabela 2.1. Na fase seguinte, as projeções climáticas dos modelos HadGEM2-ES e MPI-ESM-MR para o período de 1979 a 2060 foram utilizadas nas regionalizações com o RegCM4 e WRF. Durante a fase de regionalização das projeções climáticas, o período de simulação foi dividido em 3 cenários. Período histórico (1979 a 2005), onde não há inserção de forçante radiativa, Futuro Próximo (NF) de 2006 a 2030 e Futuro Distante (FF) de 2031 a 2060. Nestes cenários de Futuro Próximo e Futuro Distante os resultados dos modelos globais com a forçante radiativa RCP8.5 foram utilizados nas regionalizações.

### 2.3.1 Reanálise CFSR

A base de reanálise do CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*) (Saha et al. (2010)) é um produto gerado pelo NCEP (*National Center for Environmental Prediction*) e distribuído pela NCDC (*National Data Climate Centre*). Trata-se de um conjunto de assimilação

de dados que acopla os sistemas oceano-superfície-atmosfera e continente-gelo, em escala global e em alta resolução, disponibilizando informações sobre estes domínios. O CFSR difere de outros produtos de reanálise pelo acoplamento entre o oceano e a atmosfera, por ter um modelo interativo de gelo marinho e também por assimilar dados de satélites através de um esquema de interpolação estatística. Além disso, contém informações sobre variações nos níveis de dióxido de carbono, aerossóis atmosféricos e gases-traço, incluindo assim seus efeitos sobre o sistema climático terrestre. A resolução espacial fornecida pela CFSR é de aproximadamente 27km e temporal horária.

### 2.3.2 Reanálise ERA-Interim

O ERA-Interim Dee et al. (2011) é uma reanálise atmosférica global produzida pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). ERA-Interim é uma reanálise atmosférica global a partir de 1979 atualizada até 2019, que apresenta os dados com uma resolução horizontal de cerca de 80 km e 60 níveis verticais entre a superfície e cerca de 65 km de altitude. A resolução temporal dos produtos é de 3 horas para os campos de superfície e 6 horas para os campos de alta altitude. O ERA-Interim apresenta várias melhorias em particular o ciclo da água, coincidindo com a introdução de novos satélites na assimilação. No geral, essas várias melhorias vêm dos desenvolvimentos no sistema de assimilação de dados e no modelo atmosférico.

### 2.3.3 Modelo Climático HadGEM2-ES

HadGEM2 (*Hadley Centre Global Environment Model version 2*) (Collins et al. (2011)) faz parte da família de modelos do MetOffice Unified Model. Especificamente, o HadGEM2-ES é uma das versões do HadGEM2 que além do acoplamento atmosfera-oceano, inclui a configuração de sistema terrestre (ES), isto é, vegetação dinâmica, biologia oceânica e química da atmosfera. Para as projeções climáticas do CMIP5 o HadGEM2-ES utilizou 38 níveis verticais e resolução horizontal de 1,25° de latitude por 1,875° de longitude.

### 2.3.4 Modelo Climático MPI-ESM-MR

MPI-ESM (Max-Planck-Institute Earth System Model) (Giorgetta et al. (2013)) consiste dos modelos acoplados de circulação geral da atmosfera e oceano ECHAM6 e MPIOM respectivamente, e os modelos de subsistema de superfície e vegetação JSBACH e para a

biogeoquímica marinha HAMOCC5. O modelo foi desenvolvido para uma variedade de configurações, diferindo, por exemplo, na resolução do ECHAM6 ou MPIOM (MPI-ESM-MR). A versão de resolução mista (MR) possui maior resolução vertical na atmosfera e maior resolução horizontal nos oceanos.

## 2.4 Forçantes Atmosféricas Regionais

Embora dos modelos globais terem aumentado a sua resolução espacial nos últimos anos, eles ainda não são capazes de representar importantes características na escala sub-grade, como nuvens, convecção e turbulência, por exemplo. Sendo assim, quando se está interessado em estudos de impactos locais e eventos extremos esses não são os modelos mais recomendados. As técnicas de regionalização (*downscaling*) para a obtenção de melhores informações na escala regional. A melhor caracterização da superfície, da topografia e das regiões costeiras, assim como a representação aprimorada de aspectos associados à convecção, tem feito com que, em alguns estudos, os modelos regionais de clima apresentem melhores resultados do que os modelos de circulação geral da atmosfera, quando se considera a escala local (Tapiador et al. (2020)).

A regionalização dinâmica das projeções de modelos globais do CMIP5 buscaram fornecer resultados mais realísticos sobre os eventos extremos no Atlântico Sul, uma vez que vários processos físicos importantes durante o desenvolvimento dos transientes (precipitação, transferência de calor e umidade da superfície para a atmosfera etc.) normalmente podem ser melhores resolvidos em modelos regionais de clima com resoluções horizontal e vertical mais refinadas. Os ventos obtidos das regionalizações climáticas, por sua vez, contribuem também para simulações mais realísticas das ondas sobre o oceano.

### 2.4.1 Regionalização Dinâmica com o RegCM4

O RegCM (Giorgi e Mearns (1999)) é um modelo climático de área limitada desenvolvido para simulação climática regional que tem sido aplicado por uma grande variedade de pesquisadores interessados em estudos climáticos regionais, desde estudos de processos paleoclimáticos até projeções do clima futuro. O RegCM4 (Giorgi et al. (2012)), lançado pelo ICTP em junho de 2010 é, portanto, um modelo hidrostático, compressível, utiliza coordenada vertical sigma-p e é executado em uma grade de Arakawa tipo B, no qual o

vento e as variáveis termodinâmicas são horizontalmente escalonadas usando um esquema explícito de integração de tempo, em que os dois modos de gravidade mais rápidos são primeiro separados da solução do modelo e, em seguida, integrados com passos de tempo menores.

### 2.4.2 Regionalização Dinâmica com WRF

Embora tenha sido desenvolvido como um uma ferramenta de modelagem regional em escala de tempo, o modelo WRF (*Weather Research and Forecasting*) (Skamarock et al. (2008)) também tem sido amplamente utilizado como ferramenta de regionalização climática. O modelo WRF possui um vasto conjunto de opções de parametrização que o torna versátil suficiente para aplicação em diferentes escalas espaciais e temporais. O núcleo dinâmico do WRF é formulado utilizando princípios físicos básicos, como a conservação de massa, conservação de momento, conservação de energia termodinâmica e a equação da transferência radiativa. O WRF é um modelo compressível, euleriano e não-hidrostatístico, com coordenada vertical seguindo o terreno  $\eta$ , grade C de Arakawa, opções físicas para representação da superfície, camada limite planetária, radiação atmosférica, microfísica e convecção de cúmulos e aninhamento de diversas grades.

Tabela 2.3 - Resumo das configurações dos experimentos de regionalização atmosférica.

	<b>RegCM4</b>	<b>WRF</b>
Resolução horizontal	25km	25km
Condição inicial e de contorno	ERA-Interim	CFSR
Número de pontos (lat,lon, níveis)	356x452x23	376x380x38
Microfísica de nuvens	SUBEX	WSM6
Convecção de Cúmulos (terra/oceano)	Tiedke/KF	KF/KF
Camada Limite	UW-PBL	YSU
Radiação	CCSM	CAM
Interface superfície-atmosfera	CLM4.5	NOAH
Camada de superfície	-	MM5

## 2.5 Bases Complementares

### 2.5.1 WAVERYS

WAVERYS (Law-Chune et al. (2021)) é uma reanálise global de ondas que descreve estados marítimos passados desde o ano de 1993. Este produto também é conhecido

como WAVERYS dentro do GLO-HR MFC, para corresponder a outros produtos globais plurianuais como GLORYS, BIORYS, etc. O núcleo do WAVERYS é baseado no modelo MFWAM, um modelo de ondas de terceira geração que calcula o espectro de ondas, ou seja, a distribuição de energia do estado do mar em frequência e direção em uma grade irregular de  $1/5^\circ$ . Quantidades médias de ondas derivadas desse espectro de ondas, como a altura significativa de ondas (SWH) ou o período médio de ondas, são entregues em uma grade regular de  $1/5^\circ$  com um intervalo de tempo de 3 horas. O espectro de ondas é discretizado em 30 frequências obtidas de uma sequência geométrica com o primeiro membro em 0,035 Hz e uma razão de 7,5. O WAVERYS leva em consideração correntes oceânicas da reanálise oceânica física GLORYS12 e assimila a altura significativa de ondas observadas de missões históricas de altimetria e espectros de ondas direcionais do Sentinel 1 SAR a partir de 2017 em diante.

### 2.5.2 CCMP

O *Cross-Calibrated Multi-Platform Wind Vector* (CCMP, Mears et al. (2022)) é uma base de dados de vento a 10 m de altura em cobertura quase global, em uma grade regular com alta resolução espacial ( $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ ) e temporal (6 horas) contemplando o período de 1987 até o presente. Os dados representam uma combinação de medições de diferentes satélites (escaterômetros, radiômetros) e dados *in situ* para a avaliação do processo de calibração, que utiliza a reanálise do ERA-Interim para inicialização de um método análise variacional (*Variational Analysis Method* - VAM). Os instrumentos utilizados para a aplicação do método são sensores de micro-ondas (*Special Sensor Microwave/Imager SSM/I*), denominados F08-F15.

## 2.6 Correção de Viés

Diversos estudos (Stopa e Cheung (2014), Campos et al. (2018), Kaiser et al. (2022)) identificaram que os ventos provenientes de conjuntos de reanálise subestimam alguns dos valores extremos para a magnitude do vento próximo à superfície. Portanto, ao utilizar-se de forçantes atmosféricas de reanálises para modelar as ondas algum tipo de ajuste nos campos de vento se faz necessário. Neste sentido Alves et al. (2009) realizaram um *hindcast* (1997 a 2005) do campo de ondas para o Oceano Atlântico Sul, utilizando para isto o mo-

delo WAVEWATCH III forçado com campos de vento e gelo obtidos de análises do modelo atmosférico global do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP/NOAA). Os autores identificaram que embora tenha havido boa concordância geral, os estados do mar modelados tendem a subestimar ligeiramente o componente de mar local (vagas) no início da formação de tempestades quando há um segundo pico espectral. Desta forma uma ajuste linear foi aplicado aos campos de vento baseado em medições fornecidas por boias de plataformas de petróleo. A avaliação dos campos de ondas resultantes foi feita usando dados de onda medidos na plataforma PETROBRAS P-25, norte da Bacia de Campos. A comparação entre valores medidos e modelados mostrou que o ajuste na forçante atmosférica proporcionou resultados mais realísticos tanto para alturas significativas de ondas ( $H_s$ ) quanto para o período de pico ( $T_p$ ). Neste sentido, dois métodos de calibração de vento foram aplicados por Campos et al. (2018) visando melhorias nas simulações de eventos extremos de ondas no Oceano Atlântico Sul utilizando o modelo Wave Watch III. No primeiro método, os autores aplicaram um modelo de regressão linear simples, usando coeficientes obtidos na comparação entre CFSR e dados de boias e no segundo método corrigiram deficiências do CFSR associadas a eventos extremos, substituindo ventos "defeituosos" por dados de satélite dentro de ciclones. Os resultados indicaram que a calibração linear combinado com ajustes termo de entrada de energia do modelo de ondas reduziram o viés médio de  $H_s$ , mas não evitam aumento de erros com percentis. Entretanto, a utilização de ventos de satélite combinados com calibração linear resulta em melhor representação das ondas, especialmente acima do percentil 93, reduzindo erros e proporcionando simulações precisas de condições de mar calmo a extremo.

Lemos et al. (2020), por sua vez avaliaram quatro métodos diferentes de correção de viés aplicando-os a membros de um *multi-model ensemble* de ondas utilizando o *hindcast* do *Global Ocean Waves 2* (GOW2, Perez et al. (2017)) como referência de dado histórico. O primeiro método, chamado de método dos deltas consiste em aplicar homoganeamente ajustes através das diferenças entre os campos simulados e a base de referências. O segundo e terceiro método são os métodos de mapeamento de quantil empírico (EQM) e mapeamento quantil empírico de Gumbel (EGQM) que consistem em calibrar a função de distribuição cumulativa empírica (ECDF) do modelo simulado adicionando a cada ECDF um termo de correção de quantil (ou seja, mapeando as distribuições de cada componente do ensemble nas distribuições de referência). O quarto método de correção de viés aplicado

é um método não linear (DAGQM), onde diferentes correções são aplicadas, dependendo da direção média das ondas (MWD). Os resultados mostraram que os métodos empíricos de mapeamento de quantis de Gumbel (EGQM) e mapeamento de quantis empíricos (EQM) são eficazes na redução dos vieses, principalmente nas latitudes extratropicais de ambos os hemisférios para valores extremos de altura de onda. No entanto, o método DAGQM mostrou uma aplicabilidade particular para estudos regionais e costeiros, pois fornece mais informações físicas sobre a simulação, em vez de apenas correção estatística.

Tendo em vista a subestimativa dos valores de magnitude do vento obtidos durante as regionalizações com o modelo WRF-CFSR e a superestimativa pelo modelo RegCM4-ERA-Interim, da Silva et al. (2022) implementaram durante o WeSACEx um procedimento de correção dos ventos extremos a partir de um ajuste linear tomando como referência a metodologia aplicada por Campos et al. (2018) e os dados do *Cross-Calibrated Multi-Platform Wind Vector* (CCMP). Tal metodologia foca no ajuste de valores para percentis elevados, com mínimo impacto sobre valores médios. O método consiste na comparação ponto-a-ponto entre os ventos simulados pelo modelo e uma série de referência (CCMP) para o ajuste. Para cada ponto são calculados os quantis das duas séries temporais e um ajuste linear é feito para velocidades do vento a partir do percentil de 80% entre as duas distribuições.

Conforme discutido no estudo realizado por da Silva et al. (2022), as regionalizações feitas tanto com o modelo WRF quanto com o RegCM4 indicaram a ocorrência de extremos mais pronunciados ao longo da costa da Argentina e do Uruguai. Esta tendência pode estar associada ao fato de que esses modelos regionais capturam de forma mais precisa os eventos atmosféricos que dão origem a esses extremos. No entanto, ao se analisar a velocidade do vento ajustada pelo WRF-CFSR, observam-se diferenças sutis, especialmente na região sul. Assim, parece que cada modelo tem suas próprias vantagens e limitações na representação dos ventos extremos, e uma integração dos resultados obtidos por ambos pode oferecer uma compreensão mais completa dos eventos de vento extremo na região.

## 2.7 Métodos de Análise Estatística

As mudanças na média são o tipo mais comum de mudanças consideradas em estudos de projeções climáticas. Além da média este estudo tinha interesse específico em mudan-

ças na distribuição destes dados, particularmente nos extremos. Neste sentido, diferentes métodos estatísticos podem ser empregados para avaliar distribuições e analisar estatisticamente mudanças/tendências de padrões climáticos em estudos atmosféricos e oceânicos. Segundo Liu et al. (2016) esses métodos podem ser divididos em 6 grupos a depender do tipo de mudanças que são projetados para detectar. Esse grupos incluem os métodos de detecção paramétricos, métodos de detecção não paramétricos, métodos de soma acumulativa, métodos de análise *bayesiana*, métodos sequenciais e métodos de detecção baseados em análise de regressão. Desta forma, os foram empregados para identificação e caracterização de alterações nos padrões das projeções climáticas de onda, o teste de tendência de Mann-Kendall (método não-paramétrico) e o teste de mudança de regime de Rodionov (método sequencial), descritos nas próximas seções.

### 2.7.1 Análise de Tendência

O método Sen's Slope (Sen (1968)) é uma alternativa não paramétrica para estimar a inclinação da reta para uma série temporal univariada. Esse método envolve o cálculo dos declives para todos os pares de pontos de tempo e, em seguida, usa-se a mediana desses declives como uma estimativa da inclinação geral.

$$\beta = \text{Mediana} \left( \frac{x_i - x_j}{j - i} \right) \quad (2.1)$$

onde  $x =$  é o parâmetro analisado no tempo  $i$  e  $j$ , sendo  $i$  sempre menor que  $j$ .

O teste de Mann-Kendall (Mann (1945), Kendall (1975)) é uma técnica comumente utilizada para examinar se existe uma tendência temporal estatisticamente significativa em uma série de dados. Esse método avalia a hipótese nula ( $H_0$ ), que sugere a ausência de qualquer tendência na série de dados. A decisão de rejeitar ou não essa hipótese é baseada em um nível de significância pré-estabelecido, que representa a probabilidade de cometer um erro ao rejeitar  $H_0$  quando ela é verdadeira.

A variável estatística  $S$ , para uma série de  $n$  dados do teste de Mann-Kendall, é calculada a partir da somatória dos sinais da diferença, par a par, de todos os valores da série ( $x_k$ ) em relação aos valores futuros ( $x_j$ ):

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k) \quad (2.2)$$

onde,

$$\text{sign}(x_j - x_k) = 1 \quad \text{se } x_j - x_k > 0$$

$$\text{sign}(x_j - x_k) = 0 \quad \text{se } x_j - x_k = 0$$

$$\text{sign}(x_j - x_k) = -1 \quad \text{se } x_j - x_k < 0$$

Quando  $n \geq 10$ , a variável  $S$  pode ser comparada com uma distribuição normal, na qual a sua variância,  $Var(S)$ , pode ser obtida através da equação abaixo, na qual  $t_i$  representa a quantidade de repetições de uma extensão  $i$  (Por exemplo, uma série histórica com três valores iguais entre si teria 1 repetição de extensão igual a 3, ou  $t_i = 1$  e  $i = 3$ ).

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} - \sum_{i=1}^m \frac{t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (2.3)$$

O índice  $Z_{mk}$  segue a distribuição normal, na qual a sua média é igual a zero, valores positivos indicam uma tendência crescente e negativos tendência decrescentes. De acordo com o sinal de  $S$ , o índice  $Z_{mk}$  da distribuição normal é calculado a partir de:

$$Z_{mk} = \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}}; \text{ para } S > 0 \quad (2.4)$$

$$Z_{mk} = 0; \text{ para } S = 0 \quad (2.5)$$

$$Z_{mk} = \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}}; \text{ para } S < 0 \quad (2.6)$$

Por se tratar de um teste bi-caudal, para rejeitar a hipótese  $H_0$  é preciso que o valor absoluto de  $Z_{mk}$  seja superior a  $Z_\alpha/2$ . Sendo o  $\alpha$  o nível de significância.

### 2.7.2 Mudança de Regime

As mudanças de regime são definidos como reorganizações rápidas dos parâmetros ambientais de um estado relativamente estável para outro. Os regimes podem durar várias décadas e as mudanças frequentemente parecem estar associadas a alterações no sistema climático Rodionov (2004). Existem vários métodos projetados para detectar mudanças de regime tanto em séries temporais individuais quanto em sistemas inteiros. Dessa forma, Rodionov (2004) propôs uma abordagem para esse problema, usando uma técnica de processamento de dados sequencial. Na análise sequencial, o número de observações não é fixo.

Em vez disso, elas vêm em sequência. Para cada nova observação, um teste é realizado para determinar a validade da hipótese nula  $H_0$  (nesse caso, a existência de uma mudança de regime).

$$diff = t * \sqrt{\frac{2\sigma^2}{L}} \quad (2.7)$$

Definido o limiar  $L$  dos regimes para uma variável  $X$ , A diferença entre os valores médios de dois regimes subsequentes é calculada, onde um teste (*t-Student*) é realizado para determinar se seriam estatisticamente significativos de acordo. Onde  $t$  é o valor da distribuição com " $2L - 2$ " graus no nível de probabilidade dada no nível  $p$ . Para isso, a média  $X_{R1}$  dos valores iniciais da variável  $X$  é determinada como uma estimativa para o regime  $R1$  e os níveis que devem ser atingidos nos  $L$  anos subsequentes para se preparar para uma mudança para o regime  $R2$ , de forma que:

$$\overline{X_{R2}} = \overline{X_{R1}} \pm diff \quad (2.8)$$

Para cada novo valor, começando com o ano  $i = L + 1$ , uma verificação é realizada para saber se é maior que  $X_{R1} + diff$  ou menor que  $X_{R1} - diff$ . Caso não exceda esse valor  $X_{R2} = X_{R1} \pm diff$ , então assume-se que o regime atual não mudou. Neste caso, um  $X_{R1}$  é recalculado, para incluir o novo  $X$ . Se o novo  $X_{R2}$  for excedido, então este ano  $X_i$  é considerado como um possível ponto de partida  $j$  para o novo regime  $R2$ .

Depois que o ponto de mudança  $X_i$  é estabelecido, cada novo valor de  $X_i$  será usado para verificar se o regime se mantém, usando uma anomalia  $X_i - X_{R2}$ . Se a anomalia  $X_i - X_{R2}$  for do mesmo sinal daquela no momento de uma mudança de regime, aumentaria a confiança de que a mudança ocorreu.

$$RSI_{i,j} = \sum_{i=j}^{j+m} \frac{x_i^*}{L * \sigma} \quad (2.9)$$

onde  $m = 0, 1, 2, \dots, L - 1$

O valor positivo(negativo) do  $RSI$  significa que houve um deslocamento do regime para cima (baixo) no ano  $j$  e que o mesmo é significativo no nível de probabilidade  $p$ . A busca pelo próximo turno do regime  $R3$  começa no ano  $i = j + 1$ . Os cálculos continuam em um *loop* até que todos os dados disponíveis para a variável  $X$  sejam processados.

### 2.7.3 Período de Retorno

Os projetos atuais de instalações *offshore* utilizam como parâmetros, extrapolações estatísticas baseadas em dados pretéritos das condições extremas ambientais com período de retorno de 10, 50, 100 e até 1000 anos. Sendo assim, o impacto da mudança climática no projeto, construção e operação de estruturas *offshore* precisa ser considerado, especialmente em relação ao aumento da intensidade e frequência de eventos extremos de vento e onda. A extrapolação se faz necessária quando não há disponibilidade de dados que cubram períodos tão longos. Em geral, quanto mais longo o conjunto de dados, mais precisa será a extrapolação.

Existem basicamente dois métodos para calcular os valores de baixa probabilidade (extrapolações): o método histórico e o método dedutivo. O método histórico, aplicado neste estudo, é um método que utiliza dados, seja de medições diretas ou de simulações de modelos numéricos, e ajusta a cauda (região de baixa probabilidade) da distribuição de probabilidade apropriada para estes dados. O método histórico requer o uso de um método de ajuste de curva como mínimos quadrados, máxima verossimilhança, *L-moments* (Hosking (1990)) para ajustar uma distribuição analítica (por exemplo, *Gumbel*, *Weibull*) aos dados originados de medições ou de um modelo de previsão. Uma desvantagem é que a confiança estatística no valor extrapolado diminui rapidamente para períodos de retorno maiores do que duas ou três vezes o comprimento do banco de dados. Conseqüentemente, as extrapolações para intervalos de recorrência muito raros de 1.000 anos ou mais são especulativas, dadas a duração da amostra de dados comumente disponível. Tucker e Pitt (2001) fornecem uma discussão detalhada sobre como aplicar o método histórico.

A extrapolação de conjuntos de dados de uma variável específica segue os procedimentos descritos a seguir. Considerando  $F$  a distribuição de uma variável  $X$  em um intervalo arbitrário de  $t$  horas, valores extremos de  $X$  com período de retorno  $T_R$  em unidades de anos podem ser definidos como o quantil  $(1 - 1/(nT_R))$  da distribuição de  $X$ , expresso como:

$$X_{T_R} = F_x^{-1} \left( 1 - \frac{1}{nT_R} \right) \quad (2.10)$$

onde  $n$  é o número de eventos independentes por ano.

Diferentes organizações certificadoras (ISO19901-1 (2013), DNV (2007), NORSOK

(2017), American Petroleum Institute (2007)) recomendam modelar estaticamente os estados de mar através de distribuições conjuntas, onde uma função de densidade de probabilidade marginal (PDF) para  $H_s$  condicionando a PDF para a variável dependente  $T_p$ . Para definir extremos desta forma, com um parâmetro associado, é preciso introduzir o conceito de contorno ambiental. A ideia dos contornos ambientais é definir parâmetros ao longo dos quais as respostas extremas com um determinado período de retorno devem se situar (Winterstein et al. (1993)). O método de contornos ambientais utilizado neste estudo é o I-FORM (*Inverse-First Order Reliability Method*) desenvolvido por Forristall e Cooper (1997). Os contornos ambientais baseados no I-FORM são amplamente usados na engenharia oceânica, onde algumas aplicações podem ser encontrados Vanem (2016), Mosquera-Mosquera et al. (2020). Nesta abordagem, assume-se que a distribuição marginal de  $H_s$  segue uma distribuição Weibull ou Gumbel com base em 3 parâmetros, enquanto uma PDF Log-normal condicional é usada para  $T_p$ .

Usando o método I-FORM podemos determinar o modelo de contorno ambiental do  $H_s$  com  $T_p$  associado da seguinte forma:

Para  $H_s, T_p$ :

$$f_{H_s T_p}(h, t) = f_{H_s}(h) f_{T_p|H_s}(t|h) \quad (2.11)$$

Então, transformamos a distribuição para o espaço normalizado padrão  $U$ :

$$\Phi(u_1) = F_{H_s}(h_s) \quad (2.12)$$

$$\Phi(u_2) = F_{T_p|H_s}(t_p) \quad (2.13)$$

Estabelecendo o círculo para o período de retorno prescrito no espaço  $U$ :

$$\sqrt{u_1^2 + u_2^2} = \beta = -\Phi^{-1/n T_R} \quad (2.14)$$

E transformando o círculo em um contorno no espaço dos parâmetros ambientais.

$$h_s = F_{H_s}^{-1}(\Phi(u_1)) \quad (2.15)$$

$$t_p = F_{T_p|H_s}^{-1}(\Phi(u_2)) \quad (2.16)$$

O potencial impacto das mudanças climáticas na distribuição simultânea da altura significativa e do período de pico das ondas pode ser explorado analisando a distribuição

---

conjunta dessas variáveis com dados gerados por projeções numéricas de ondas comparando os resultados obtidos para o clima atual com os obtidos para cenários climáticos futuros.



## Avaliação das Simulações

As regionalizações dinâmicas dos modelos RegCM4 forçadas com o ERAI e WRF forçado com o CFSR para o período de 1979 a 2018, desenvolvidas durante o projeto WeSACEx, foram analisadas por Crespo et al. (2023) que concluíram que a redução da escala dos modelos climáticos regionais (RCMs) diminuiu o viés de velocidades dos ventos mais intensos nas simulações para todas as regiões. Embora tenha sido verificada uma redução no viés, ele ainda existia e as primeiras avaliações das regionalizações atmosféricas para as séries médias dentro das bacias de Campos, Santos e Espírito Santo indicaram que o modelo RegCM4-ERAI apresentou os máximos superestimados na região costeira e oceânica do sudeste do Brasil enquanto o conjunto WRF-CFSR, apresentou uma subestimação dos quantis de velocidade do vento mais altos (da Silva et al. (2022)). Estes resultados geraram uma demanda por uma correção de viés nos campos de vento, a fim de que as simulações do campo de ondas obtivessem resultados mais realistas. Foi então aplicado um ajuste linear dos valores extremos com base nos dados satelitais do CCMP para corrigir esses vieses. Em um primeiro momento, todos os campos de vento foram interpolados para uma grade comum de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , e separados para o período comum entre 1988 - 2018. Para cada ponto de grade, a equação de ajuste linear foi determinada a partir da reta dada pelos percentis superiores a 80% e os parâmetros (a,b) resultantes foram aplicados para cada série temporal completa da simulação (1979-2018) seguindo a metodologia aplicada por da Silva et al. (2022)

De posse dos campos de vento das reanálises, dos campos de vento regionalizados sem correção e regionalizados aplicando o ajuste linear nos quantis superiores, as simulações numéricas do campo de ondas utilizando estas diferentes forçantes de vento foram realizadas. Os resultados da inter-comparação entre estas simulações do campo de ondas são

apresentados nas próximas seções.

### 3.1 Avaliação Espacial

Para avaliação espacial, foi utilizada a reanálise de ondas do WAVERYS (Law-Chune et al. (2021)) como referência. Como as reanálises do WAVERYS estão disponíveis somente a partir de 1993, todos os conjuntos foram analisados no período coincidente de 1993 a 2018, contemplando assim 25 anos de dados.

A Figura 3.1 traz o campo médio de altura significativa de ondas ( $H_s$ ) de 1993 a 2018 do WAVERYS (a) e os campos de diferença entre os experimentos com as forçantes regionalizadas WW3-RegCM4/ERA-Interim (b), WW3-RegCM4/ERA-Interim com ajuste linear (c), WW3-WRF/CFSR (d) e WW3-WRF/CFSR com ajuste linear (e). É possível identificar que a região do estreito de Drake a subestimativa é generalizada em ambos os modelos, antes e depois do ajuste nos campos de vento. Pode se especular que este fato esteja relacionado ao aninhamento entre a grade Global e a grade Atlsul do modelo de ondas que, em função das grades das regionalizações atmosféricas (Figura 2.1), ficou limitada a esta região reconhecidamente de eventos energéticos em relação a vento e onda.

As diferenças encontradas entre os experimentos que no experimento WW3-RegCM4/ERA-Interim e WW3-RegCM4/ERA-Interim ajustado mostram que o viés positivo de 0,3 a 0,7 m verificado em parte do Atlântico até 20°S ficou limitado apenas a uma área restrita da costa do Nordeste do Brasil, assim como o viés negativo na região equatorial ficou restrito a uma área bem menor no experimento com o vento ajustado. Já nos experimento WW3-WRF/CFSR as diferenças antes e depois do ajuste nos ventos foram bem mais sutis, com destaque para região junto ao sul da Argentina, onde havia um viés positivo entre 0,3 e 0,5 m que foi removido na simulação onde o ajuste foi aplicado.

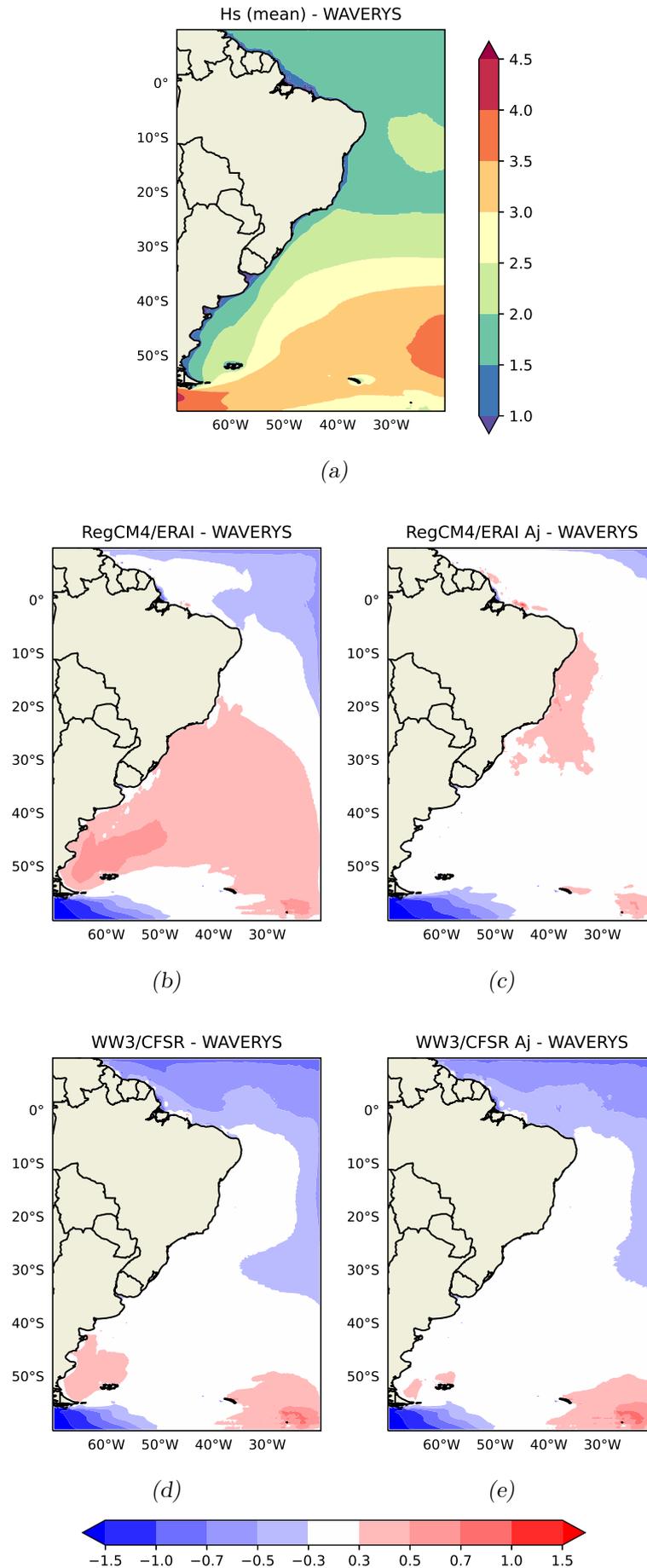


Figura 3.1: Campos de diferença da média de Hs no período de 1993 a 2018 entre os experimentos WW3-RegCM4/ERA1 (b,d) e WW3-WRF/CFSR (c,e) e as reanálises do WAVERYYS (a)

De modo similar, os campos de diferença para o percentil 95 da altura significativa de ondas são apresentados na Figura 3.2. O resultados do experimento WW3-RegCM4/ERA-Interim (b) mostram uma área extensa (a sul de 10°S) onde o viés em relação ao WAMERS bastante alto (acima de 1,5 metros), já no campo com o vento ajustado (c) essas diferenças positivas foram reduzidas em termos de magnitude e extensão, porém no limite norte da grade a área onde havia um viés positivo foi expandida no experimento com os ventos ajustados. Novamente os resultados do experimento WW3-WRF/CFSR (c) apresentaram pouca diferença em relação aos experimentos com vento ajustado (e), exceto por uma região de viés positivo no leste do nordeste brasileiro e ao largo do sul da Argentina que tiveram vieses reduzidos.

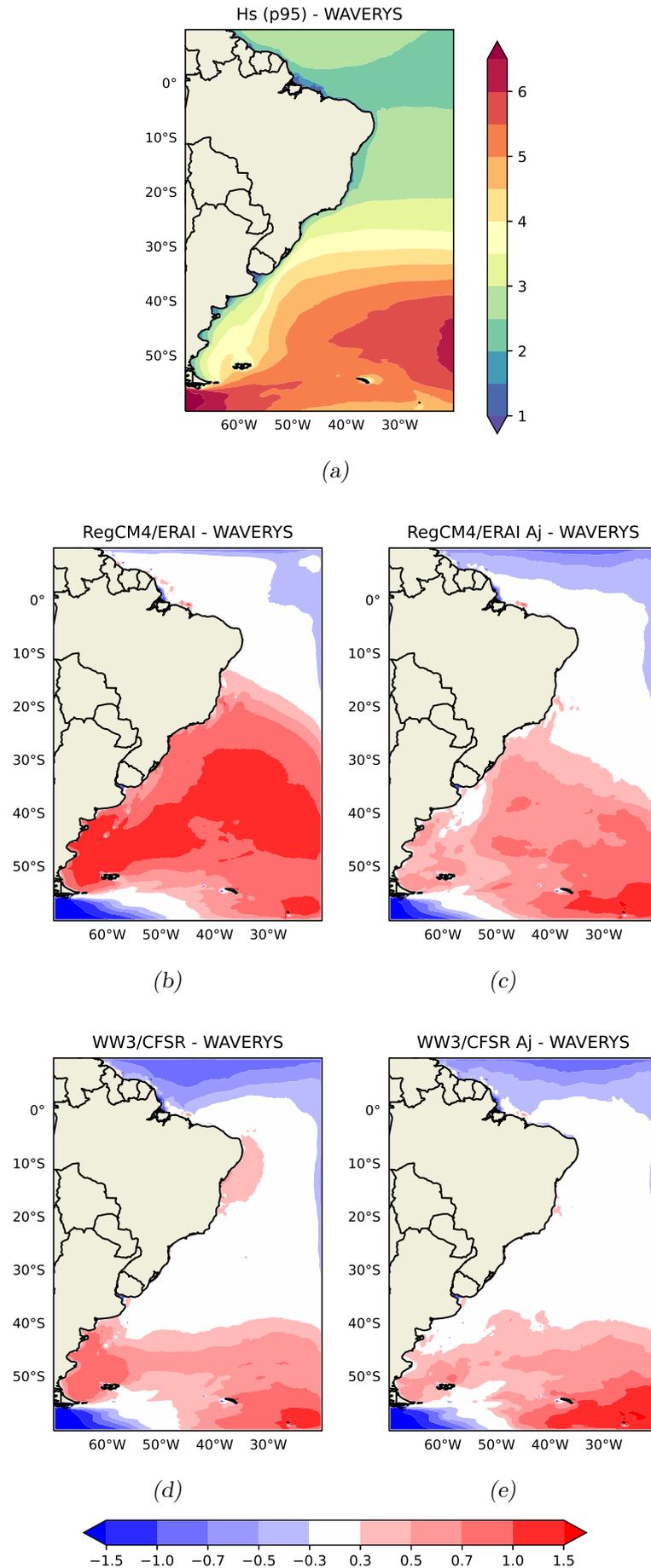


Figura 3.2: Campos de diferença do percentil 95 de Hs no período de 1993 a 2018 entre os experimentos WW3-RegCM4/ERA1 (b,d) e WW3-WRF/CFSR (c,e) e as reanálises do WAVERYS (a)

### 3.2 Avaliação Pontual

Para a realização de uma avaliação pontual dos experimentos com e sem ajuste do vento, foi realizado um levantamento de dados de altura significativa de ondas, junto ao programa PNBOIA e cedidos pela CHEVRON Upstream. Os dados levantados são referentes a boias disponíveis ao largo da costa brasileira durante o período histórico de 1979 a 2018. A Tabela 3.1 apresenta a posição geográfica, período, profundidade de instalação e fonte de cada uma das 10 boias que tiveram os seus dados analisados.

Tabela 3.1 - Boias meteo-oceanográficas utilizadas no estudo.

	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Período</b>	<b>Fonte</b>	<b>Profundidade</b>
<i>Rio Grande</i>	-31.589	-49.907	2009 a 2019	PNBOIA	200 m
<i>Itajaí</i>	-27.408	-47.266	2009 a 2019	PNBOIA	200 m
<i>Santos</i>	-25.273	-44.927	2011 a 2018	PNBOIA	200 m
<i>Frade</i>	-21.850	-39.850	2013 a 2014	CHEVRON	1200 m
<i>Vitória</i>	-19.932	-39.703	2015 a 2017	PNBOIA	200 m
<i>Cabo Frio</i>	-22.978	-42.096	2009 a 2013	PNBOIA	200 m
<i>Cabo Frio 2</i>	-23.632	-42.207	2016 a 2018	PNBOIA	45 m
<i>Porto Seguro</i>	-16.002	-37.938	2012 a 2016	PNBOIA	200 m
<i>Recife</i>	-8.153	-34.558	2012 a 2016	PNBOIA	200 m
<i>Fortaleza</i>	-3.213	-38.432	2016 a 2018	PNBOIA	200 m

Todo o conjunto de dados de altura significativa de ondas das boias foi submetidos a uma série de testes de controle de qualidade (CQ) automático e manual e análises preliminares dos dados foram realizadas com o objetivo de estipular limites para os testes de CQ. Algumas características importantes durante o processo de qualificação dos dados são:

- Foi gerada uma série contínua a taxa de amostragem de 1 hora, preenchendo com *not a number* (NaN) os períodos de dados faltando.
- Nos testes de CQ, cada valor classificado como inconsistente é substituído por NaN.
- Depois de qualificadas, as séries foram re-amostradas a cada hora.

Os testes de Controle de Qualidade aplicados foram:

1. Teste de Range do sensor - valores que excedam limites do sensor ou limites plausíveis. Os limites utilizados foram 0 e 100 metros.
2. Teste de Range climatológico - Valores que excedam limites climatológicos. Esses limites são definidos através de análise preliminar dos dados.
3. Teste de Spike (picos) - Valores que excedam um limite em relação a média dos dados vizinhos. Os argumentos de entrada são o número de pontos para calcular uma média móvel centrada (mm) e a diferença entre o valor instantâneo com o valor da média (lim).
4. Variabilidade Temporal - Verifica se a diferença de medição entre dois instantes ultrapassa um limite. Os argumentos de entrada são o intervalo de tempo entre duas medições e o valor limite dessa diferença.

Após etapa de controle de qualidade, as séries temporais de altura significativa de onda foram extraídas dos experimentos WW3-RegCM4/ERA-Interim, WW3-RegCM4/ERA-Interim Ajustado, WW3-WRF/CFSR e WW3-WRF/CFSR Ajustado para cada um dos pontos listados na Tabela 3.1 e ilustrados na Figura 3.3. Foram produzidos gráficos de série temporal dos períodos coincidentes e sobre estes períodos foram gerados diagrama de Taylor, que reproduzem graficamente o índice de correlação, a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSD) e o desvio padrão dos experimentos em relação aos dados de referência (dados das boias). As funções de densidade de probabilidade (PDF) também são calculadas de modo a analisar como se comportaram as distribuições dos experimentos em relação aos dados de referência, e por último foram gerados gráficos quantil-quantil (*Q-Q plot*) que é um outro método gráfico para comparar duas ou mais distribuições ao plotar seus quantis um contra o outro.

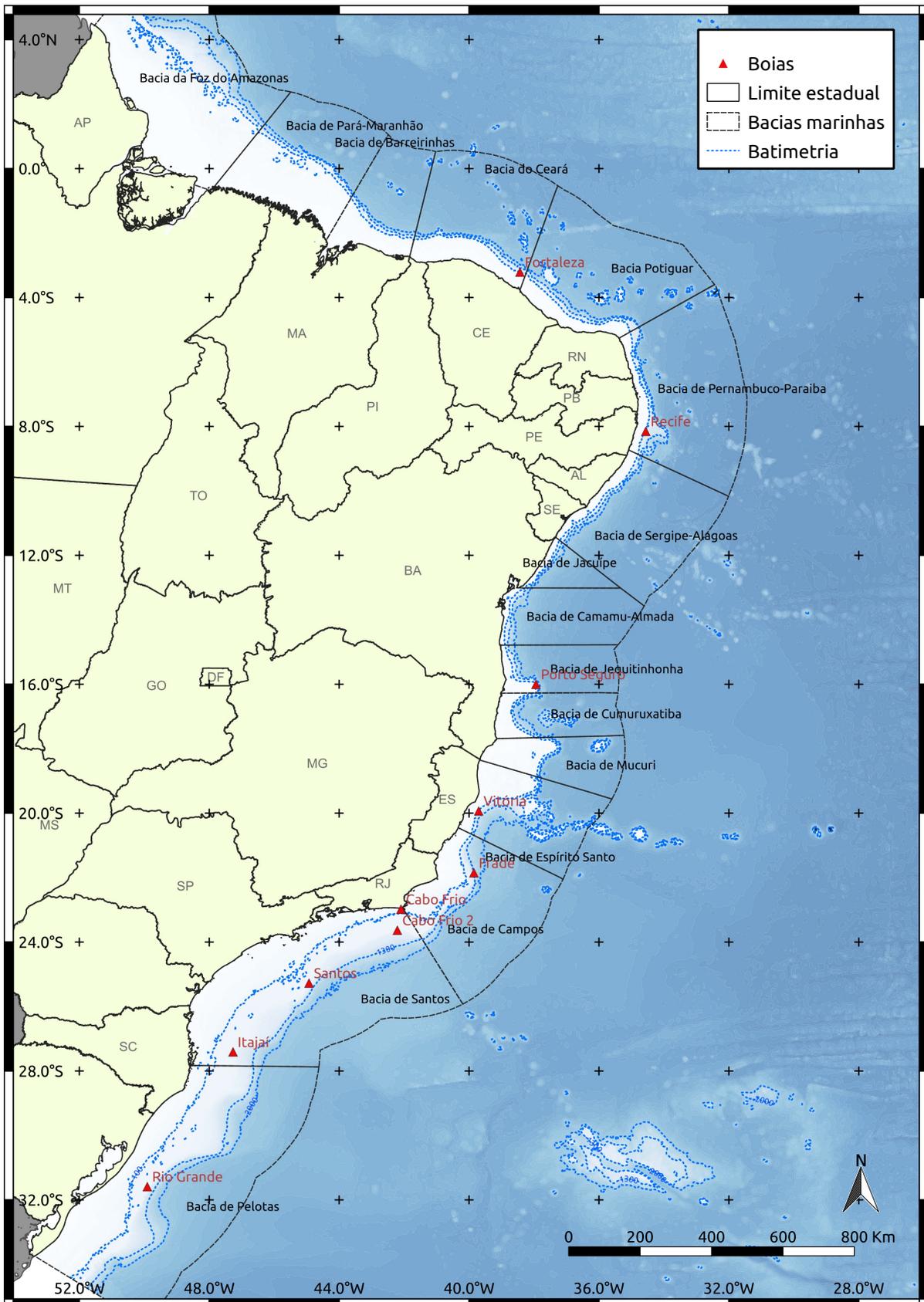
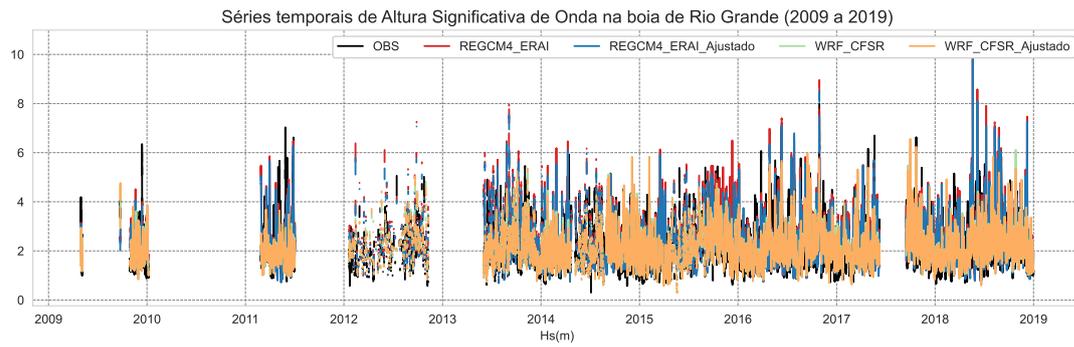


Figura 3.3: Mapa cartográfico da região de estudo com as bacias marinhas e os pontos dos dados utilizados.

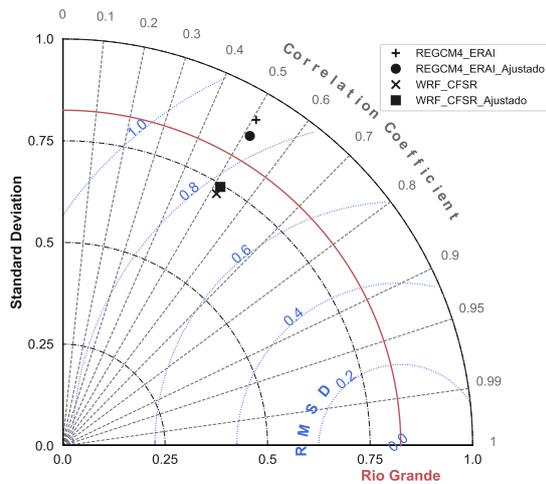
### 3.2.1 Boia de Rio Grande - PNBOIA

A boia de Rio Grande é a boia que possui a maior série de dados na costa brasileira. Dentre o período total disponível, foi obtida uma série de 48083 registros horários dentre os anos de 2009 e 2018. A Figura 3.4 (a) apresenta as séries temporais e o diagrama de Taylor é exibido em (b) onde é possível verificar graficamente que os experimentos com o vento ajustado se aproximaram mais do padrão de variabilidade (desvio padrão - linha vermelha) dos dados medidos em relação aos experimentos não ajustados. Em relação ao RMSD os experimentos WW3-WRF/CFSR (WW3-WRF/CFSR Ajustado) apresentaram menores valores 0,77 (0,77) em relação aos experimentos com WW3-RegCM4/ERA-Interim (WW3-RegCM4/ERA-Interim Ajustado) com 0,88 (0,85).

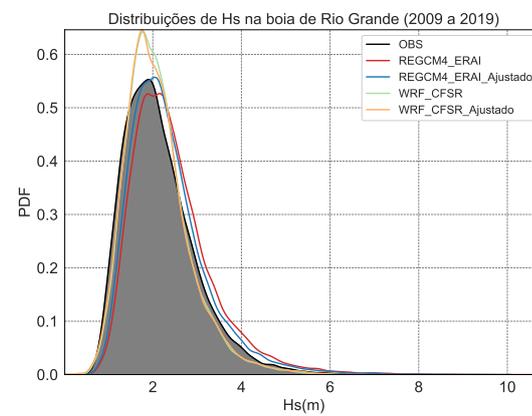
O coeficiente de correlação não sofreu alteração entre os experimentos com e sem ajuste nos campos de vento, registrando valores de 0,51 para o WW3-RegCM4/ERA-Interim e de 0,52 nas simulações com WW3-WRF/CFSR. Já em relação às distribuições é possível identificar tanto nas PDFs (c) quanto no Q-Q plots (d) que os experimentos WW3-RegCM4/ERA-Interim superestimaram principalmente as ondas maiores enquanto as simulações WW3-WRF/CFSR subestimaram. Quanto ao ajuste nos campos de vento, os resultados evidenciam que os experimentos com vento ajustado tiveram seus vieses de superestimativa ou subestimativa reduzidos principalmente nos quantis superiores.



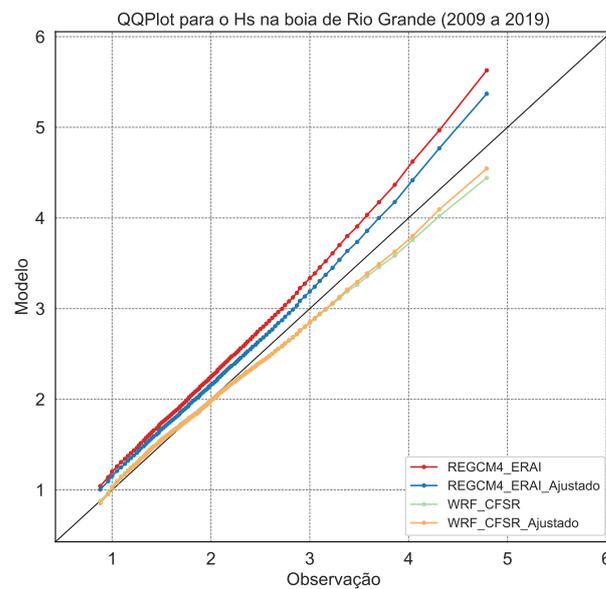
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.4: Séries temporais (a), diagrama de Taylor (b), função de distribuição de probabilidade (PDF) (c) e Q-Q plot dos dados de altura significativa de onda na boia de Rio Grande (PNBOIA) comparado com os experimentos WW3-RegCM4/ERA1, WW3-RegCM4/ERA1 Ajustado, WW3-WRF/CFSR, WW3-WRF/CFSR Ajustado

### 3.2.2 Boia de Itajaí - PNBOIA

Os dados qualificados da boia de Itajaí apresentam 5 séries contínuas de dados no período de 2009 a 2019 (Figura 3.5) totalizando 45667 registros horários válidos. Neste período os dados de Hs foram comparados com os dados dos experimentos WW3-RegCM4/ERA-Interim, WW3-RegCM4/ERA-Interim Ajustado, WW3-WRF/CFSR, WW3-WRF/CFSR Ajustado.

O resultado desta comparação em termos de correlação, erro quadrático e desvio padrão pode ser visto graficamente através do diagrama de Taylor (b) que mostra novamente que o desvio padrão dos experimentos com vento ajustado ficaram mais próximos do desvio padrão dos dados. Em termos de correlação os experimentos com WW3-WRF/CFSR sem ajuste (com ajuste) registraram um índice de 0,50 (0,53) enquanto que os experimentos WW3-RegCM4/ERA-Interim sem ajuste (com ajuste) 0,47 (0,47). Os valores do RMSD obtidos para os experimentos sem ajuste (com ajuste) foram de 0,84 (0,75) no WW3-RegCM4/ERA-Interim e 0,73 (0,74) no WW3-WRF/CFSR.

As PDFs e Q-Q plots mostram que para os valores até baixos de Hs, os experimentos WW3-WRF/CFSR subestimam muito pouco, aumentando a subestimação a partir de 2,5 m, sendo que o vento ajustado tem o efeito de reduzir de forma muito sutil esses vieses. Já para os experimentos WW3-RegCM4/ERA-Interim a superestimativa é mais pronunciada, sendo que para os quantis superiores o vento ajustado reduz de forma significativa esse viés.

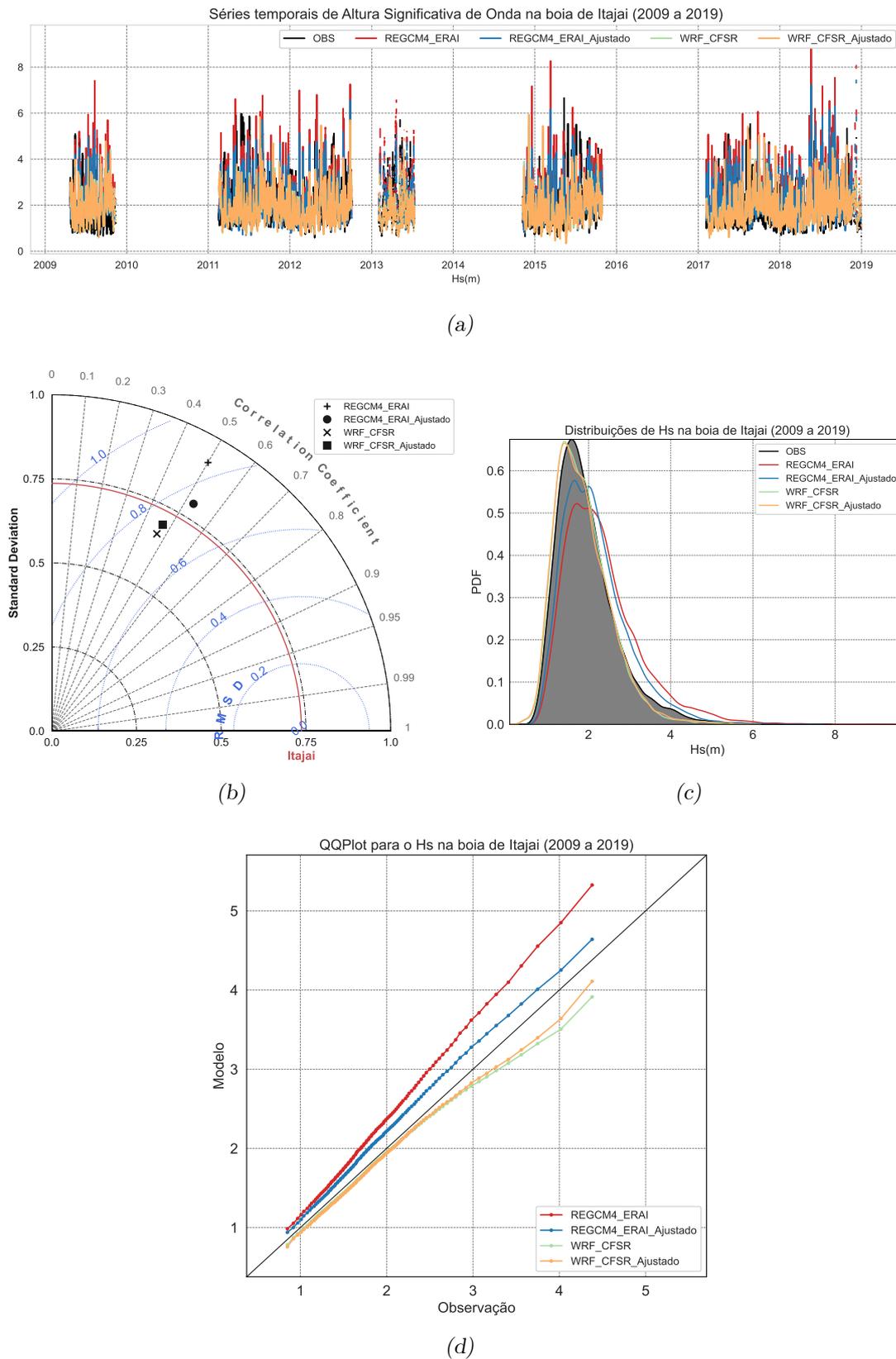
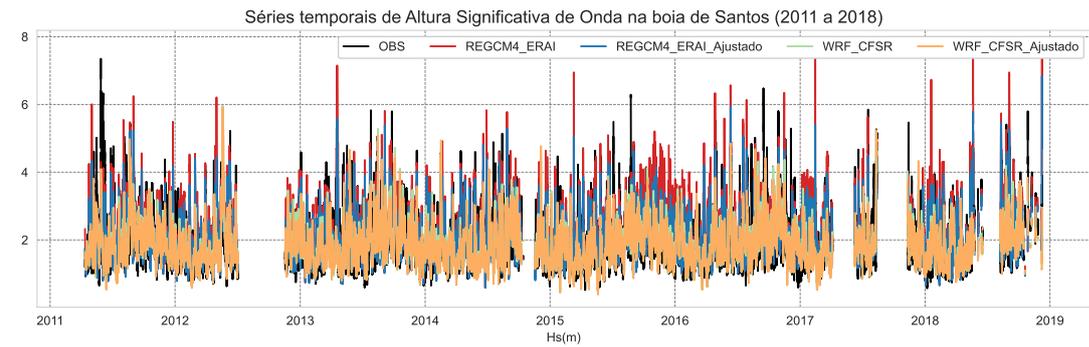


Figura 3.5: Séries temporais (a), diagrama de Taylor (b), função de distribuição de probabilidade (PDF) (c) e Q-Q plot dos dados de altura significativa de onda na boia de Itajaí (PNBOIA) comparado com os experimentos WW3-RegCM4/ERA-Interim, WW3-RegCM4/ERA-Interim Ajustado, WW3-WRF/CFSR, WW3-WRF/CFSR Ajustado

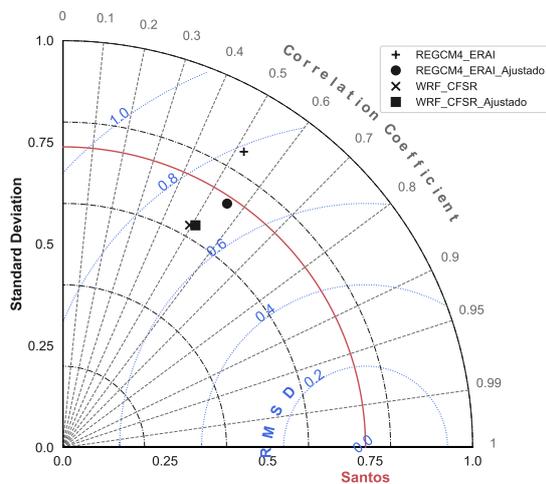
### 3.2.3 Boia de Santos - PNBOIA

A Figura 3.6 (a) apresenta as séries temporais dos períodos onde foi possível obter dados qualificados de Hs. Foram 6 conjuntos de dados com destaque para o período do final de 2014 ao início de 2017 onde foi possível obter mais de 2 anos de dados praticamente contínuos. No total foram 56070 registros horários qualificados.

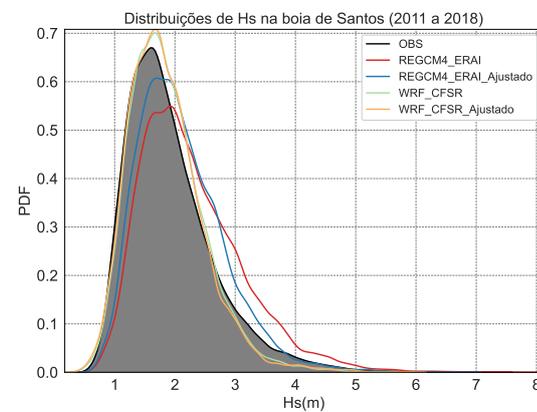
Os resultados do diagrama de Taylor mostram que o ajuste do vento trouxe melhorias significativas para as simulações de ondas do experimento WW3-RegCM4/ERA-Interim, reduzindo o erro quadrático de 0,79 para 0,69 metros e aumentando a correlação de 0,52 para 0,56. O desvio padrão também ficou bem aproximado do desvio padrão dos dados. Por outro lado o ajuste dos ventos no experimento WW3-WRF/CFSR não trouxe melhoria significativa nos indicadores estatísticos. Em relação a distribuição, o experimento WW3-WRF/CFSR reproduziu bem os quantis inferiores (até 2,0 m) embora a subestimativa dos quantis superiores tenha sido pouco beneficiada do ajuste do vento. Entretanto, para o experimento WW3-RegCM4/ERA-Interim a redução no viés de superestimativa foi bastante significativa nos quantis superiores, deixando os valores extremos muito similares aos observados na boia.



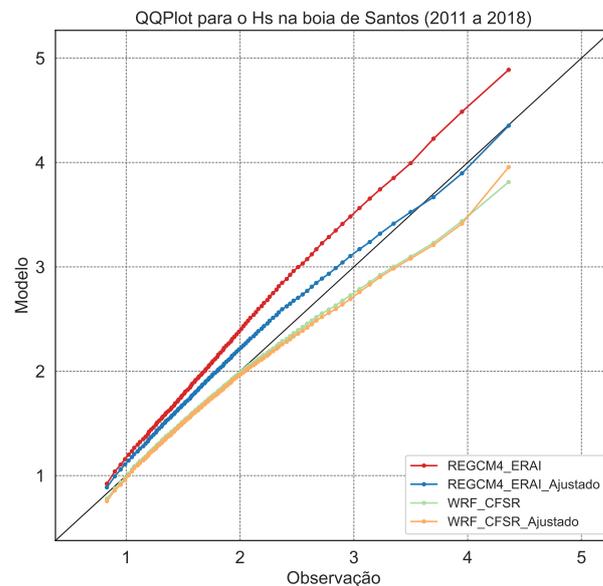
(a)



(b)



(c)



(d)

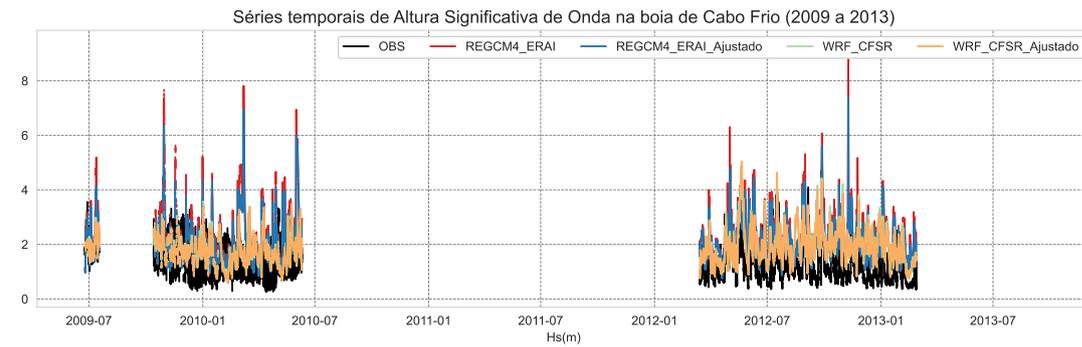
Figura 3.6: Séries temporais (a), diagrama de Taylor (b), função de distribuição de probabilidade (PDF) (c) e Q-Q plot dos dados de altura significativa de onda na boia de Santos (PNBOIA) comparado com os experimentos WW3-RegCM4/ERA-Interim, WW3-RegCM4/ERA-Interim Ajustado, WW3-WRF/CFSR, WW3-WRF/CFSR Ajustado

### 3.2.4 Boia de Cabo Frio - PNBOIA

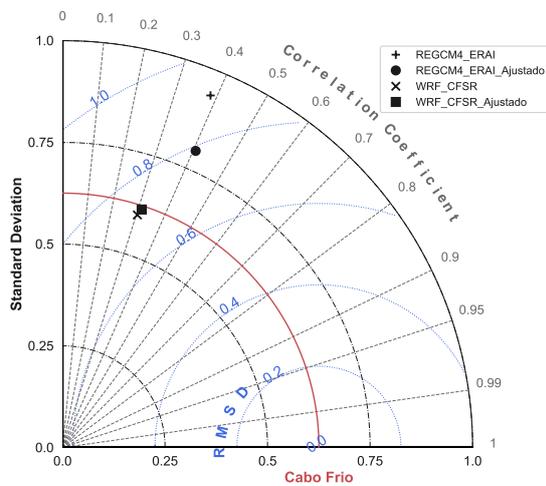
Para a boia de Cabo Frio foi possível obter 3 períodos de dados qualificados no meio de 2019, entre o final de 2019 e meio de 2010 e entre o início de 2012 e 2013. Estes períodos totalizaram 14052 registros horários apresentados através das séries temporais (Figura 3.7 (a)).

Por tratar-se de uma localização muito costeira (Figura 3.3), os modelos em geral superestimaram muito a altura significativa das ondas em todos os percentis (d). Pode-se atribuir este fato tanto ao à limitação do próprio modelo de ondas WW3 em representar a propagação de ondas em águas rasas quanto à resolução da grade Atlsul que foi configurada com  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  de resolução espacial.

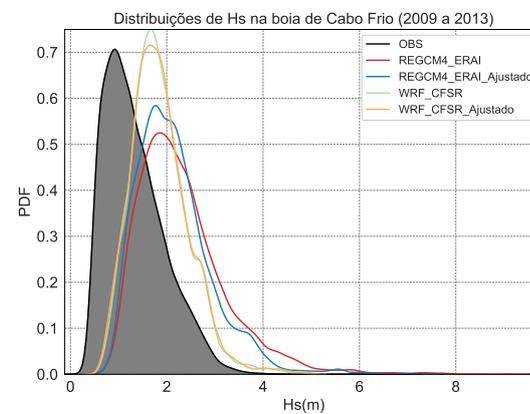
Os índices estatísticos (b) no WW3-WRF/CFRSR pouco se beneficiaram do ajuste nos campos de vento apresentando valores de correlação de 0,30 (0,31) e de erro quadrático de 0,72 m (0,73 m) para os experimentos sem ajuste (com ajuste). No entanto, para o WW3-RegCM4/ERA-Interim o ajuste reduziu o viés de forma geral embora ainda mantendo-se muito acima dos valores observados, registrando valores de correlação de 0,38 (0,41) e erro quadrático de 0,90 m (0,79 m) nos experimentos sem ajuste (com ajuste).



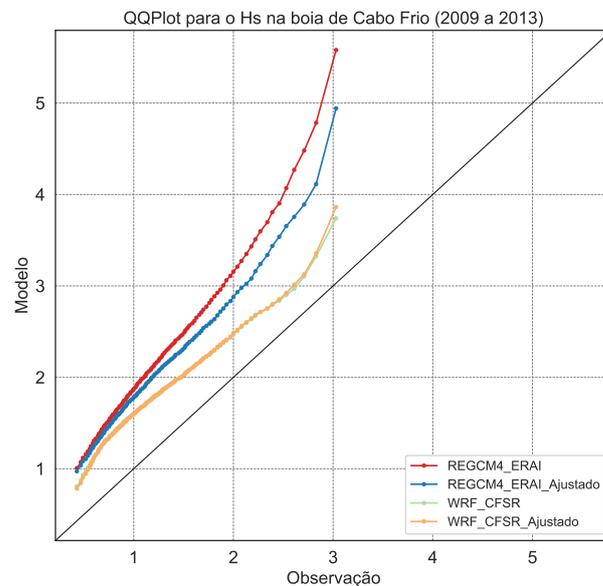
(a)



(b)



(c)



(d)

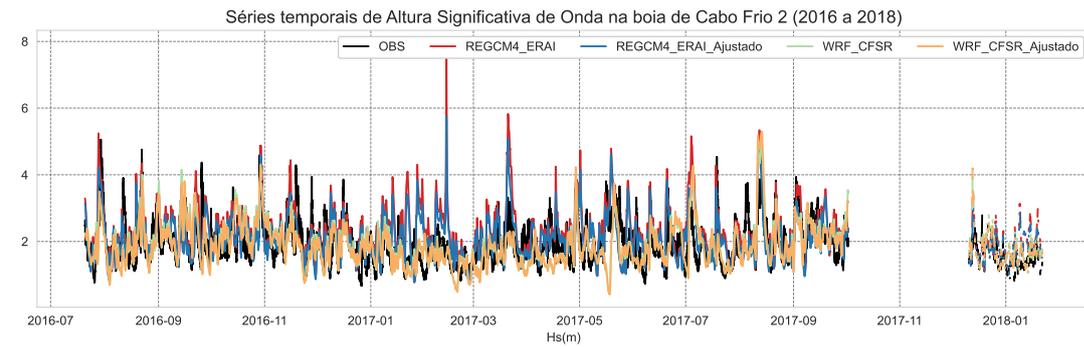
Figura 3.7: Séries temporais (a), diagrama de Taylor (b), função de distribuição de probabilidade (PDF) (c) e Q-Q plot dos dados de altura significativa de onda na boia de Cabo Frio (PNBOIA) comparado com os experimentos WW3-RegCM4/ERA-Interim, WW3-RegCM4/ERA-Interim Ajustado, WW3-WRF/CFSR, WW3-WRF/CFSR Ajustado

### 3.2.5 Boia de Cabo Frio 2 - PNBOIA

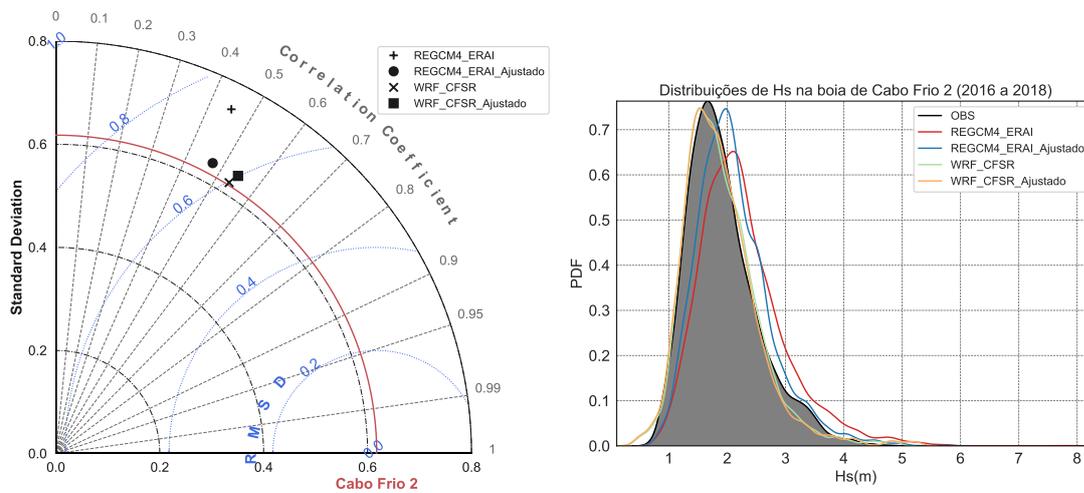
A Figura 3.8 (a) apresenta as séries temporais dos dados qualificados na boia Cabo Frio 2. Entre o meio de 2016 e início de 2018 foram 110002 registros horários. Nestes registros de Hs, em fevereiro de 2017 é observado um máximo de 7,96 metros no experimento WW3-RegCM4/ERA-Interim que não encontra nenhum paralelo do longo de toda série. Embora a correção de viés através do ajuste do vento tenha reduzido significativamente este valor para menos de 6,0 metros, o mesmo permanece excessivamente alto em relação aos dados e aos demais experimentos.

O diagrama de Taylor (b) mostra uma superioridade dos experimentos WW3-WRF/CFSR em relação aos WW3-RegCM4/ERA-Interim. Entretanto o ajuste no campo de vento WW3-RegCM4/ERA-Interim melhorou significativamente os índices estatísticos. A correlação no WW3-WRF/CFSR obteve valores de 0,54 (0,55) e o erro quadrático ficou em 0,60 m (0,60 m) para as simulações sem ajuste (com ajuste). O WW3-RegCM4/ERA-Interim com vento ajustado apresentou um aumento da correlação de 0,45 para 0,47 e uma redução no erro quadrático de 0,75 m para 0,60 m.

Em relação às distribuições (PDFs (c) e Q-Q plots (d)) mostraram que os experimentos WW3-WRF/CFSR tiveram uma ótima aderência aos dados observados de Hs com valores até 2,0 m. A partir deste ponto passa a haver uma subestimativa que é revertida para uma superestimativa nos percentis extremos (a partir de 3,5 m). Nessa situação a correção do vento acabou aumentando o viés e elevando superestimativa nos dois percentis superiores. Já os experimentos WW3-RegCM4/ERA-Interim apresentaram uma superestimativa em todos os percentis, sendo que a correção do vento ajudou na redução desse viés principalmente nos percentis superiores.

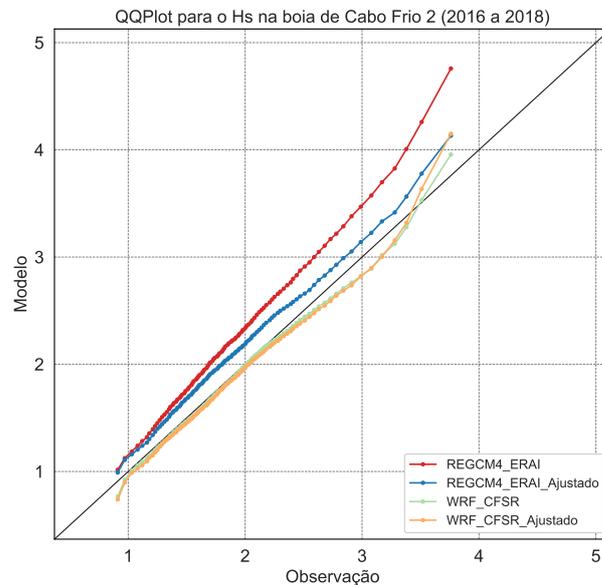


(a)



(b)

(c)



(d)

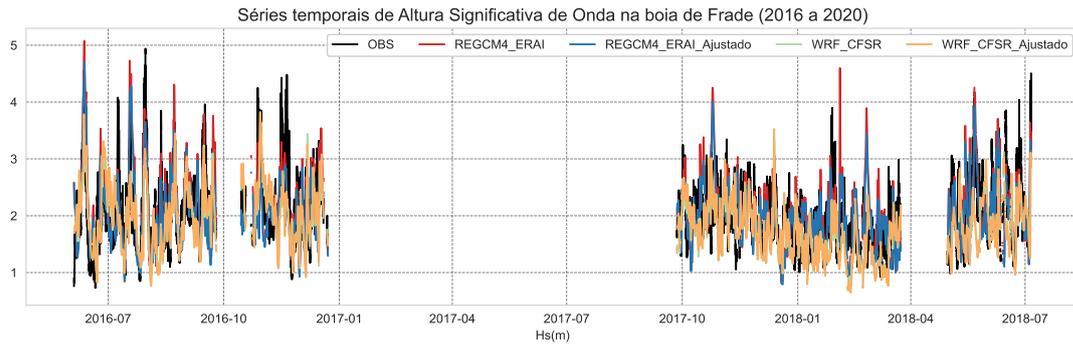
Figura 3.8: Séries temporais (a), diagrama de Taylor (b), função de distribuição de probabilidade (PDF) (c) e Q-Q plot dos dados de altura significativa de onda na boia de Cabo Frio 2 (PNBOIA) comparado com os experimentos WW3-RegCM4/ERA-Interim, WW3-RegCM4/ERA-Interim Ajustado, WW3-WRF/CFSR, WW3-WRF/CFSR Ajustado

### 3.2.6 Boia do Campo de Frade - CHEVRON

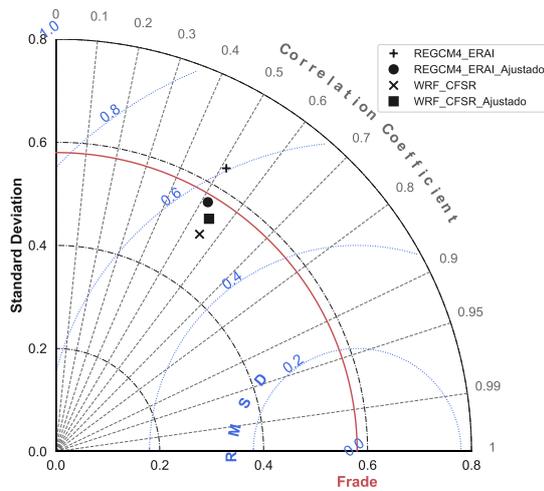
O levantamento das informações da boia do Campo de Frade apresentou 9773 registros horários qualificados distribuídos em quatro conjuntos de dados entre 2016 e 2018 (Figura 3.9).

A análise do diagrama de Taylor (b) aponta em termos estatísticos para uma performance superior dos experimentos com WW3-WRF/CFSR em relação ao WW3-RegCM4/ERA-Interim. A correlação obtida foi de 0,51 (0,52) para o WW3-RegCM4/ERA-Interim (WW3-RegCM4/ERA-Interim Ajustado) e 0,55 (0,55) para ambos experimentos com WW3-WRF/CFSR. Em termos do erro médio quadrático os valores foram de 0,60 (0,56) para o WW3-RegCM4/ERA-Interim (WW3-RegCM4/ERA-Interim Ajustado) e 0,52 (0,53) para o WW3-WRF/CFSR (WW3-WRF/CFSR Ajustado).

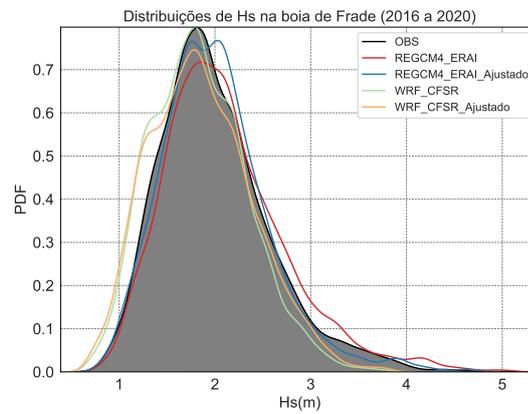
Por outro lado, as PDFs (c) e o Q-Q plot (d) mostram um viés negativo, indicando subestimativa em todos os quantis no experimento WW3-WRF/CFSR, porém com viés mais negativo nos quantis superiores. Esta subestimativa foi reduzida sutilmente em todos os quantis com o vento ajustado. Já nos experimentos WW3-RegCM4/ERA-Interim é observado um viés positivo a partir dos quantis acima de 2,0 m. Para estes quantis superiores, o resultado com o campo de vento ajustado reduziu de maneira significativa os vieses.



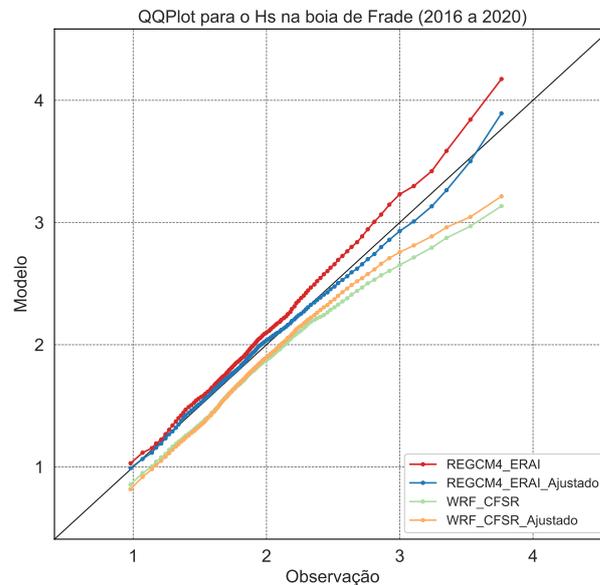
(a)



(b)



(c)



(d)

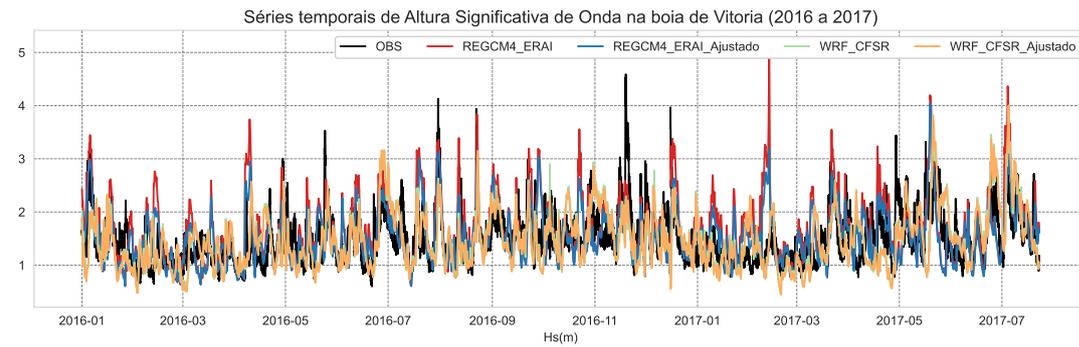
Figura 3.9: Séries temporais (a), diagrama de Taylor (b), função de distribuição de probabilidade (PDF) (c) e Q-Q plot dos dados de altura significativa de onda na boia do Campo de Frade (CHEVRON) comparado com os experimentos WW3-RegCM4/ERA-Interim, WW3-RegCM4/ERA-Interim Ajustado, WW3-WRF/CFSR, WW3-WRF/CFSR Ajustado

### 3.2.7 Boia de Vitória - PNBOIA

A Figura 3.10 apresenta as séries temporais de altura significativa de ondas entre janeiro de 2016 e julho de 2017 em um único conjunto de 13658 registros horários qualificados.

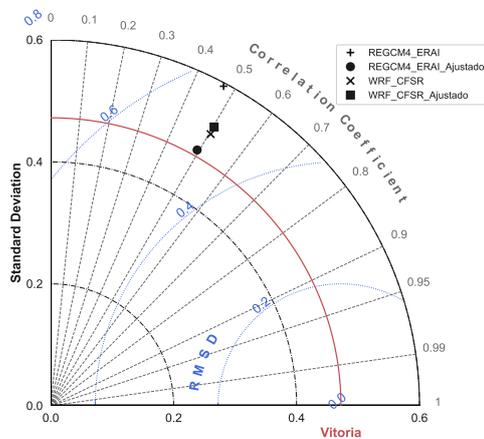
Os índices estatísticos apresentados no diagrama de Taylor (b) mostram que a variabilidade (representada pelo desvio padrão) no WW3-RegCM4/ERA-Interim sem ajuste apresentou um valor de 0,59, muito longe dos dados, enquanto o WW3-RegCM4/ERA-Interim com vento ajustado apresentou um valor de 0,48, bem próximo ao observado que foi de 0,47 m. Em termos de correlação houve também uma melhora do WW3-RegCM4/ERA-Interim (sem ajuste) para o WW3-RegCM4/ERA-Interim (com ajuste) de 0,47 para 0,49. Já para o WW3-WRF/CFSR o índice de correlação obtido foi de 0,5 para ambas as simulações com e sem vento ajustado. O erro quadrático médio foi reduzido de 0,56 m para 0,48 m nos experimentos WW3-RegCM4/ERA-Interim sem e com ajuste no campo de vento respectivamente. E para o WW3-WRF/CFSR houve um aumento de 0,49 m para 0,50 m.

O comportamento das distribuições apresentados pelas PDFs (c) e pelo Q-Q plot (d) indicam que o experimento WW3-WRF/CFSR apresentou valores bem similares para todos os quantis, sendo que o efeito do ajuste no campo de vento foi perceptível nos quantis extremos onde os valores de  $H_s$  acabaram ficando superestimados com o ajuste. No WW3-RegCM4/ERA-Interim sem o ajuste, o viés positivo indicava uma superestimativa em praticamente todos os quantis enquanto que a série de ondas obtida com o vento ajustado ficou com valores muito próximos aos observados em todos os quantis.

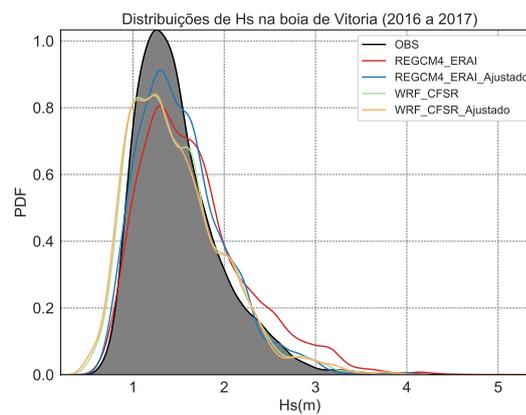


(a)

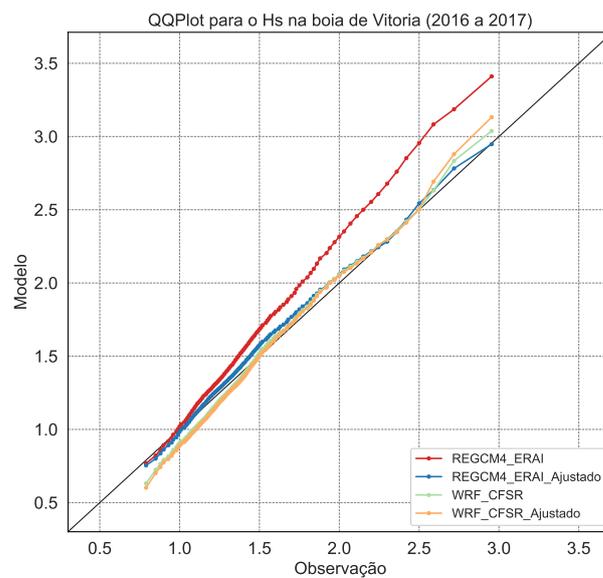
1,0



(b)



(c)



(d)

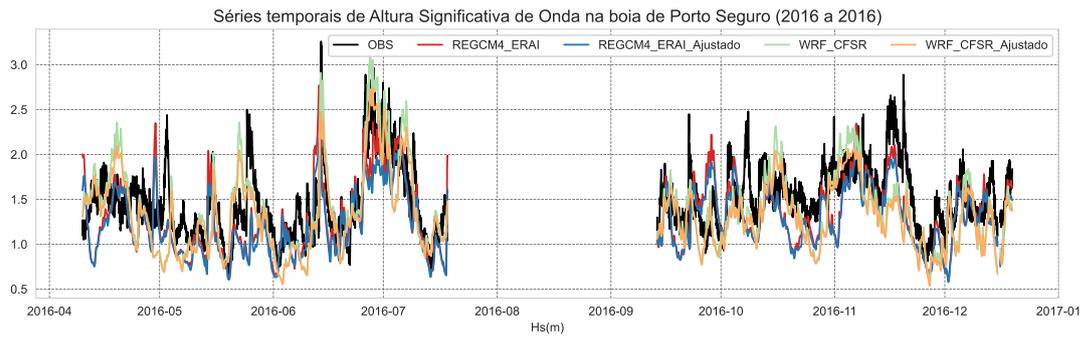
Figura 3.10: Séries temporais (a), diagrama de Taylor (b), função de distribuição de probabilidade (PDF) (c) e Q-Q plot dos dados de altura significativa de onda na boia de Vitória (PNBOIA) comparado com os experimentos WW3-RegCM4/ERA1, WW3-RegCM4/ERA1 Ajustado, WW3-WRF/CFSR, WW3-WRF/CFSR Ajustado

### 3.2.8 Boia de Porto Seguro - PNBOIA

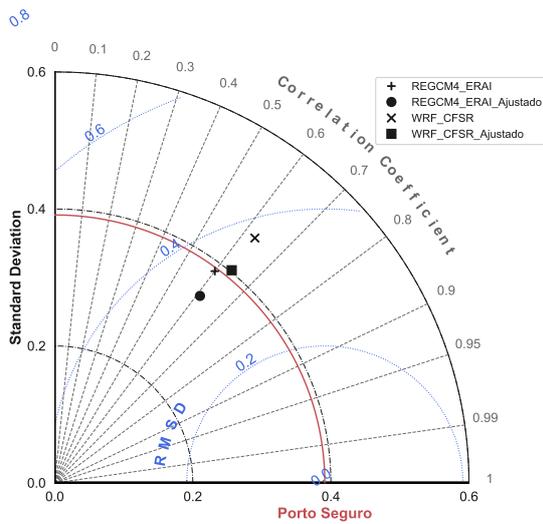
A série temporal dos dados de altura significativa de ondas obtidos pela boia de Porto Seguro é apresentado na Figura 3.11, onde dois conjuntos de dados entre abril e dezembro de 2016 com 4694 registros horários qualificados são exibidos.

O diagrama de Taylor (b) indica que o efeito do ajuste de vento nas séries simuladas de onda reduziu o desvio padrão em relação as simulações sem o ajuste do vento com valores de 0,39 m para 0,34 m no WW3-RegCM4/ERA-Interim e de 0,46 m para 0,40 m no WW3-WRF/CFSR. O erro quadrático foi de 0,35 m para 0,33 m no WW3-RegCM4/ERA-Interim e de 0,37 m para 0,34 m nos experimentos WW3-WRF/CFSR sem e com ajuste de vento. Em termos de correlação os índices tiveram um ligeiro aumento de 0,60 para 0,61 e 0,63 para 0,64 nas simulações do WW3-RegCM4/ERA-Interim e WW3-WRF/CFSR sem e com vento ajustado respectivamente.

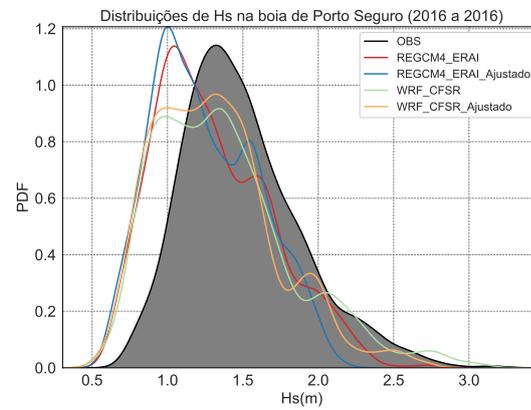
A análise das distribuições através das PDFs (c) e Q-Q plot (d) evidencia um viés negativo no WW3-RegCM4/ERA-Interim que é agravado no experimento com o vento ajustado em todos os quantis. No experimento WW3-WRF/CFSR, é observada uma subestimativa (viés negativo) até o limite do quantil com valores de 2,0 m. A partir deste ponto os dados de onda simulados passam a ter valores muito parecidos com os registrados pela boia. Entretanto, quando o ajuste de vento é aplicado o WW3-WRF/CFSR passa a apresentar uma subestimativa em todos os quantis.



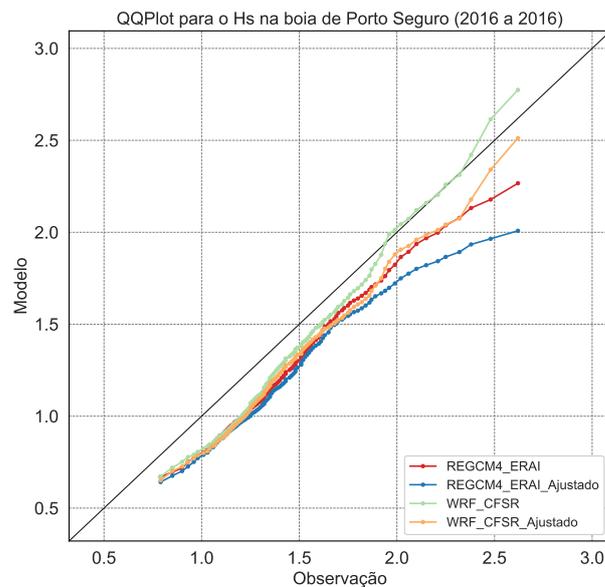
(a)



(b)



(c)



(d)

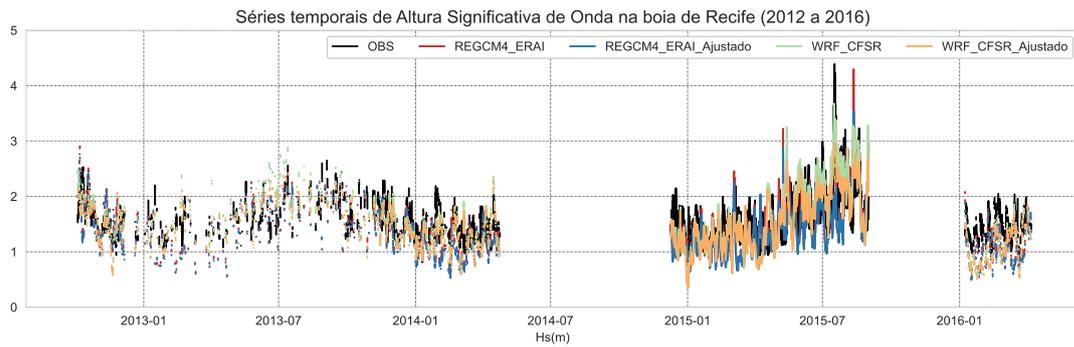
Figura 3.11: Séries temporais (a), diagrama de Taylor (b), função de distribuição de probabilidade (PDF) (c) e Q-Q plot dos dados de altura significativa de onda na boia de Porto Seguro (PNBOIA) comparado com os experimentos WW3-RegCM4/ERA-Interim, WW3-RegCM4/ERA-Interim Ajustado, WW3-WRF/CFR, WW3-WRF/CFR Ajustado

### 3.2.9 Boia de Recife - PNBOIA

A boia de Recife apresentou 10521 registros horários qualificados divididos em 3 conjuntos de dados entre dezembro de 2012 e junho de 2016. Destes, o primeiro período apresentou muitos dados espúrios que foram rejeitados pela rotina de controle de qualidade.

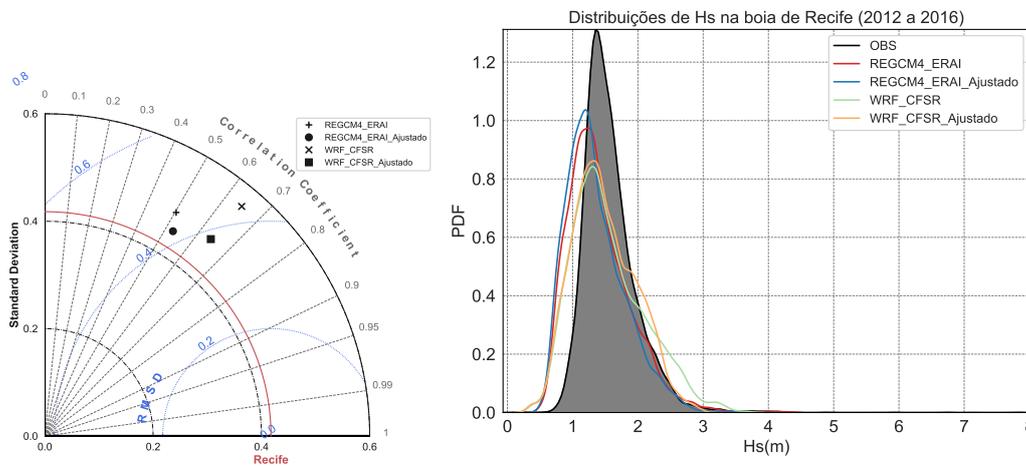
As séries de altura significativa de ondas são apresentadas na Figura 3.12 onde é possível notar que os dados estão em sua maior parte distribuídos entre 1,0 e 3,0 m. A análise do diagrama de Taylor (b) indica que em termos de índices estatísticos as simulações com WW3-WRF/CFSR apresentaram melhor desempenho obtendo correlações de 0,65 (0,64) nas simulações sem aplicação do ajuste no campo de vento (com ajuste) enquanto as simulações com WW3-RegCM4/ERA-Interim obtiveram 0,50 (0,53) nas simulações sem ajuste (com ajuste). Em termos do erro quadrático os valores foram de 0,43 m (0,38 m) no WW3-WRF/CFSR sem ajuste (com ajuste) e de 0,45 m (0,42 m) no WW3-RegCM4/ERA-Interim sem ajuste (com ajuste).

O Q-Q plot (d) e as PDFs (c) exibem o comportamento das distribuições das séries de  $H_s$  dos experimentos em relação aos dados registrados na boia. No experimento WW3-WRF/CFSR a correção no vento proporciona uma redução nesse viés, porém a redução se transforma em uma subestimativa nos quantis extremos, quando os valores de  $H_s$  se aproximam de 3,0 m. No WW3-RegCM4/ERA-Interim é possível identificar um viés negativo nos quantis inferiores (até 2,0 m). O efeito da correção do vento reduz ainda mais os valores de  $H_s$  deixando a série com viés negativo em todos os quantis.



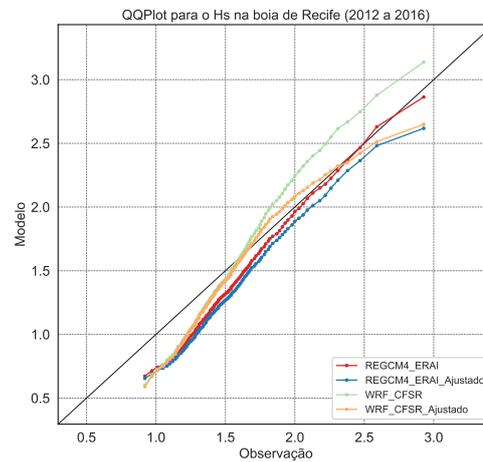
(a)

1.0



(b)

(c)



(d)

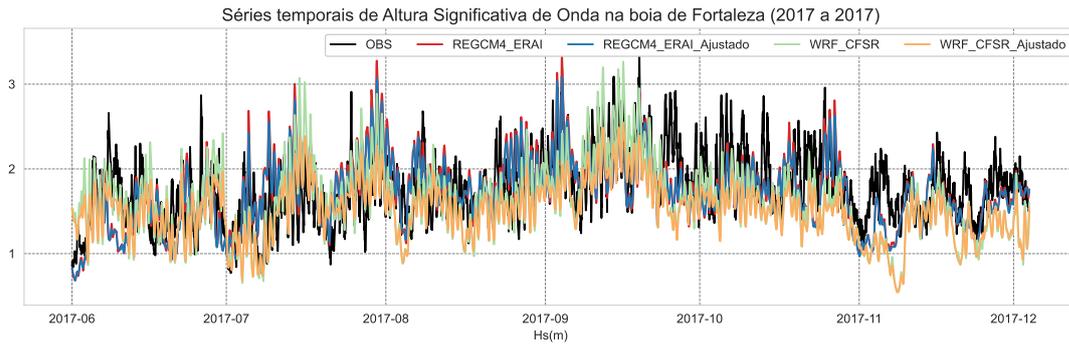
Figura 3.12: Séries temporais (a), diagrama de Taylor (b), função de distribuição de probabilidade (PDF) (c) e Q-Q plot dos dados de altura significativa de onda na boia de Recife (PNBOIA) comparado com os experimentos WW3-RegCM4/ERA1, WW3-RegCM4/ERA1 Ajustado, WW3-WRF/CFSR, WW3-WRF/CFSR Ajustado

### 3.2.10 Boia de Fortaleza - PNBOIA

A Figura 3.13 (a) exibe a série temporal de altura significativa do mar no período de junho a dezembro de 2017, onde 4466 registros horários foram qualificados e apresentados em conjunto com as séries obtidas pelos experimentos WW3-RegCM4/ERA-Interim e WW3-WRF/CFSR com e sem a aplicação de correção de viés via ajuste linear nos campos de vento.

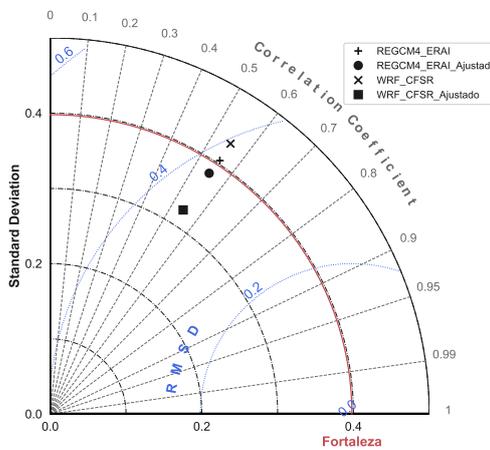
Os índices estatísticos ilustrados no diagrama de Taylor (b) mostram pouca diferença entre os experimentos com e sem ajuste no campo de vento, com exceção do desvio padrão que foi reduzido. A correlação foi de 0,55 (0,55) no experimento WW3-RegCM4/ERA-Interim sem ajuste (com ajuste) e de 0,55 (0,54) no experimento WW3-WRF/CFSR. Já o erro quadrático médio foi de 0,38 m (0,37 m) no WW3-RegCM4/ERA-Interim e 0,39 m (0,35 m) no experimento WW3-WRF/CFSR sem e com ajuste respectivamente.

A análise do Q-Q plots (d) e das PDFs (c) indicou que o WW3-RegCM4/ERA-Interim obteve uma boa concordância em todos os percentis, entretanto o ajuste no vento acarretou em um aumento do viés negativo nos quantis superiores. O WW3-WRF/CFSR sem ajuste subestimou toda distribuição com exceção dos dois últimos quantis e os resultados das simulações de onda com a aplicação do ajuste linear nos campos de vento teve um efeito de redução geral nos valores de  $H_s$  simulados levando a um aumento do viés negativo nos quantis superiores.

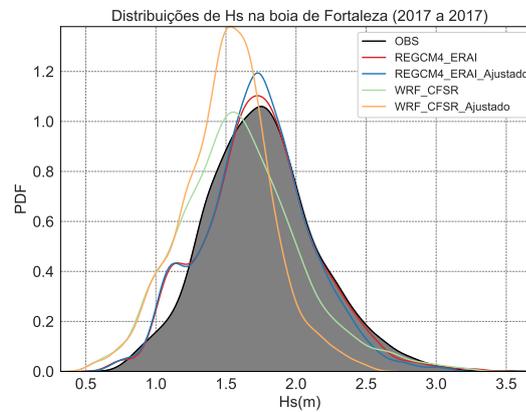


(a)

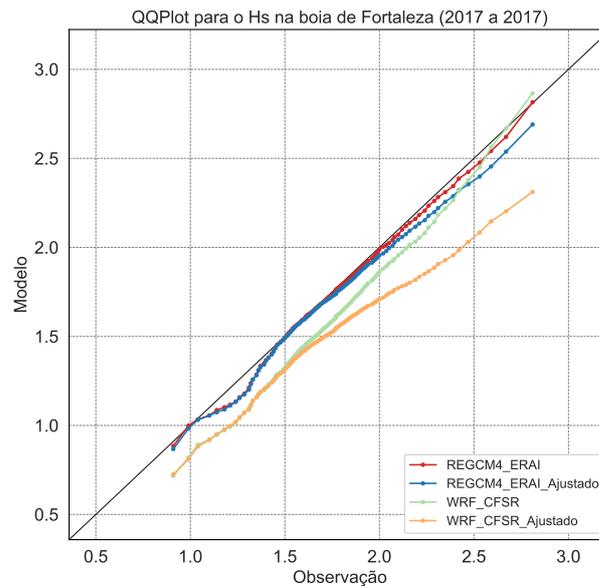
0.8



(b)



(c)



(d)

Figura 3.13: Séries temporais (a), diagrama de Taylor (b), função de distribuição de probabilidade (PDF) (c) e *Q-Q plot* dos dados de altura significativa de onda na boia de Fortaleza (PNBOIA) comparado com os experimentos WW3-RegCM4/ERA1, WW3-RegCM4/ERA1 Ajustado, WW3-WRF/CFSR, WW3-WRF/CFSR Ajustado

De maneira geral, tanto as avaliações espaciais utilizando as reanálises do WEVERYS quanto as comparações com os dados medidos em boias mete-oceanográficas mostraram que a aplicação da correção de viés através do ajuste linear nos campos de vento reduziu tanto vieses de subestimativa predominantes nas simulações de onda com forçante do WRF/CFSR quanto de superestimativa predominantes nos resultados do RegCM4/ERA-Interim. Esta redução no viés foi mais evidenciado nos quantis superiores, o que era esperado e desejado uma vez que o método de ajuste linear foi aplicado apenas para os registros de vento acima do percentil de 80%.

As comparações com as séries das boias exibiram valores em torno de 0,5, o que a primeira vista pode ser considerado um valor baixo. Entretanto, há de se ponderar que as regionalizações climáticas são desenvolvidas para reproduzir aspectos médio e extremos do clima, ou seja, estes experimentos não tem o compromisso em reproduzir de modo "datado" cada sistema transiente (frentes, ciclones) e sim reproduzi-los em termos de frequência, intensidade e duração médias a longo prazo.

Desta forma as comparações através de distribuições e *Q-Q plot* foram mais eficientes em mostrar que a correção de viés através do ajuste linear dos ventos reduziu os vieses principalmente nas bacias sedimentares do Sul e Sudeste do Brasil.



## Resultados

Os resultados da seção anterior mostraram as vantagens da aplicação da correção de viés através do ajuste linear dos campos de ventos na simulação dos campos de ondas com o modelo WW3. O resultados foram significativos especialmente nos valores extremos, onde haviam vieses maiores nas simulações com os ventos originados diretamente pelas regionalizações.

Assumindo que esses vieses são inerentes da regionalização, os coeficientes do ajuste linear obtidos por cada um dos modelos regionais RegCM4 e WRF foram aplicados aos resultados nas regionalizações com o RegCM4/HadGEM2-ES, RegCM4/MPI-ESM-MR, WRF/HadGEM2-ES e WRF/MPI-ESM-MR.

Portanto, as simulações com modelos climáticos analisadas nas próximas seções são resultados de simulações do campo de ondas forçadas através das regionalizações com a correção de viés nos campos de vento. O período total de simulação climática de 1979 a 2060, foi dividido em 3 cenários, sendo eles: 1979 a 2005, período histórico onde nenhuma forçante radiativa foi aplicada; futuro próximo de 2006 a 2030 e futuro distante de 2031 a 2060, onde a forçante radiativa RCP8.5 (1313 ppm de CO<sub>2</sub> e um aumento de 8,5 W/m<sup>2</sup>) que equivale a dizer que temperatura do ar próximo à superfície média global poderá sofrer aumento até o final do século XXI que ultrapasse 2,0°C.

### *4.1 Análise dos Campos Médios*

A Figura 4.1 traz as diferenças entre os campos médios de altura significativa de ondas entre o futuro próximo (a) e o futuro distante (b) em relação ao período histórico. Os mapas são apresentados em forma de diferença onde as áreas em azul indicam redução e

as áreas em vermelho indicam aumento nos valores médios dos campos de onda simulados.

Nos cenários de futuro próximo - NF (a) pode-se observar que em todos os experimentos há um aumento na média das ondas de até 0,20 m na região ao sul de 50°S. Do Sul da Argentina até a costa da região Sudeste do Brasil (até 20°S) as simulações WW3-RegCM4/HadGEM2-ES indicam uma redução no campo médio das ondas de -0,20 m na média das ondas enquanto nas simulações com WW3-RegCM4/MPI-ESM-MR esta redução restringiu-se a uma região menor entre 20°S e 30°S. Por outro lado, as simulações forçadas com as regionalizações do WRF mostraram uma situação inversa onde há um aumento no campo médio de ondas costa sul e sudeste do Brasil, sendo mais evidenciado no WW3-WRF/MPI-ESM-MR onde os valores indicam um aumento médio de 0,3 m em uma faixa que se estendo do limite da grade em 60°S até 30°S.

Para o período de 2031 a 2060 (futuro distante), no experimento WW3-RegCM4/HadGEM2-ES é observada uma redução de até -0,3 m em praticamente todo domínio ao sul de 20°S e ao norte de 0°. Já as simulações com WW3-RegCM4/MPI-ESM-MR evidenciam uma região de aumento de até 0,3 m entre 40°S e 60°S e uma região de redução entre 40°S e 20°S. Uma faixa de aumento na costa da região Nordeste (entre 0° e 10°S) também fica mais evidenciada nesse experimento. Nos experimentos com as forçantes provenientes das regionalizações com WRF é possível identificar uma área de aumento nas proximidades do limite sul da grade, uma faixa de redução do campo médio das ondas entre 40° e 50°S e ao norte de 20°S, e uma região de aumento de até 0,2 m entre o litoral da região Sul até o Rio de Janeiro (30°S a 20°S).

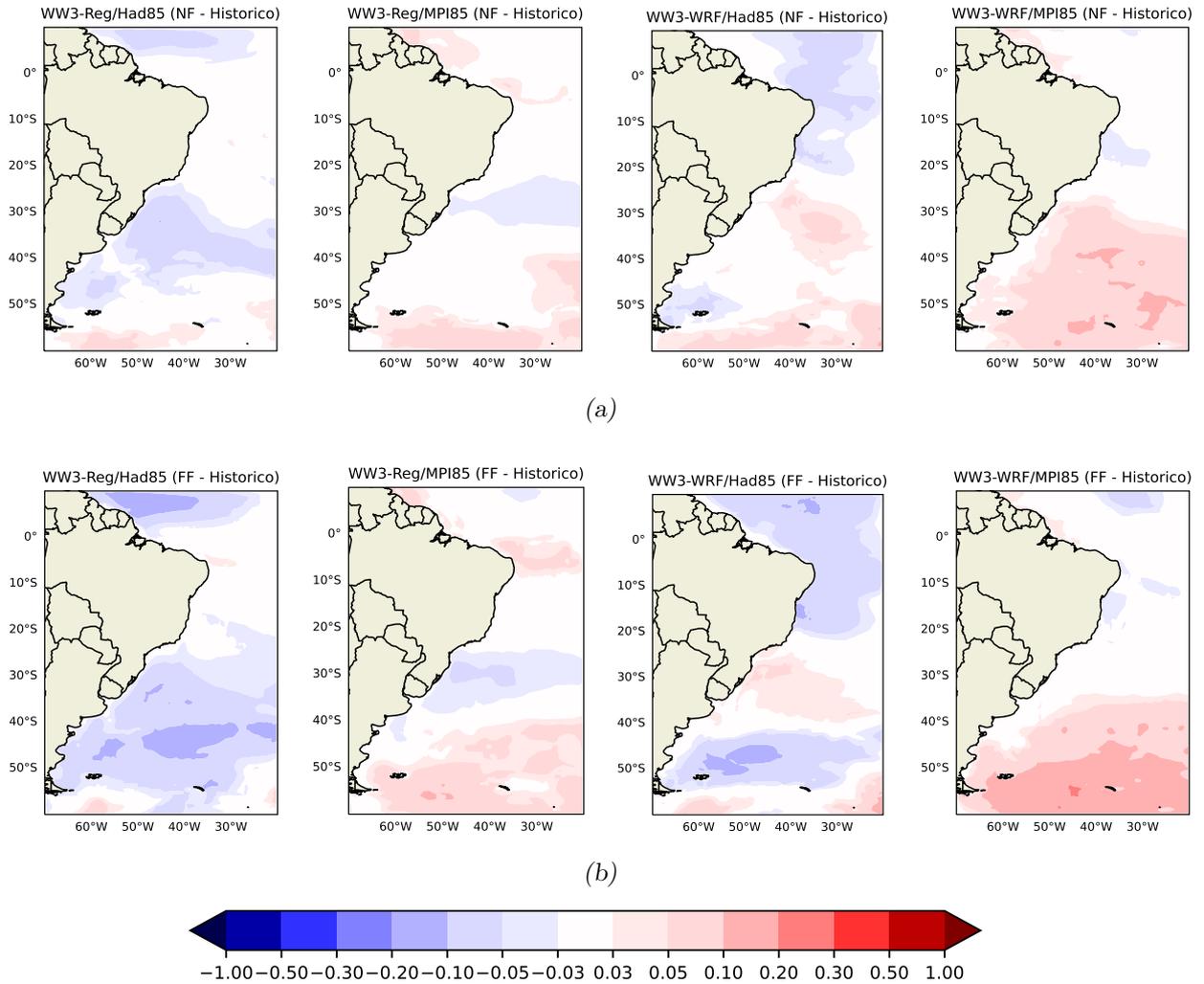


Figura 4.1: Mapas de diferença entre o campo médio da Altura Significativa de Onda (metros) entre o futuro próximo de 2006 a 2030 NF (a), futuro distante de 2031 a 2060 - FF (b) e o período histórico de 1979 a 2005.

No intuito de realizar análises pontuais ao longo da costa brasileira, foram extraídas séries temporais ao longo da costa brasileira, nas posições dos centroides das bacias sedimentares (Figura 3.3) de modo que pudesse trazer uma representatividade mais local aos resultados dos experimentos.

Na Tabela 4.1 são apresentados os valores médios da altura significativa de ondas obtidos para cada uma das 16 bacias sedimentares do Brasil. Nas colunas dos experimentos são apresentados os valores médios nas colunas Hist (1979 a 2005) e a diferença obtida nos períodos de futuro próximo - NF (2006 a 2030) e futuro distante - FF (2031 a 2060). Os valores negativos (positivos) indicando uma redução (aumento) são marcados com a cor azul (vermelho) para facilitar a identificação dos sinais.

Para as bacias do Sul e Sudeste os experimentos com forçantes do RegCM4 apontaram uma redução nas médias do Hs com valores de até -0,08 m na bacia de Pelotas. Para as demais bacias foi verificado valores mais baixos e por vezes nulos nas bacias do leste do nordeste e apresentou uma redução (aumento) nos experimentos WW3-RegCM4/HadGEM2-ES (WW3-RegCM4/MPI-ESM-MR) para bacias no norte do nordeste e região norte do Brasil e não houve diferença significativa entre nos sinais entre os períodos de futuro próximo e futuro distante.

Nas experimento WW3-WRF/HadGEM2-ES para o futuro próximo (NF) verificou-se um aumento na média na bacia de Campos e uma redução nas demais bacias cujo maior valor foi verificado foi de -0,08 m na bacia Potiguar. Para o futuro distante (FF) as bacias de Pelotas, Santos e Campos apresentaram um aumento no valor médio do Hs e uma redução de até -0,11 m nas demais bacias.

As simulações com WW3-WRF/MPI-ESM-MR para o futuro próximo (NF) apresentaram um aumento nas bacias de Pelotas, Santos e Campos e nas bacias do norte da região nordeste e região norte. Nas demais bacias foram verificadas reduções na média das ondas. No futuro distante, novamente as bacias do norte da região nordeste e região norte juntamente com a bacia de Pelotas apresentaram aumento enquanto que as demais bacias foram registradas reduções nos valores médios de altura significativa de ondas.

Tabela 4.1 - Média do Hs (m) obtida pelas projeções climáticas para as bacias sedimentares.

Bacias	RegCM4-Had			RegCM4-MPI			WRF-Had			WRF-MPI		
	Hist	NF	FF	Hist	NF	FF	Hist	NF	FF	Hist	NF	FF
Foz Do Amazonas	1.70	-0.02	-0.07	1.33	0.04	0.03	1.30	-0.01	-0.05	1.15	0.05	0.05
Para-maranhao	1.52	-0.02	-0.03	1.28	0.03	0.03	1.20	0.00	-0.02	1.10	0.02	0.02
Barreirinhas	1.55	-0.01	0.00	1.38	0.02	0.02	1.31	-0.03	-0.05	1.19	0.03	0.02
Do Ceara	1.51	-0.02	0.00	1.37	0.04	0.04	1.37	-0.07	-0.07	1.19	0.02	0.01
Potiguar	1.40	-0.01	0.02	1.28	0.05	0.07	1.48	-0.08	-0.09	1.23	0.00	-0.02
Pernambuco-paraiba	1.58	0.01	0.02	1.52	0.01	0.04	1.70	-0.04	-0.07	1.53	-0.03	-0.03
Sergipe-alagoas	1.59	0.01	0.00	1.56	0.00	0.03	1.70	-0.03	-0.07	1.60	-0.03	-0.03
Jacuipe	1.47	0.00	-0.01	1.42	0.00	0.02	1.57	-0.03	-0.08	1.51	-0.03	-0.03
Camamu-almada	1.50	0.00	-0.01	1.51	-0.01	0.01	1.58	-0.03	-0.09	1.55	-0.03	-0.04
Jequitinhonha	1.50	0.00	-0.02	1.55	-0.01	0.01	1.57	-0.05	-0.11	1.56	-0.04	-0.04
Cumuruxatiba	1.56	0.00	-0.02	1.65	-0.01	0.00	1.57	-0.06	-0.11	1.58	-0.04	-0.04
Mucuri	1.70	-0.01	-0.03	1.84	-0.01	0.00	1.62	-0.04	-0.07	1.67	-0.03	-0.03
Espirito Santo	1.93	-0.01	-0.02	2.08	-0.02	-0.01	1.74	-0.01	-0.03	1.81	-0.02	-0.02
Campos	2.12	-0.02	-0.03	2.22	-0.01	-0.01	1.84	0.02	0.01	1.90	0.01	-0.02
Santos	2.12	-0.04	-0.03	2.18	-0.02	-0.03	1.91	0.00	0.03	1.90	0.01	-0.01
Pelotas	2.48	-0.08	-0.08	2.55	-0.03	-0.06	2.26	-0.02	0.03	2.25	0.04	0.02

Considerando o percentil 95 (P95) das séries horárias das simulações como valor extremo, foram gerados mapas com a distribuição espacial desses valores calculados para cada ponto de grade. A Figura 4.2 apresenta os campos de diferença do P95 obtido entre os cenários de futuro próximo (NF - 2006 a 2031) (a), futuro distante (FF - 2031 a 2060) (b) e o período histórico (1979 a 2005).

O resultados tanto para o futuro próximo quanto futuro distante no experimento WW3-RegCM4/HadGEM2-ES são bem similares indicando uma redução de até 0,30 m, em especial sobre a região ciclogênica no oceano ao largo do RS. Uma pequena região de aumento é verificada na costa norte do Brasil, principalmente no futuro distante. No experimento WW3-RegCM4/MPI-ESM-MR a região de redução na altura do RS persiste com mais intensidade no futuro próximo. Por outro lado uma faixa de aumento de até 0,5 m é verificada entre 40°S e 60°S.

O experimento WW3-WRF/HadGEM2-ES indicou aumento no P95 (no NF e FF) em até 0,5 m para toda região ao sul de 20°S exceto para a região no entorno das Ilhas Malvinas no Sul da Argentina que apresentaram um aumento no P95. A norte de 20°S observa-se uma redução no P95 em ambos cenários de futuro próximo e futuro distante.

Uma região de aumento do P95 ainda maior, com valores até 1,0 m entre 50 e 60°S foi verificada ao sul de 20°S

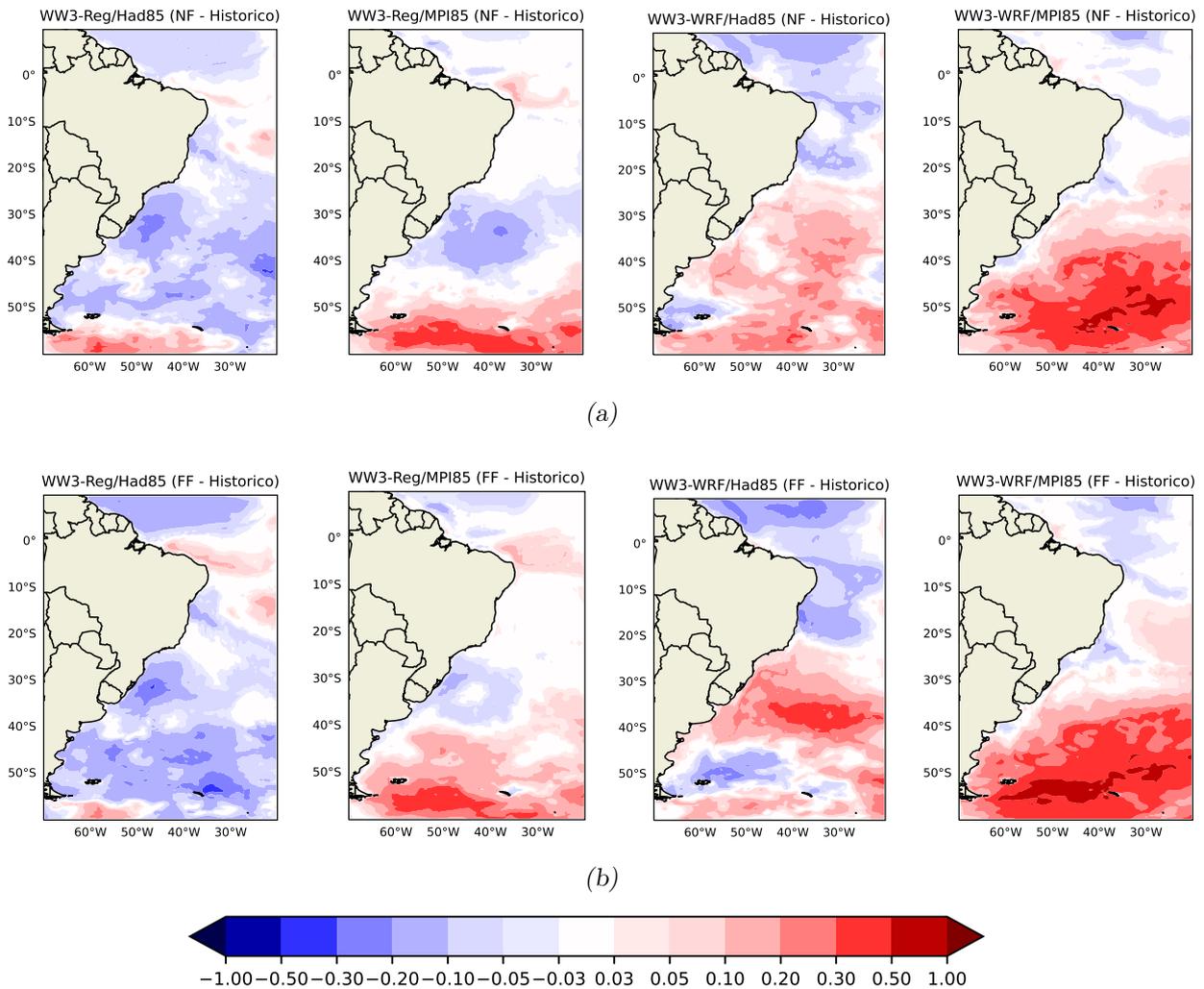


Figura 4.2: Mapas de diferença entre o campo do percentil 95 (P95) da Altura Significativa de Onda (metros) para futuro próximo (a), futuro distante (b) e o período histórico.

Os valores do P95 obtidos para os pontos centroides das bacias sedimentares brasileiras são apresentados na Tabela 4.5. De maneira geral, os experimentos WW3-RegCM4 apresentaram uma redução do P95 nas bacias de Pelotas, Campos e Santos tanto no período de período de futuro próximo e distante. Entre a Baía do Espírito Santo e a Baía de Barreirinhas, houve uma divergência de resultados. Enquanto o WW3-RegCM4/HadGEM-ES indicou um aumento dos extremos somente entre as Bacias de Pernambuco-Paraíba e de Barreirinhas, o experimento WW3-RegCM4/MPI-ESM-MR indicou um aumento no período de futuro próximo nas bacias do Jequitinhonha até a Baía Potiguar e no futuro

distante envolveu mais Bacias, se estendendo da Bacia do Espírito Santo até a Bacia do Ceará. Nas Bacias do norte (Pará-Maranhão e Foz do Amazonas os resultados indicaram uma redução nos valores dos extremos. Já os experimentos com WW3-WRF, entre as bacias do Espírito Santo e Potiguar foi verificada uma redução tanto no futuro próximo quanto no futuro distante. As Bacias de Pelotas, Santos e Campos apresentaram valores pequenos da diferença dos extremos do clima futuro para o período histórico. No futuro próximo do WW3-WRF/HadGEM2-ES a bacia de Pelotas apresentou uma redução de 0,02 m, Santos não houve diferença e um aumento de 0,02 foi indicado para Bacia de Campos. No futuro distante todas as 3 bacias experimentaram aumento no valor dos extremos de altura significativa de onda. No WW3-WRF/MPI-ESM-MR um aumento foi verificado apenas na Bacia de Pelotas em ambos períodos e na Bacia de Santos no futuro distante. A maior redução no extremo de ondas em relação ao período histórico encontrada foi de 0,21 m na Bacia do Jequitinhonha enquanto o maior aumento foi verificado na Bacia de Pelotas de 0,20 m, ambos no período de futuro distante do experimento com WRF/HadGEM2-ES.

Tabela 4.2 - Percentil 95 do Hs (m) obtido pelas projeções climáticas para as bacias sedimentares.

Bacias	RegCM4-Had			RegCM4-MPI			WRF-Had			WRF-MPI		
	Hist	NF	FF	Hist	NF	FF	Hist	NF	FF	Hist	NF	FF
Foz Do Amazonas	2.40	-0.07	-0.16	2.26	-0.01	-0.04	2.21	-0.09	-0.13	1.98	0.08	0.07
Para-maranhao	2.11	-0.07	-0.05	1.95	-0.02	-0.02	1.85	-0.02	-0.03	1.81	-0.01	-0.01
Barreirinhas	2.19	0.02	0.12	2.15	-0.02	-0.01	2.10	-0.02	-0.05	2.11	0.00	-0.01
Do Ceara	2.26	-0.02	0.06	2.20	0.00	0.03	2.24	-0.06	-0.06	2.15	0.04	0.00
Potiguar	2.21	0.02	0.10	2.05	0.10	0.11	2.40	-0.14	-0.15	2.23	0.00	-0.08
Pernambuco-paraiba	2.45	0.01	0.03	2.36	0.02	0.03	2.59	-0.04	-0.09	2.47	-0.08	-0.08
Sergipe-alagoas	2.53	-0.05	-0.04	2.40	0.01	0.02	2.59	-0.02	-0.08	2.42	-0.02	0.00
Jacuipe	2.39	-0.06	-0.07	2.23	0.02	0.02	2.49	-0.04	-0.11	2.28	-0.03	0.00
Camamu-almada	2.44	-0.07	-0.10	2.29	0.01	0.02	2.56	-0.07	-0.15	2.32	-0.04	0.00
Jequitinhonha	2.46	-0.10	-0.12	2.30	0.02	0.01	2.60	-0.12	-0.21	2.34	-0.05	-0.02
Cumuruxatiba	2.50	-0.08	-0.09	2.41	-0.02	0.00	2.61	-0.12	-0.20	2.40	-0.04	-0.04
Mucuri	2.65	-0.03	-0.03	2.68	-0.01	0.01	2.70	-0.09	-0.15	2.59	-0.03	-0.05
Espirito Santo	3.00	-0.02	-0.03	3.08	-0.02	0.03	2.84	0.02	0.00	2.88	-0.02	-0.02
Campos	3.21	-0.02	-0.03	3.36	-0.01	-0.01	2.93	0.04	0.06	3.10	-0.05	-0.08
Santos	3.40	-0.11	-0.09	3.40	-0.03	-0.03	3.03	-0.01	0.08	3.04	0.00	0.04
Pelotas	4.43	-0.18	-0.23	4.40	-0.07	-0.14	3.89	0.03	0.20	3.95	0.02	0.05

Os campos de diferença entre os períodos de clima futuro próximo, futuro distante e o período histórico do período de pico das ondas são apresentados na Figura 4.3. O período

de pico das ondas (medido em segundos) é definido como o período associado às ondas mais energéticas no espectro total de ondas, de modo que regimes de ondas dominados por vagas (*wind sea*) tendem a ter períodos de pico menores, enquanto regimes dominados por marulhos (*swell*) tendem a ter períodos de pico maiores. Este parâmetro fornece informações importantes sobre a energia, frequência e comportamento das ondas. Os campos de diferença do experimento WW3-RegCM4/HadGEM2-ES indicaram uma redução no período de pico médio das ondas ao longo de toda costa leste da América do Sul em ambos períodos de futuro próximo e futuro distante. Já nos resultados do experimento WW3-RegCM4/MPI-ESM-MR foi verificada uma redução de menor intensidade com exceção para costa norte do Brasil que apresentou aumento especialmente no futuro próximo. Nos experimentos com o WW3-WRF uma redução do período de pico foi identificada na costa norte do Brasil, especialmente nos experimentos forçados com HadGEM2-ES. Nas demais regiões houve aumento no período de pico médio, com valores mais altos (acima de 0,50s) na região equatorial ao largo do Nordeste Brasileiro entre 10°S e 10°N.

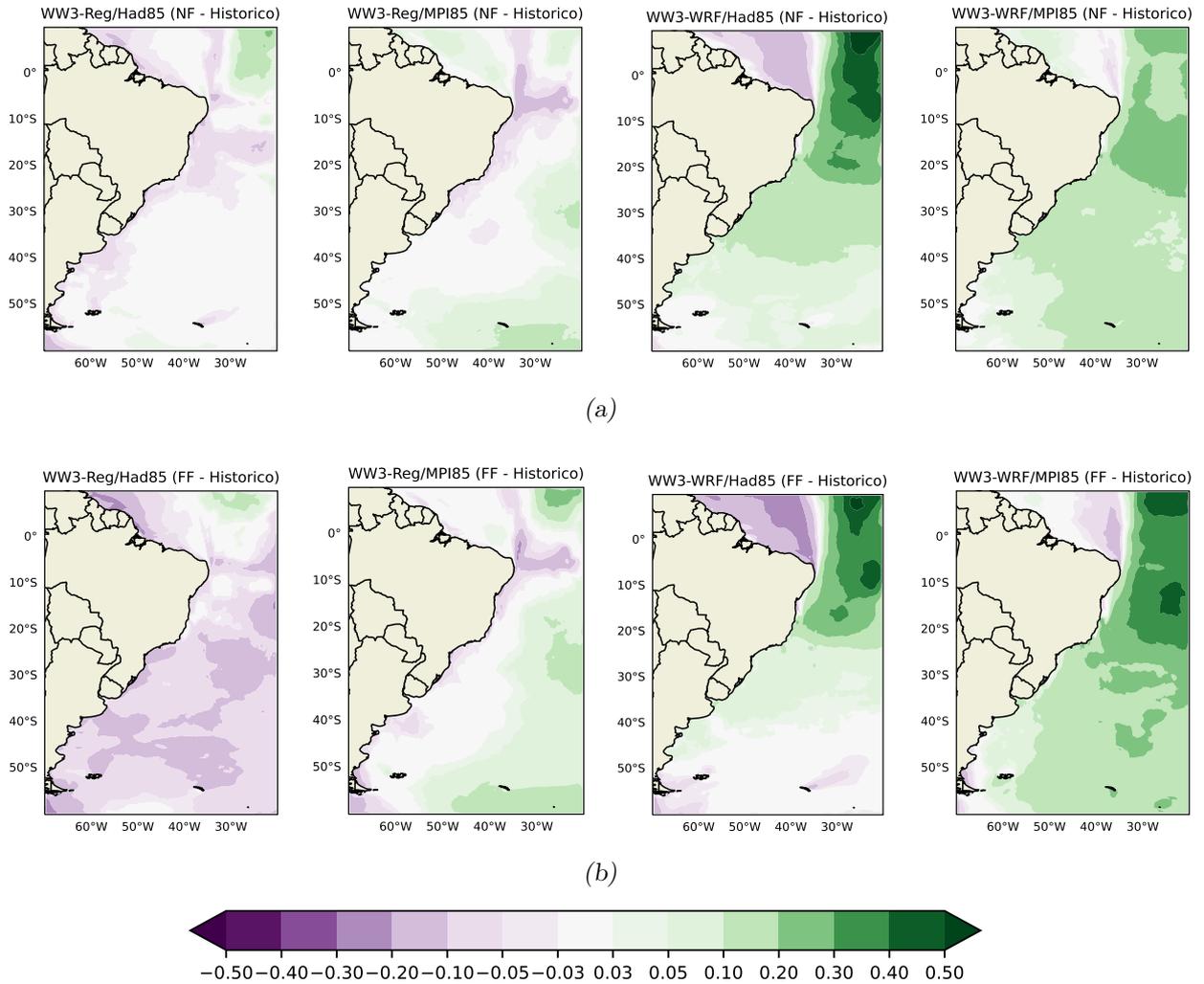


Figura 4.3: Mapas de diferença entre o campo médio do Período de Pico (s) para futuro próximo (a), futuro distante (b) e o período histórico.

A Tabela 4.3 apresenta os valores médios do período de pico das ondas no período histórico e a diferença entre os períodos de futuro próximo e futuro distante, onde os valores positivos indicam aumento e os valores negativos indicam redução. Os resultados obtidos são bastante distintos entre os experimentos forçados com ventos do downscaling do WW3 e do RegCM4. Enquanto os experimentos WW3-RegCM4 apresentam redução no período de pico das ondas em praticamente todas as bacias de Pelotas até Pernambuco-Paraíba, os experimentos com WW3-WRF indicam um aumento nessas mesmas bacias para ambos os períodos de futuro próximo e futuro distante. Nas bacias da costa norte do Brasil os experimentos forçados com modelo global HadGEM2-ES indicam uma redução enquanto os modelos forçados com o modelo global MPI-ESM-MR indicam em geral aumento no

período de pico futuro próximo e redução no futuro distante com valores bem mais baixos do que os obtidos nos experimentos forçados com HadGEM2-ES.

Tabela 4.3 - Período de pico médio das ondas (em segundos) nas bacias sedimentares brasileiras

Bacias	RegCM4-Had			RegCM4-MPI			WRF-Had			WRF-MPI		
	Hist	NF	FF	Hist	NF	FF	Hist	NF	FF	Hist	NF	FF
Foz Do Amazonas	7.57	-0.06	-0.13	7.38	0.02	-0.02	7.09	-0.03	-0.11	6.94	0.05	0.01
Para-maranhao	7.28	-0.05	-0.07	7.09	0.01	-0.02	6.93	-0.10	-0.17	6.59	0.05	0.00
Barreirinhas	7.21	-0.06	-0.07	7.04	0.02	-0.01	6.89	-0.12	-0.17	6.52	0.03	-0.02
Do Ceara	7.21	-0.02	-0.04	6.99	0.05	0.03	7.10	-0.13	-0.20	6.62	0.00	-0.07
Potiguar	7.19	0.04	0.00	7.02	0.02	0.02	7.40	-0.12	-0.20	7.24	-0.08	-0.14
Pernambuco-paraiba	9.59	-0.07	-0.09	10.04	-0.14	-0.11	8.58	0.19	0.19	8.96	0.17	0.19
Sergipe-alagoas	9.66	-0.09	-0.07	10.02	-0.09	-0.06	8.59	0.17	0.16	8.78	0.16	0.17
Jacuipe	8.90	-0.08	-0.05	9.39	-0.10	-0.09	8.11	0.10	0.08	8.25	0.11	0.06
Camamu-almada	9.07	-0.06	-0.02	9.41	-0.09	-0.08	8.25	0.11	0.12	8.32	0.13	0.08
Jequitinhonha	9.05	-0.06	0.00	9.30	-0.09	-0.09	8.24	0.12	0.15	8.28	0.12	0.07
Cumuruxatiba	9.36	-0.06	0.01	9.53	-0.08	-0.07	8.52	0.15	0.21	8.52	0.15	0.11
Mucuri	10.10	-0.08	-0.06	10.15	-0.05	-0.02	9.30	0.18	0.21	9.18	0.19	0.21
Espirito Santo	10.30	-0.05	-0.06	10.41	-0.05	-0.01	9.66	0.14	0.15	9.51	0.18	0.25
Campos	9.90	-0.04	-0.07	10.11	-0.04	-0.02	9.37	0.08	0.06	9.28	0.14	0.19
Santos	9.89	-0.06	-0.11	10.07	-0.06	-0.04	9.15	0.12	0.06	9.11	0.16	0.16
Pelotas	9.58	-0.03	-0.11	9.63	-0.01	-0.04	8.95	0.11	0.06	8.82	0.16	0.12

O conjunto total de mapas de diferenças por estação (DJF, MAM, JJA e SON) encontra-se no Apêndice A

## 4.2 Análise de Tendências

As tendências das projeções climáticas de ondas foram calculadas, através das séries temporais dos valores mensais, para cada ponto de grade utilizando o método Sen's Slope (Sen (1968)) e o teste de Mann-Kendall (Mann (1945), Kendall (1975)) considerando a significância estatística de 95%. Os métodos foram aplicados utilizando a implementação em linguagem *python* de Hussain e Mahmud (2019) e são descritos em mais detalhes na Seção 2.7.1.

Os resultados das projeções são apresentados para as médias anuais de altura significativa de onda na forma de mapas espaciais na Figura 4.1 divididos em 3 períodos: clima presente (a) de 1979 a 2005, futuro próximo (b) de 2006 a 2030 e futuro distante (c) de

2031 a 2060, onde os valores de tendência em metros/década são apresentados nos contornos coloridos e as áreas hachuradas indicam as áreas onde o sinal da tendência obteve significância estatística além do nível estabelecido.

Os resultados das tendências para o período histórico indicaram que todos os experimentos simulados apresentaram tendências significativas de aumento no Hs na região mais ao sul do domínio simulado. Nos período de futuro próximo, os experimentos WW3-RegCM4/HadGEM2-ES e WW3-WRF/HadGEM2-ES apresentaram uma tendência significativa de redução no Hs na costa norte do Brasil enquanto os modelos WW3-RegCM4/MPI-ESM-MR e WW3-WRF/MPI-ESP-MR apresentaram uma tendência oposta, indicando aumento do Hs médio na mesma região. Na costa leste do sul da América do Sul áreas de aumento significativo foram detectadas nos experimentos WW3-RegCM4/HadGEM2-ES e WW3-WRF/HadGEM2-ES e uma pequena área com sinal de aumento significativo junto a costa sul-sudeste do Brasil é verificada nos experimentos WW3-RegCM4/MPI-ESM-MR e WW3-WRF/MPI-ESP-MR.

Os mapas de tendência dos extremos de onda são representados pela distribuição espacial das tendências da séries contendo os valores mensais do percentis 95 da altura significativa de onda (Figura4.5). No período histórico (a) há um predomínio de uma tendência de aumento na região sul da grade, principalmente nos experimentos WW3-RegCM4/HadGEM2-ES e WW3-WRF/HadGEM2-ES, enquanto na região da costa norte brasileira há predomínio de regiões onde uma redução nos extremos é esperada. Nas projeções pro futuro próximo (b) os mapas indicam uma área de aumento significativo do sul da Argentina a costa sudeste do Brasil nos cenários WW3-RegCM4/HadGEM2-ES, WW3-RegCM4/MPI-ESM-MR e WW3-WRF/MPI-ESM-MR enquanto o experimento WW3-WRF/HadGEM2-ES apresentou esta região de aumento mais no sul da Argentina e uma área de tendência significativa de redução em torno de 30°S e 30°W. Para região da costa norte os experimentos WW3-RegCM4/HadGEM2-ES e WW3-WRF/HadGEM2-ES indicam redução e os experimentos WW3-RegCM4/MPI-ESM-MR e WW3-WRF/MPI-ESM-MR indicam aumento. Pro período de futuro distante (2031 a 2060) a região de aumento dos extremos de Hs dão lugar a extensas áreas de redução que se estendem de 50°S até 20°S. Na costa norte do Brasil os valores de tendências são menores e apenas no experimento WW3-RegCM4/MPI-ESM-MR há uma tendência de aumento com significância estatística junto a costa.

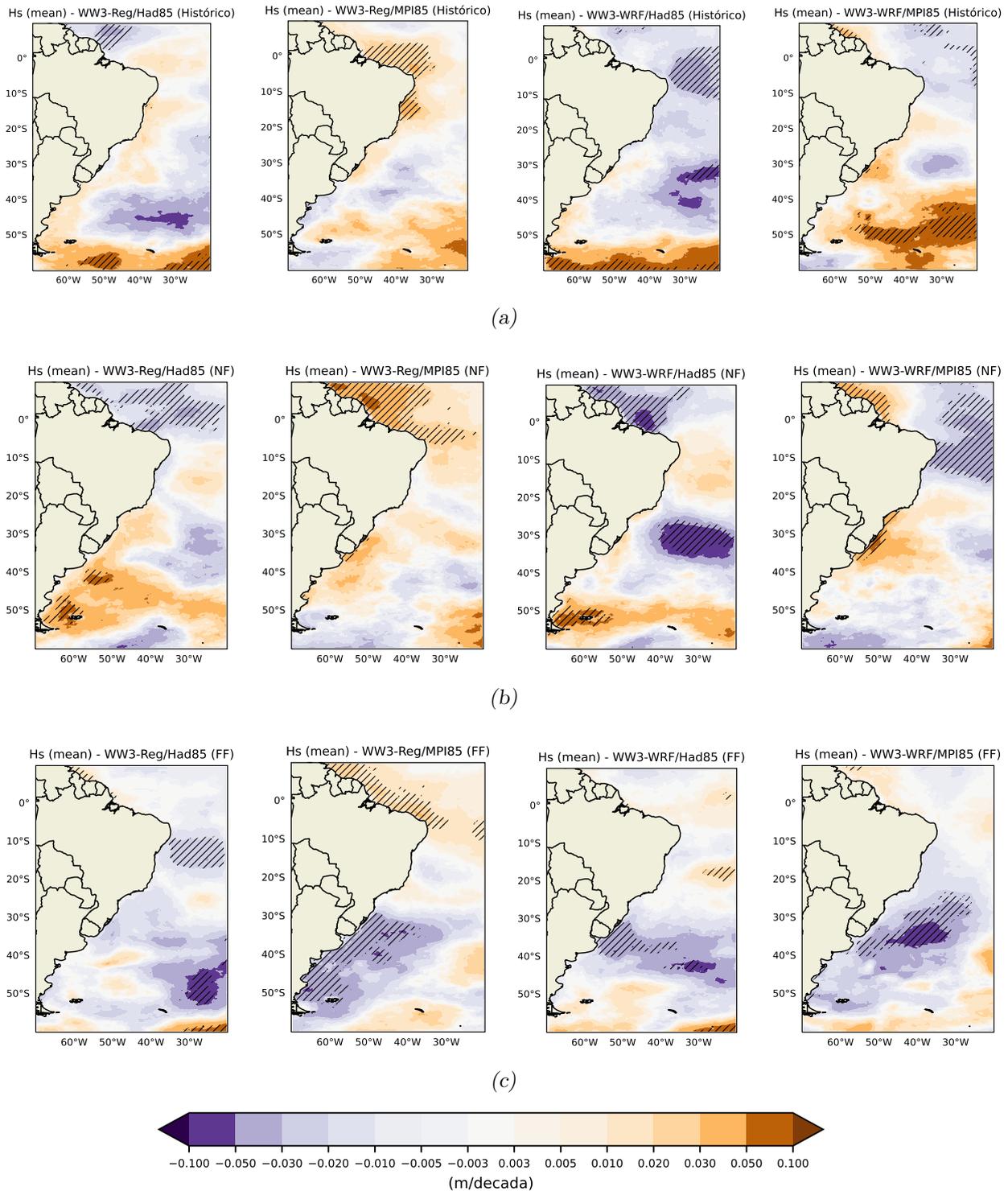


Figura 4.4: Mapas de tendência da média mensal do Hs (m) para os períodos histórico (a), futuro próximo (b) e futuro distante (c).

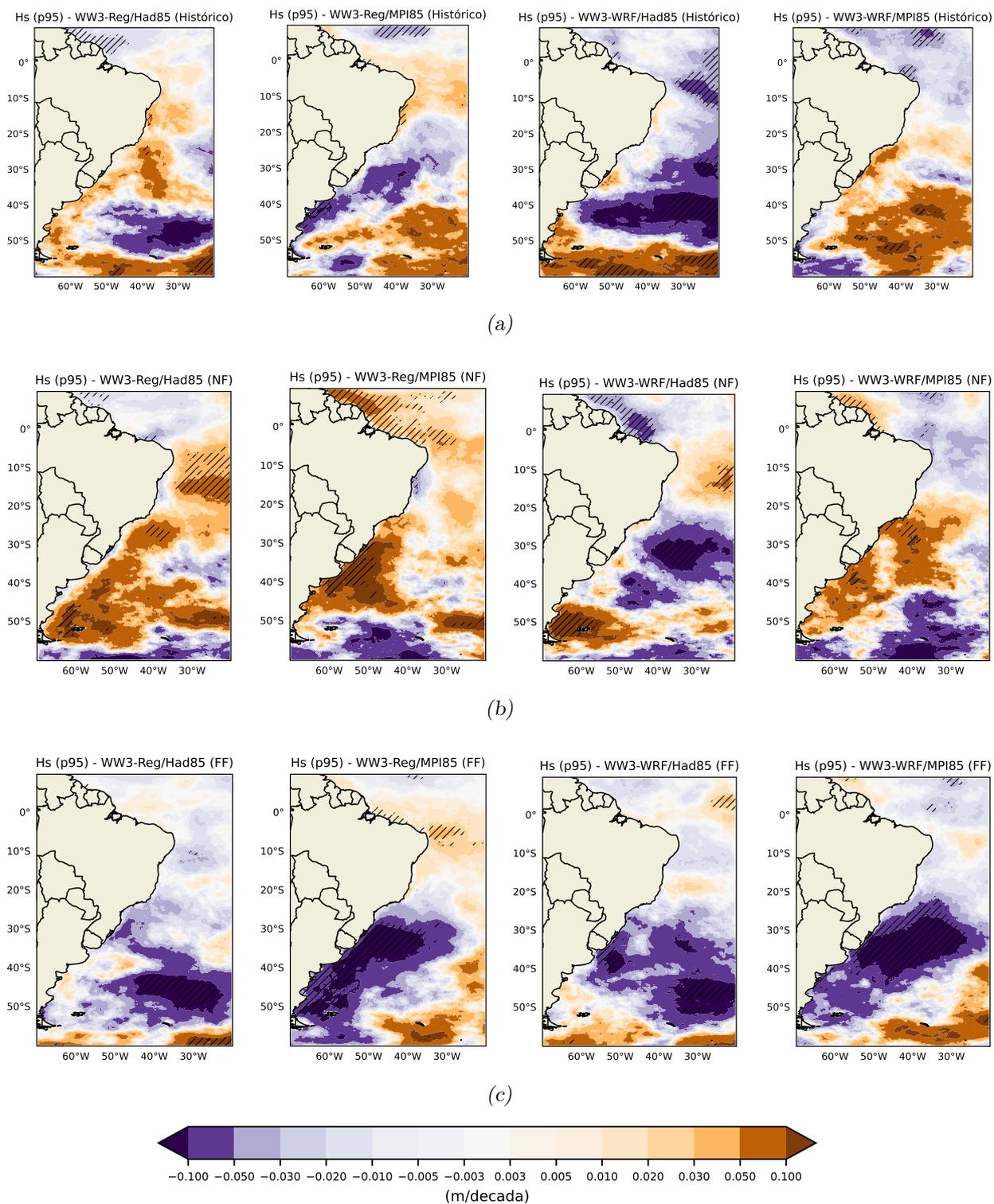


Figura 4.5: Mapas de tendência do percentil 95 do Hs (metros/década) para os períodos histórico (a), futuro próximo (b) e futuro distante (c).

No intuito de avaliar as tendências para o período completo de simulação (de 1979 a 2060), as séries de médias e extremos (P95) mensais da altura significativa de ondas foram

analisadas e o cálculo das tendências em cada ponto de grade foi realizado para elaboração de mapas espaciais da tendência apresentados na Figura 4.6.

Todos os experimentos, tanto na tendência do Hs médio quanto no extremo (P95), em algum grau apontaram uma região de aumento no sul do domínio, sendo que uma região mais extensa é identificada no experimento WW3-WRF/MPI-ESM-MR se estendendo de 60°S até 40°S. Nos experimentos WW3-RegCM4/HadGEM2-ES e WW3-RegCM4/MPI-ESM-MR há regiões de redução nas tendências a partir de 50°S que se estende até 30°S no primeiro. Por outro lado o WW3-WRF/HadGEM2-ES apresenta uma região de tendência a redução entre 50°S e 40°S e uma região menor com tendência de aumento junto a costa sul-sudeste do Brasil sobre as bacias de Pelotas, Campos e Santos.

Na costa norte do Brasil, há uma extensa área de redução na tendência tanto do Hs médio quanto do P95 nos experimentos WW3-RegCM4/HadGEM2-ES e WW3-WRF/HadGEM2-ES, enquanto o experimento WW3-RegCM4/MPI-ESM-MR mostram áreas com tendência de aumento tanto no Hs médio (a) quanto no extremo (b). No experimento WW3-WRF/MPI-ESM-MR observa-se a presença de uma região de aumento junto a costa.

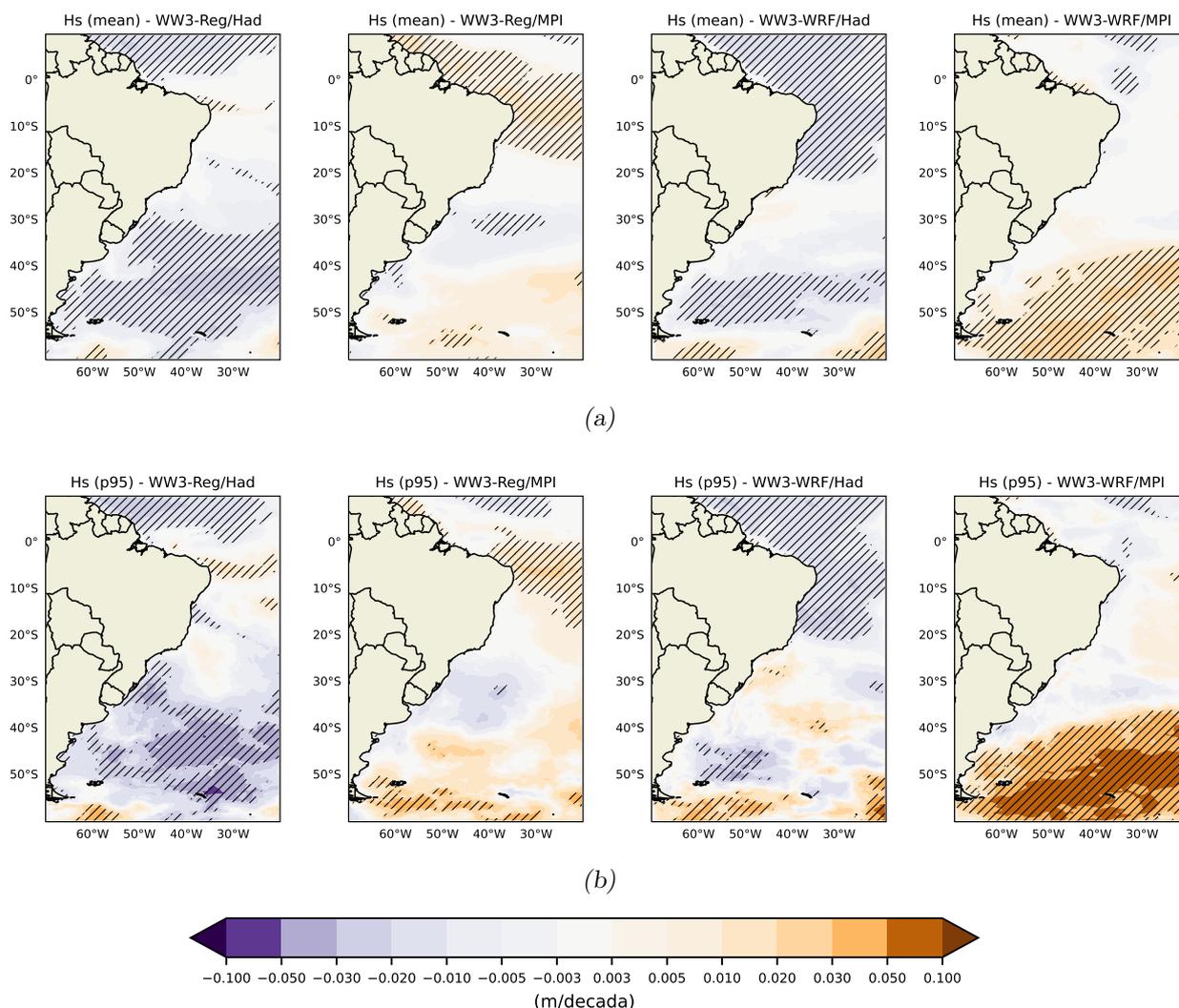


Figura 4.6: Mapas de tendência da média mensal (a) e percentil 95 (b) do Hs (metros/década) para o período total de 1979 a 2060.

As tendências das séries das médias mensais da altura significativa de ondas, para todo período de 1979 a 2060 em cada uma das bacias sedimentares brasileiras são apresentadas na Tabela 4.4. As colunas Tend. indicam os valores do *Sen's Slope* em metros/década e o as colunas MK (teste de *Mann-Kendall*) indicam o sinal da tendência quando a mesma possui significância estatística de modo que setas azuis representam quando há tendência de aumento e setas vermelhas quando há tendência de redução. O experimento WW3-RegCM4/Had indicaram tendência de redução nas Bacias de Pelotas, Santos, ParaMaranhão e Foz do Amazonas, sendo o maior valor de  $-0,018$  m/década na Foz do Amazonas. Já o experimento WW3-RegCM4/MPI apresentou tendência de redução apenas na bacia de Pelotas e tendência de aumento nas bacias de Pernambuco-Paraíba, Potiguar,

bacia do Ceará, Barreirinhas e Foz do Amazonas, sendo maior valor encontrado de 0,017 m/década. Os resultados obtidos pelo experimento WW3-WRF/Had mostram um tendência de redução do Hs médio para quase todas as bacias sedimentares, com exceção para as bacias do Sul-sudeste (Pelotas, Campos e Espírito Santo) e da bacia do Pará-Maranhão. No experimento WW3-WRF/MPI um aumento de 0,014 m/década é detectado na bacia da Foz do Amazonas e redução nas bacias que vão do litoral da Bahia até Alagoas (Cumuruxatiba, Jequitinhonha, Camamu-Almada, Jacuípe e Sergipe-Alagoas).

Tabela 4.4 - Tendências da média anual da altura significativa de onda no período de 1979 a 2060

Bacias	RegCM4-Had		RegCM4-MPI		WRF-Had		WRF-MPI	
	Tend.	MK	Tend.	MK	Tend.	MK	Tend.	MK
Foz Do Amazonas	-0.018	↘	0.009	↗	-0.013	↘	0.014	↗
Para-maranhao	-0.010	↘	0.009	-	-0.008	-	0.009	-
Barreirinhas	-0.003	-	0.011	↗	-0.015	↘	0.006	-
Do Ceara	-0.004	-	0.012	↗	-0.017	↘	0.005	-
Potiguar	0.001	-	0.017	↗	-0.019	↘	-0.002	-
Pernambuco-paraiba	0.003	-	0.013	↗	-0.017	↘	-0.004	-
Sergipe-alagoas	-0.000	-	0.008	-	-0.018	↘	-0.006	↘
Jacuípe	-0.000	-	0.004	-	-0.020	↘	-0.008	↘
Camamu-almada	-0.003	-	0.002	-	-0.022	↘	-0.008	↘
Jequitinhonha	-0.003	-	0.002	-	-0.025	↘	-0.009	↘
Cumuruxatiba	-0.004	-	0.000	-	-0.022	↘	-0.010	↘
Mucuri	-0.003	-	-0.002	-	-0.015	↘	-0.006	-
Espirito Santo	-0.005	-	0.000	-	-0.007	-	-0.004	-
Campos	-0.006	-	0.000	-	0.001	-	-0.001	-
Santos	-0.008	↘	-0.004	-	0.008	-	-0.002	-
Pelotas	-0.015	↘	-0.011	↘	0.014	-	0.003	-

Os valores de tendências exibidos na coluna Tend. estão em metros/década, as setas azuis (vermelhas) indicam tendência significativa de aumento (redução), enquanto que a barra horizontal indica que não há tendência significativa.

Na Tabela 4.2 são apresentadas as tendências para as séries de extremos mensais (P95) calculadas nos centroides dos polígonos das bacias sedimentares. No experimento WW3-RegCM4/HadGEM2-ES foram identificadas tendências de redução para as bacias do Jequitinhonha (-0,024 metros/década) e Foz do Amazonas (-0,031 metros/década). Enquanto nas bacias Potiguar, do Ceará e de Barreirinhas o sinal foi de redução com valor máximo de 0,030 m/década na Bacia Potiguar. No experimento WW3-RegCM4/MPI-ESM-ES somente a Bacia Potiguar apresentou tendência com significância estatística, indicando um

aumento de 0,021 m/década. Nas projeções do WW3-WRF/HadGEM2-ES a bacia de pelotas indicou aumento de 0,059 m/décadas enquanto as bacias do Espírito Santo a Foz do Amazonas apresentaram valores de tendência negativos porém o sinal foi estatisticamente significativo nas bacias de Mucuri, Cumuruxatiba, Jequitinhonha, Camamu-Almada, Jacuípe, Potiguar e Foz do Amazonas. Os experimentos com WW3-WRF/MPI-ESM-MR indicaram uma tendência de redução na Bacia de Pernambuco-Paraíba (-0,012 m/década) e aumento na Foz do Amazonas (0,017 m/década).

Tabela 4.5 - Tendencias do extremo anual (P95) da altura significativa de onda de 1979 a 2060

Bacias	RegCM4-Had		RegCM4-MPI		WRF-Had		WRF-MPI	
	Tend.	MK	Tend.	MK	Tend.	MK	Tend.	MK
Foz Do Amazonas	-0.031	↘	0.001	-	-0.034	↘	0.017	↗
Para-maranhao	-0.008	-	0.002	-	-0.004	-	0.001	-
Barreirinhas	0.024	↗	-0.001	-	-0.013	-	-0.002	-
Do Ceara	0.022	↗	0.007	-	-0.014	-	0.004	-
Potiguar	0.030	↗	0.021	↗	-0.025	↘	-0.013	-
Pernambuco-paraiba	0.006	-	0.006	-	-0.013	-	-0.012	↘
Sergipe-alagoas	-0.006	-	0.008	-	-0.014	-	0.002	-
Jacuípe	-0.009	-	0.007	-	-0.023	↘	0.001	-
Camamu-almada	-0.012	-	0.007	-	-0.027	↘	0.000	-
Jequitinhonha	-0.024	↘	0.003	-	-0.040	↘	-0.006	-
Cumuruxatiba	-0.012	-	0.005	-	-0.041	↘	-0.005	-
Mucuri	-0.001	-	0.005	-	-0.024	↘	-0.001	-
Espirito Santo	-0.002	-	0.005	-	-0.005	-	0.002	-
Campos	-0.006	-	0.001	-	0.015	-	-0.012	-
Santos	-0.016	-	-0.011	-	0.013	-	0.009	-
Pelotas	-0.045	-	-0.031	-	0.059	↗	0.000	-

Os valores de tendências exibidos na coluna Tend. estão em metros/década, as setas azuis (vermelhas) indicam tendência significativa de aumento (redução), enquanto que a barra horizontal indica que não há tendência significativa.

Os mapas de tendencia do período de pico mensal para o período completo de 1979 a 2060 são apresentados na Figura 4.7. No experimento WW3-RegCM4/HadGEM2-ES há uma predominância de tendência a redução no período de pico das ondas enquanto no WW3-RegCM4/MPI-ESM-ES há uma tendência de redução no extremo sul da Argentina e junto a costa do RS. Na costa norte do Brasil e no meio do atlântico a tendência é de aumento no período de pico.

Os experimentos com WW3-WRF/RegCM4-ES e WW3-WRF/MPI-ESM-MR apresen-

tam tendência de redução na costa norte do Brasil e uma ampla região a leste do nordeste brasileiro onde há uma tendência de aumento do período de pico. Esta região se estende de 10°N até 20°S no WW3-WRF/RegCM4-ES e de 10°N até 60°S no WW3-WRF/MPI-ESM-MR.

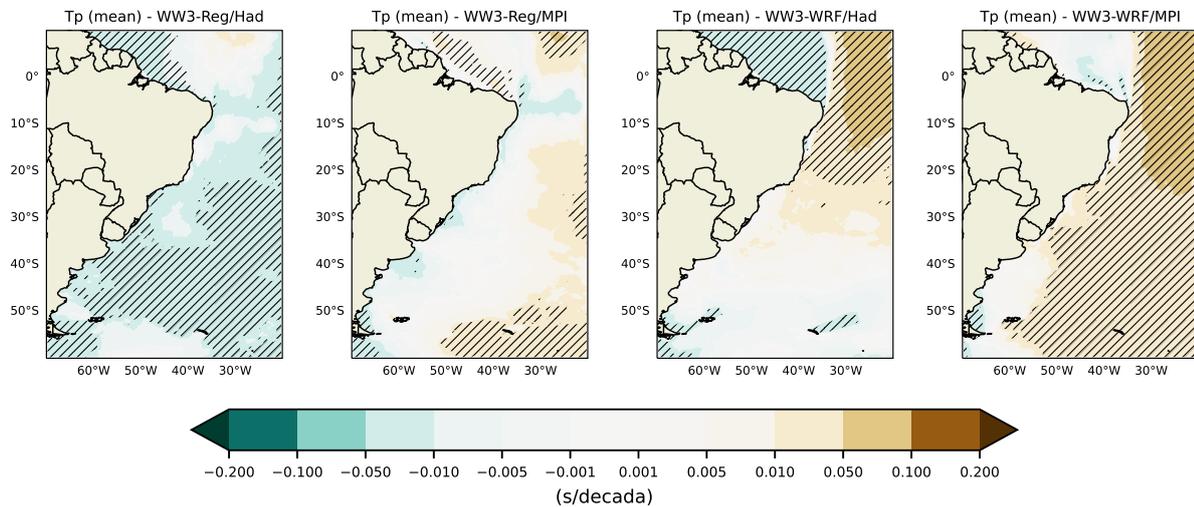


Figura 4.7: Mapas de tendência da média mensal do período de pico (segundos/década) para o período total (1979 a 2060).

As tendências por bacia sedimentar são apresentadas na Tabela 4.6. Tendências de redução no período de pico são identificadas nas bacias de Pelotas, Barreirinha, Pará-Maranhão e Foz do Amazonas No experimento WW3-RegCM4/MPI-ESM-MR somente a bacia do Ceará indicou uma tendência de aumento no Tp de 0,014 s/década. Já nas projeções com o WW3-WRF/HadGEM2-ES a tendência de aumento foi verificada na bacia de Cumuruxatiba (0,039 s/década) enquanto as bacias Potiguar, do Ceará, Barreirinhas, Pará-Maranhão e Foz do Amazonas apresentaram tendência de redução do Tp. As projeções com WW3-WRF/MPI-ESM-MR mostraram tendência de aumento do Tp nas bacias de Santos, Espírito Santo, Mucuri, Sergipe-Alagoas e Pernambuco-Paraíba enquanto as bacias Potiguar e do Ceará apontaram tendências de redução do período de pico médio de -0,023 e -0,011 m/década respectivamente.

Tabela 4.6 - Tendências da média anual do período de pico no período de 1979 a 2060

Bacias	RegCM4-Had		RegCM4-MPI		WRF-Had		WRF-MPI	
	Tend.	MK	Tend.	MK	Tend.	MK	Tend.	MK
Foz Do Amazonas	-0.030	↘	-0.001	-	-0.029	↘	0.004	-
Para-maranhao	-0.018	↘	-0.002	-	-0.042	↘	0.002	-
Barreirinhas	-0.016	↘	0.002	-	-0.039	↘	-0.005	-
Do Ceara	-0.004	-	0.014	↗	-0.040	↘	-0.011	↘
Potiguar	-0.001	-	0.008	-	-0.031	↘	-0.023	↘
Pernambuco-paraiba	-0.018	-	-0.026	-	0.023	-	0.045	↗
Sergipe-alagoas	-0.015	-	-0.007	-	0.015	-	0.044	↗
Jacuipe	-0.014	-	-0.015	-	0.009	-	0.017	-
Camamu-almada	-0.012	-	-0.013	-	0.012	-	0.022	-
Jequitinhonha	-0.005	-	-0.015	-	0.024	-	0.019	-
Cumuruxatiba	0.003	-	-0.009	-	0.039	↗	0.026	-
Mucuri	-0.011	-	0.003	-	0.019	-	0.041	↗
Espirito Santo	-0.013	-	0.005	-	0.018	-	0.045	↗
Campos	-0.011	-	-0.008	-	0.007	-	0.028	-
Santos	-0.018	-	-0.011	-	0.004	-	0.029	↗
Pelotas	-0.020	↘	-0.008	-	-0.003	-	0.027	-

Os valores de tendências exibidos na coluna Tend. estão em segundos/década, as setas azuis (vermelhas) indicam tendência significativa de aumento (redução), enquanto que a barra horizontal indica que não há tendência significativa.

### 4.3 Mudanças de Regime

O método proposto por Rodionov (2004) foi empregado para identificar mudanças de regime nas séries temporais das projeções climáticas de ondas. Nesta abordagem, a detecção de uma mudança de regime é baseada no cálculo do índice de mudança de regime (RSI), que representa a soma acumulada de desvios normalizados dos valores da série temporal em relação ao nível médio hipotético para o novo regime. Esse nível é determinado pela diferença estatisticamente significativa em relação ao nível médio do regime anterior. Se o RSI permanecer positivo por um período igual ao comprimento de corte, uma mudança é reconhecida. As análises apresentadas aqui foram realizadas com comprimento de corte do regime  $L=10$  anos e a nível de probabilidade  $p=0,05$ .

A Figura 4.8 apresenta os resultados da aplicação do método de detecção de mudança de regime na série temporal para bacia de Santos do experimento WW3-WRF/MPI-ESM-MR. No gráfico superior, as barras azuis indicam os extremos anuais, representados pelo

percentil 95 das séries horárias. A barra horizontal em laranja indica a média dos valores e as barras pretas indicam os períodos onde uma mudança de regime foi detectada. No gráfico inferior são indicados através de barras verticais pretas onde o RSI foi alcançado e o seu sinal. No caso em questão foi detectado uma mudança positiva em 2022 e uma mudança negativa em 2048.

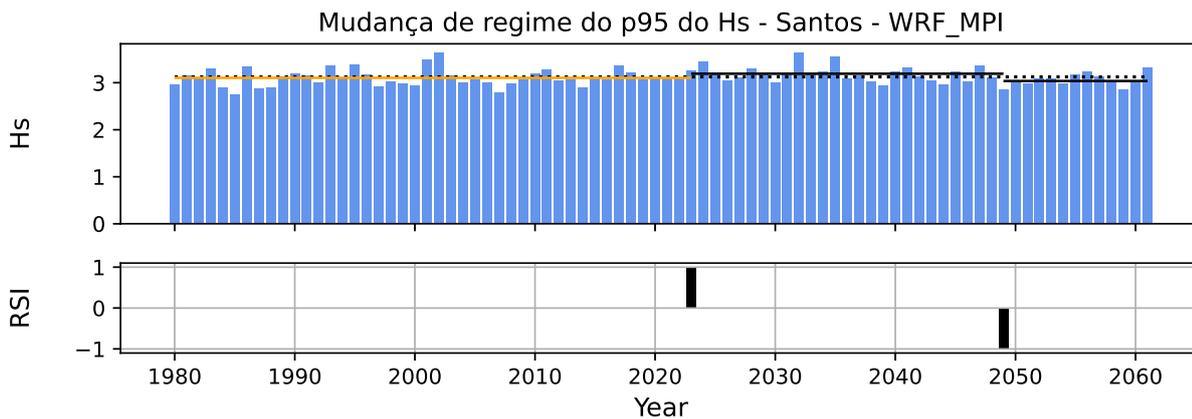


Figura 4.8: Mudança de regime na média anual da altura significativa de onda para a Bacia de Campos no experimento WW3-WRF/MPI.

Desta forma, as séries temporais das médias anuais Hs dos experimentos WW3-RegCM4/Had, WW3-RegCM4/MPI, WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI para cada uma das 16 bacias sedimentares foram analisadas e os resultados estão sumarizados na Tabela 4.7, onde a coluna com o sinal positivo(negativo) indica os anos onde houve uma mudança de regime, ou seja, um(a) aumento(redução) na média foi verificado(a). Os resultados da análise gráfica todas as bacia sedimentares, em cada um dos experimentos estão no Apêndice B.

No experimento WW3-RegCM4/Had uma mudança positiva de regime foi identificada nas bacias da costa norte do Brasil no final dos anos 2050 e na bacia de Jacuípe (2008) e em Camamu-Almada (2001). Uma redução foi detectada na bacia de Pelotas em 2007 e na bacia de Santos em 2052. As projeções do WW3-RegCM4/MPI indicaram uma mudança positiva de regime do Hs médio nas bacias do leste do nordeste brasileiro na metade dos anos 1990. Enquanto nas bacias do norte (Pará-Maranhão e Foz do Amazonas) duas mudanças positivas foram identificadas nos anos de 2015/2016 e 2041/2044. Reduções na média do Hs foram identificados nas bacias de Pelotas e Santos no ano de 2047, na bacia de Mucuri em 2008, nas bacias de Cumuruxatiba, Jequitinhonha e Camamu-Almada em

2008 e nas bacias da região norte em 2034.

As análises das séries temporais das médias anuais o Hs da simulação WW3-WRF/Had identificaram mudança positiva no regime na Bacia de Pelotas em 2033, bacia de Campos em 2014, nas bacia do Ceará, Barreirinhas e Pará-Maranhão nos anos 2057/2058. Uma mudança negativa no regime, que indica uma redução na média anual do Hs foi detectada em praticamente todas as bacias, sendo nas bacias de Pelotas, Campos, Espírito Santo, Mucuri e Cumuruxatiba no futuro distante, entre 2031 e 2060 e nas bacias da costa no norte do Brasil durante o período de futuro próximo entre 2006 a 2030. As projeções do WW3-WRF/MPI indicaram uma mudança positiva de regime no ano de 2036 nas bacias do Jequitinhonha, Camamu-Almada, Jacuípe e Sergipe-Alagoas e duas mudanças positivas nos anos de 2021 e 2048 na bacia da Foz do Amazonas. Uma mudança de regime negativa, indicando uma redução na média anual do Hs foi detectada no ano de 2024 nas bacias do Jequitinhonha, Camamu-Almada, Jacuípe e Sergipe Alagoas. Na bacia da Foz do Amazonas essa redução foi identificada no ano de 2036. E mais pro final das projeções, no ano de 2057, uma nova mudança negativa no regime foi detectada nas bacias de Campos, Espírito Santo, Mucuri, Cumuruxatiba, Jequitinhonha, Camamu-Almada, Jacuípe, Sergipe-Alagoas.

Tabela 4.7 - Mudança de regime da média anual do Hs no período de 1979 a 2060

Bacias	RegCM4-Had		RegCM4-MPI		WRF-Had		WRF-MPI	
	+	-	+	-	+	-	+	-
Foz Do Amazonas	2052	2004 2035	2015 2041	2034		2021	2021 2048	2036
Para-maranhao	2057	2036	2016 2044	2034	2057	2022		
Barreirinhas	2057		1997		2058	2021		
Do Ceara	2059		1997		2058	2018		
Potiguar	2059		1997 2049			2008 2019		
Pernambuco-paraiba			2021			2005		2017
Sergipe-alagoas			2049			2018	2036	2024 2057
Jacuipe	2008	2018	1996			2017	2036	2024 2057
Camamu-almada	2001	2017	1996	2008		1991	2036	2024 2057
Jequitinhonha			1996	2008		1991	2036	2024 2057
Cumuruxatiba			1996	2008		1992 2047		2057
Mucuri			1996	2029		1992 2034		2057
Espirito Santo						2034		2057
Campos					2014	2044		2057
Santos		2052		2047				
Pelotas		2007		2047	2033	2044		

Os resultados do teste de Rodionov para detecção de mudanças de regime nas série dos extremos anuais (P95) são apresentados na Tabela 4.8. Um aumento do regime de extremos foi identificado durante o período histórico nas bacias de Jequitinhonha, Camamu-Almada, Jacuípe, Sergipe-Alagoas, Pernambuco-Paraíba e Potiguar nas simulações com WW3-RegCM4/MPI. O mesmo sinal também foi verificado nas projeções do futuro próximo da bacia Potiguar nos experimentos WW3-RegCM4/Had (2029) e WW3-RegCM4/MPI (2002), na bacia de Santos no ano de 2022 (WW3-WRF/MPI) e na bacia do Jequitinhonha em 2024 no WW3-WRF/Had. No futuro distante o sinal de mudança

de regime positivo nos extremos de Hs foi detectado nas bacias do Ceará, Barreirinhas, Pará-Maranhão no WW3-RegCM4/Had; nas bacias de Cumuruxatiba, Sergipe-Alagoas e Potiguar no WW3-RegCM4/Had; na bacia do Ceará no WW3-WRF-Had (2059) e na Foz do Amazonas nas projeções do WW3-WRF/MPI.

A mudança de regime indicando redução nos extremos durante o período histórico foi detectada somente na simulação WW3-WRF/Had para bacia Potiguar no ano de 2005. Durante as projeções do futuro próximo (2006 a 2030) houve detecção de mudança de regime com redução nas bacias do Pará-Maranhão e Foz do Amazonas no experimento WW3-RegCM4/Had; nas bacias de Sergipe-Alagoas e Pernambuco-Paraíba na simulação WW3-RegCM4/MPI; nas bacias de Cumuruxatiba, Jequitinhonha, Ceará e Foz do Amazonas no WW3-WRF/Had; e nas bacias Pernambuco-Paraíba e Potiguar nas projeções do WW3-WRF/MPI. Nas projeções do período de futuro distante (2031-2060) o sinal de redução no regime foi identificado nas bacias de Pelotas, Santos, Campos e Foz do Amazonas no WW3-RegCM4/Had; nas bacias de Pelotas, Campos, Cumuruxatiba no WW3-RegCM4/MPI; nas bacias de Mucuri, Camamu-Almada, Jacuípe, Sergipe-Alagoas no WW3-WRF/Had; e bacias de Santos, Cumuruxatiba, Jequitinhonha, Camamu-Almada, Jacuípe nas projeções do WW3-WRF/MPI.

Tabela 4.8 - Mudança de regime do extremo anual (p95) do Hs de 1979 a 2060

Bacias	RegCM4-Had		RegCM4-MPI		WRF-Had		WRF-MPI	
	+	-	+	-	+	-	+	-
Foz Do Amazonas		2021 2047				2014	2058	
Para-Maranhão	2058	2021						
Barreirinhas	2029 2059							
Do Ceara	2056		2025		2059	2009		
Potiguar	2029		2002 2058			2005		2015
Pernambuco-Paraíba			1994	2030		2035		2023
Sergipe-alagoas			2000 2042	2030		2035		
Jacuípe			1996			2035		2058
Camamu-Almada			1996			2035		2057
Jequitinhonha		2035	1996		2024	2014		2057
Cumuruxatiba			2054	2058		2027		2057
Mucuri						2035		
Espirito Santo								
Campos		2057		2059				
Santos		2052					2022	2048
Pelotas		2057		2047				

#### 4.4 Períodos de Retorno e Contornos Ambientais

Os valores da Altura significativa das ondas e o período de pico associado foram estimados para um período de retorno de 100 anos através dos contornos ambientais das distribuições conjuntas calculadas pelo método I-FORM, descrito na Seção 2.7.3. No intuito de avaliar comparativamente como a estimativa dos extremos centenários responde às diferentes projeções climáticas de ondas, os valores de Hs e Tp foram extrapolados para os períodos histórico (1979 a 2005), futuro próximo (2006 a 2030) e futuro distante (2031 a 2060).

Para ilustrar a aplicação do método I-FORM, a Figura 4.9 apresenta as distribuições conjuntas de altura significativa (Hs) e período de pico das ondas (Tp) na bacia de Santos

---

para os períodos histórico, futuro próximo (NF) e futuro distante (FF). Alguns aspectos podem ser analisados visualmente através dos contornos ambientais. As projeções do WW3-RegCM4/Had apresentam períodos de picos da ordem de 20s quando há ocorrência de Hs maiores do que 3 metros. Este fato não se repete nas outras projeções e isto pode ser identificado visualmente pelo abaulamento das demais curvas quando o Tp se aproxima de 20s. Outro aspecto importante da análise dos contornos ambientais através do I-FORM é estimar o Hs máximo para o período de retorno analisado e o seu período de pico correspondente (período de pico associado). Este processo foi automatizado e o resultado das extrapolações para um período de retorno de 100 anos foram sumarizados na Tabela 4.9 para as séries de Hs e Tp extraídas dos centroides das bacias sedimentares. Os contornos ambientais para cada uma das 16 bacias foram incluídos no Apêndice C.

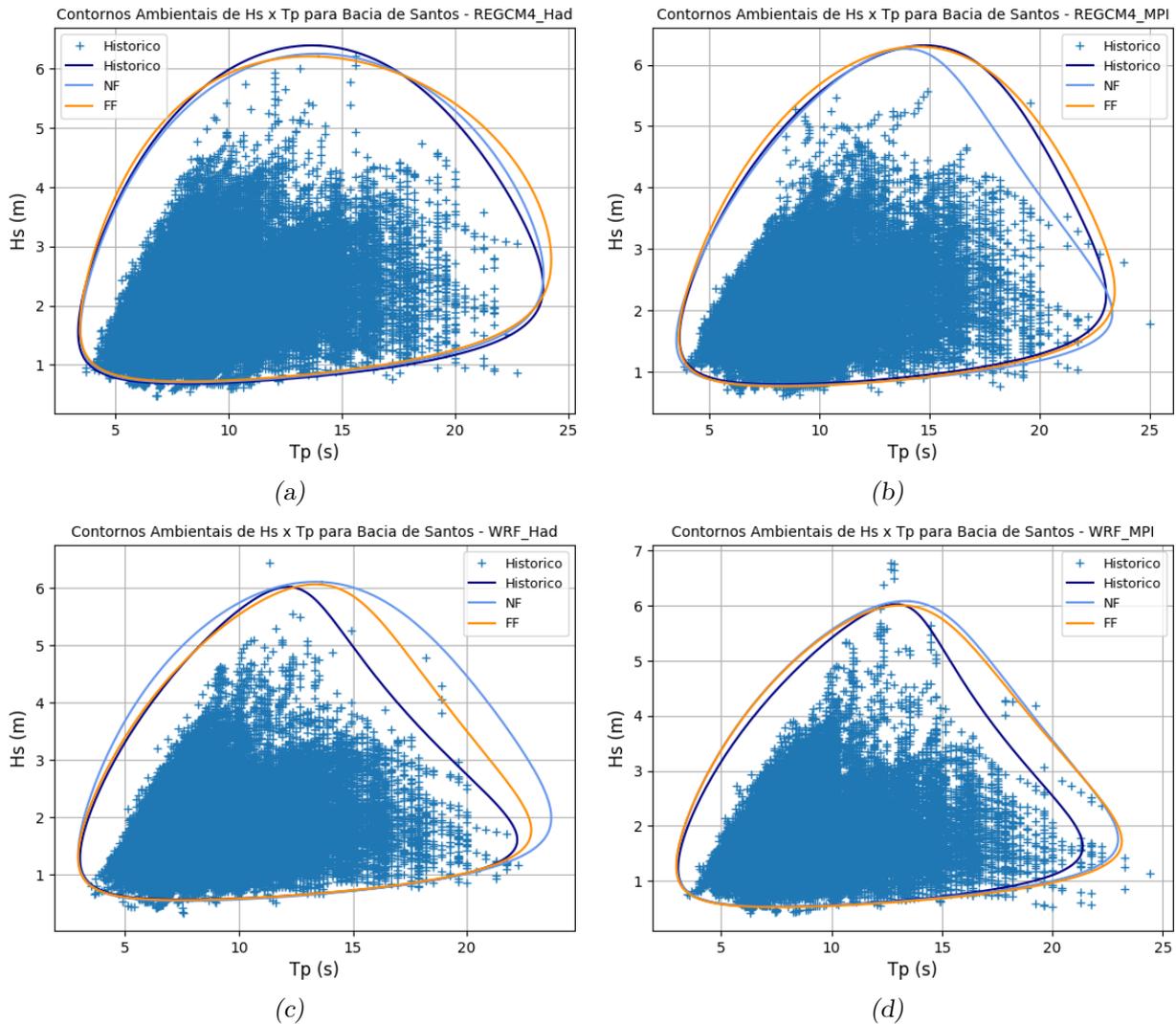


Figura 4.9: Contornos ambientais de  $H_s$  (m) e  $T_p$  (s) para a Baía de Santos nos experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-RegCM4/MPI (b), WW3-WRF/Had (c) e WW3-WRF/MPI (d).

Através da análise da Tabela 4.9 é possível identificar que o valor máximo de  $H_s$  para o período de retorno de 100 anos foi de 8,3 m encontrado na baía de Pelotas no experimento WW3-RegCM4/Had utilizando os resultados do período histórico. Outro fator que chama atenção é que os valores do  $T_p$  associado ao máximo  $H_s$  estimados para baía do Espírito Santo são maiores do que todas as demais bacias, e em praticamente todas projeções os valores estimados foram acima de 20s. Pode se especular que essa característica deve-se ao fato de que a baía do Espírito Santo, por questões geográficas, está mais exposta às ondulações provenientes do quadrante sul e por ser a baía mais longe de zona de geração em latitude médias antes do arquipélago de Abrolhos, onde as ilhas e a região de baixa profundidade tendem atenuar as ondas que chegam nas bacias da costa do leste do nordeste

brasileiro.

As extrapolações para as bacias do sul-sudeste apresentaram, em geral, redução tanto em Hs quanto para o Tp nos períodos do futuro próximo e futuro distante em relação ao período histórico dos experimentos WW3-RegCM4/Had e WW3-RegCM4/MPI. Nas projeções do WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI foi observado um aumento nos extremos futuro próximo seguido de uma redução no futuro distante. Em relação as bacias do leste do nordeste, as bacias de Mucuri, Cumuruxatiba, Jequitinhonha e Camamu-Almada apresentaram redução ou estabilidade nos períodos de futuro próximo e futuro distante em relação ao período histórico. A exceção foi o experimento WW3-WRF/MPI, onde no futuro próximo apresentou redução e no futuro distante apresentou um aumento nos valores extremos de Hs. Já as bacias da costa norte apresentaram redução nos extremos extrapolados de Hs nos experimentos com o WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI tanto no futuro próximo quanto no futuro distante.

Tabela 4.9 - Altura Significativa das ondas (m) e Período de Pico (s) associado para um período de retorno de 100 anos

Bacias	RegCM4-Had						RegCM4-MPI						WRF-Had						WRF-MPI					
	Hist		NF		FF		Hist		NF		FF		Hist		NF		FF		Hist		NF		FF	
	Hs	Tp	Hs	Tp	Hs	Tp	Hs	Tp	Hs	Tp	Hs	Tp	Hs	Tp	Hs	Tp	Hs	Tp	Hs	Tp	Hs	Tp	Hs	Tp
Foz Do Amazonas	4.0	12.5	3.8	12.4	3.9	12.6	3.1	10.3	3.3	11.6	2.9	9.5	3.8	8.1	3.5	7.7	3.3	8.0	3.3	10.3	3.2	11.3	3.2	10.9
Para-maranhao	3.1	12.7	3.2	13.6	3.1	12.5	2.7	9.8	2.8	11.3	2.7	10.0	3.6	9.7	3.4	10.8	3.3	9.6	3.2	9.6	2.9	10.8	2.8	10.1
Barreirinhas	3.3	12.5	3.2	12.7	3.2	11.7	3.0	9.9	3.2	12.2	2.9	11.2	3.7	10.4	3.5	10.4	3.3	9.7	3.3	10.9	3.2	11.4	3.1	10.7
Do Ceara	3.5	10.6	3.3	10.4	3.3	10.3	3.3	9.4	3.2	10.3	3.3	9.5	4.1	11.8	3.8	11.2	3.7	11.5	3.5	11.6	3.2	11.0	3.1	10.7
Potiguar	4.2	11.1	4.1	10.4	4.3	11.4	4.0	10.3	4.1	9.6	4.3	10.8	5.0	14.2	4.6	13.8	4.5	13.5	4.3	11.7	4.0	11.2	4.1	11.4
Pernambuco-paraiba	5.0	12.1	5.2	14.7	5.2	18.2	5.2	11.7	5.3	12.3	5.2	17.5	5.3	15.4	5.2	17.4	5.2	14.4	5.4	12.8	5.4	12.5	5.5	15.6
Sergipe-alagoas	5.0	14.2	5.1	15.3	5.1	15.4	5.2	14.1	5.2	15.3	5.3	15.9	5.1	16.4	5.1	15.8	5.0	15.0	5.4	13.6	5.3	14.9	5.5	16.5
Jacuipe	4.7	13.0	4.8	20.1	4.7	14.2	4.7	16.8	4.8	12.9	4.9	13.6	4.9	14.7	4.8	15.5	4.6	13.9	5.1	13.7	4.9	13.1	5.1	13.0
Camamu-almada	4.9	13.2	4.9	19.2	4.8	15.1	4.9	14.5	4.9	11.9	5.0	13.4	4.9	14.1	4.8	14.9	4.6	13.7	5.1	12.5	4.9	13.4	5.1	13.8
Jequitinhonha	5.1	13.3	5.0	18.0	5.0	14.9	5.0	12.0	5.0	11.2	5.0	11.6	5.1	13.4	4.9	13.7	4.7	13.4	5.1	12.3	4.9	13.2	5.1	12.2
Cumuruxatiba	5.2	14.7	5.1	18.5	5.1	11.7	5.1	13.3	5.1	11.7	5.1	13.2	5.0	13.5	4.8	13.7	4.7	14.0	5.1	12.6	5.0	12.4	5.1	13.1
Mucuri	5.4	14.9	5.4	21.1	5.4	14.9	5.5	17.8	5.5	12.7	5.4	14.4	5.3	15.7	5.1	17.0	5.1	16.9	5.3	12.8	5.2	13.8	5.2	13.6
Espirito Santo	6.1	26.5	6.1	25.1	6.0	22.9	6.1	24.5	6.2	25.4	6.2	26.4	6.0	21.9	6.0	22.8	5.9	24.6	5.9	17.4	5.9	23.4	5.9	24.3
Campos	6.3	18.9	6.2	20.6	6.1	19.8	6.4	18.7	6.5	17.2	6.4	17.7	5.9	16.2	6.3	18.3	6.1	18.4	6.0	15.8	6.1	17.8	6.0	16.0
Santos	6.4	18.6	6.3	18.8	6.2	18.3	6.3	20.0	6.3	18.8	6.3	19.6	6.0	16.3	6.1	17.9	6.1	17.9	6.0	17.3	6.1	17.9	6.0	17.6
Pelotas	8.3	18.5	7.7	17.3	7.7	17.4	7.8	17.1	7.7	17.4	7.6	17.7	7.9	17.4	7.9	18.3	8.0	18.5	7.6	16.5	7.8	17.0	7.6	16.8

## Conclusões

O presente trabalho investigou como as mudanças climáticas impactam o estado do mar, utilizando projeções climáticas de ondas geradas por modelagem numérica. Essas projeções foram baseadas em forçantes de vento de diversos modelos atmosféricos globais e regionalizações climáticas. Analisamos os resultados das projeções comparando campos médios e extremos, além de conduzir testes estatísticos para verificar a significância das alterações no clima de ondas.

Durante a primeira fase da pesquisa, implementamos o modelo de ondas WW3 em duas grades: uma com cobertura global e outra nos limites dos domínios das regionalizações atmosféricas do projeto WeSACEx (AtlSul, Figura 2.1). Nesta fase, conduzimos várias simulações com forçantes atmosféricas de reanálises e das regionalizações climáticas. Realizamos testes de sensibilidade para determinar o conjunto adequado de parametrizações, destacando o parâmetro mais sensível, o *Betamax* do pacote de termos fonte ST4 (Ardhuin et al. (2010)). Durante os testes de sensibilidade, encontramos um valor ótimo de 1,8 para o *Betamax*. Mantivemos esse valor, juntamente com o mesmo conjunto de parametrizações descrito na Tabela 2.2, em todas as demais simulações.

Na etapa de calibração e avaliação dos modelos, aplicamos diferentes métodos e índices para medir e comparar o desempenho das simulações. Observamos que o índice de correlação apresentou valores muito baixos, em torno de 0,5. Esses valores baixos podem ser explicados pelo fato de que as regionalizações climáticas não têm o compromisso de representar sinoticamente os sistemas meteorológicos. Devido à sua longa duração, iniciando em 1979 e sendo atualizada apenas através das condições de contorno que estão distantes dos pontos de avaliação, esperava-se que os eventos transientes, como frentes ciclônicas, não fossem representados sinoticamente, mas sim em termos de frequência e intensidade a

longo prazo. Portanto, o índice de correlação, juntamente com o erro quadrático e o viés analisados ponto a ponto das séries temporais, não são bons parâmetros de avaliação para projeções climáticas. Nesse contexto, as análises envolvendo comparação das distribuições foram mais eficazes, especialmente a análise através da comparação dos quantis utilizando o *QQ plot*.

Efeito da correção de viés no vento das regionalizações climáticas foi verificado através das simulações de ondas com o WW3 realizadas durante o período histórico com e sem a correção de viés. Os resultados destas simulações foram comparados com 10 boias ao longo da costa do Brasil, nos períodos onde estas boias possuíam dados qualificados disponíveis. As análises através da análise das distribuições e dos *QQ plots* mostraram que, para as boias localizadas na costa sul-sudeste do Brasil, o ajuste nos vento melhorou muito a representação das ondas nos quantis superiores principalmente das simulações com forçante de vento do RegCM4 que apresentou um viés de superestimativa grande nas simulações sem o ajuste. As regionalizações com o WRF apresentaram um viés de subestimativa que também foi reduzido com a correção de viés aplicada ao campo de vento. Por outro lado, a análise das boias da região nordeste mostrou que a correção de viés através do ajuste linear dos ventos levou a subestimativas do Hs maiores do que as obtidas nas simulações sem o ajuste nos campos de vento.

Estes resultados também puderam ser verificados através das comparações dos campos espaciais da média anual e do P95 da altura significativa de ondas das simulações de ondas com o WW3 com os obtidos pela reanálise pelo WAWERYYS. Nesta análise, os campos de diferença entre o experimentos WW3-RegCM4/ERA-Interim e o WAWERYYS tiveram redução significativa em todo domínio ao sul de 20°S enquanto a costa da região nordeste viu esta diferença aumentar nas simulações com o vento ajustado. Em relação as simulações com o WW3-WRF/CFSR as diferenças foram mais sutis e mostraram que com a correção de viés no campo de vento há uma tendência a reduzir as diferenças na maior parte do domínio.

Após o modelo de ondas ter sido calibrado e avaliado com as regionalizações em cima das reanálises do ERA-Interim e CFSR, iniciou-se a segunda etapa da pesquisa, na qual foram realizadas simulações a partir dos resultados das projeções dos modelos climáticos globais HadGEM2-ES e MRI-ESM-MR que fizeram parte do CMIP5. O período total de simulação de 1979 a 2060 foi dividido em três período, onde o período histórico foi de 1979 a 2005 sem forçante radiativa e o período de futuro próximo (2006 a 2030) e futuro distante (2031

a 2060) com forçante radiativa do cenário RCP8.5.

A análise espacial dos campos de diferença entre os cenários futuros e o período histórico, tanto da média anual quanto do valor extremo (percentil 95) indicou que na região próxima a fronteira sul do domínio (ao sul de 50°S) houve um aumento consistente tanto no futuro próximo quanto no futuro distante e este resultado que converge com diversas projeções de ondas como em Mori et al. (2010), Semedo et al. (2012), Wang et al. (2014) e Lobeto et al. (2021). Os mapas espaciais do teste de tendência de Mann-Kendall (Mann (1945), Kendall (1975)) também indicaram um aumento estatisticamente significativo para essa mesma região, que é caracterizada por um cinturão de fortes ventos de oeste que circunda o Oceano Antártico e está sujeita a variabilidade da Oscilação Antártica (AAO) ou Modo Anular do Sul (SAM).

Ao longo da costa brasileira os resultados para as bacias sedimentares podem ser agrupados em 3 regiões. A região sul-sudeste, que engloba as bacias de Pelotas, Santos, Campos e do Espírito Santo. A leste do nordeste que vai da bacia de Mucuri até a bacia de Pernambuco-Paraíba, e a costa norte do Brasil que vai da bacia Potiguar até a Foz do Amazonas.

Para a região das bacias na região sul-sudeste, os resultados são bastantes divergentes no que diz respeito as diferenças entre as projeções de clima futuro e o período histórico. As regionalizações com forçante de vento do RegCM4 indicam que as médias a extremos de Hs e Tp sofrem uma tanto no futuro próximo quanto no futuro distante. Por outro lado as projeções com forçante de vento oriunda das regionalizações com o WRF indicam neutralidade ou até um ligeiro aumento na altura significativa e no período de pico das ondas. Já em relação as tendências, é verificado um sinal de aumento dentro do período histórico que se mantém no futuro próximo e reverte para um sinal mais forte de redução no futuro distante.

Nas bacias da costa leste do nordeste brasileiro, foi observada uma redução do Hs médio e extremo (P95) nas projeções WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI para ambos os períodos de futuro próximo e futuro distante. Este resultado é confirmado pelo teste de tendência que mostrou sinal de redução na maior parte das bacias sedimentares. Já as projeções com o WW3-RegCM4/Had e WW3-RegCM4/MPI não apresentaram resultados conclusivos no que diz respeito a aumento ou redução, com valores muito baixos tendendo a neutralidade.

Sobre a região ao largo da costa norte do Brasil, os resultados das projeções de ondas apresentaram uma convergência entre as regionalizações com as mesmas forçantes globais, ou seja. Esse resultado pode ser explicado pelo tamanho reduzido da grade do WW3 no Atlântico Norte, onde este fato faz com que as mais importantes tempestades geradoras de ondas sejam representadas pela grade do modelo global e não pelas grades das regionalizações com RegCM4 e WRF. Desta forma boa parte das ondas observadas nessa região são geradas na grade Global e entram pela fronteira norte da grade Atlsul do WW3.

Em geral os testes de mudança de regime com o método de Rodionov (Rodionov (2004)) apresentaram resultados que dão mais robustez às análises obtidas através das comparações das médias (Seção 4.1) e tendências (Seção 4.2), mostrando em muitos casos mudanças de regime indicando um aumento (redução) na altura significativa das ondas onde uma tendência positiva (negativa) havia sido detectada. Uma peculiaridade do método de Rodionov a ser considerada é o fato de que ele não fornece resultados confiáveis para o final da série temporal (Jaagus et al. (2017)). Portanto, somente o uso de projeções mais longas nos permitiria confirmar que as mudanças de regime detectadas no final da década de 2060 realmente são estatisticamente significativas.

A análise dos extremos, realizada através dos contornos ambientais, para o período de retorno de 100 anos apresentou resultados que confirmaram as demais análises apresentando para as bacias do sul-sudeste uma redução no Hs e no Tp nas projeções com WW3-RegCM4/Had e WW3-RegCM4/MPI para ambos períodos de futuro enquanto nas projeções com WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI é verificado um aumento no futuro próximo e uma redução no futuro distante enquanto Já as bacias da costa norte apresentaram redução nos extremos extrapolados de Hs nos experimentos com o WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI tanto no futuro próximo quanto no futuro distante.

Um aspecto prático deste estudo é que os resultados indicam que o impacto das mudanças climáticas pode variar significativamente de acordo com a localização. Enquanto algumas regiões podem experimentar efeitos positivos com a redução dos extremos de ondas, em outras isso pode não ser verdadeiro. Em resumo, este trabalho enfatiza a importância de levar em conta os efeitos das mudanças climáticas no planejamento a longo prazo da utilização do espaço marinho seja para navegação, exploração de petróleo ou geração de energia renovável *offshore*.

## 5.1 *Trabalhos Futuros*

O presente estudo envolveu um esforço computacional considerável para a simulação do clima de ondas no período de 1979 a 2060. Considerando que foram 2 forçantes globais de reanálises, 2 forçantes de modelos climáticos globais do CMIP5 e 2 forçantes das regionalizações climáticas, além das combinações entre elas. No total foram 10 experimentos que geraram uma enorme quantidade de dados. Neste contexto, as análises apresentadas neste documento representam apenas uma parcela dos resultados obtidos, seja em termos de parâmetros analisados, aspectos abordados ou mesmo de hipóteses verificadas.

Portanto, como trabalhos futuros sugere-se a utilização do conjunto de simulações geradas neste estudo para que sejam analisados outros parâmetros fornecidos pela modelagem de ondas como período, direção média e altura significativa e período de pico para diferentes picos espectrais.

Adicionalmente, seria interessante que os resultados das projeções fossem analisados sob a ótica da variação sazonal, identificando como se dá a resposta do clima de ondas à mudança climática em diferentes épocas do ano.

A partir da divulgação do Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do IPCC, os modelos do CMIP6 começaram a ser disponibilizados e como a nova geração das projeções climáticas globais possuem modelos numéricos com escala horizontal da ordem de até 25km (equivalente à resolução das regionalizações com RegCM4 e WRF utilizados no WeSACEx) fica como sugestão a utilização destes modelos, que possuem premissas de aquecimento atualizadas, como forçantes atmosféricas para projeção de ondas.

Outro ponto importante seria a possibilidade de, em próximos estudos projeções climáticas de ondas, estender o domínio do modelo de ondas nos extremos dos sul e norte de modelo que seja contemplada de maneira mais ampla as principais regiões de geração de ondas que atingem a costa leste da América do Sul e assim melhorar a sua representatividade através de uma resolução espacial mais adequada.

Por fim, regionalizações climáticas e projeções de onda precisam estar em constante atualização. Primeiro que somente com o detalhamento do impacto da mudança climática ao nível local será possível tomar medidas no sentido de aumentar a resiliência de regiões vulneráveis. E segundo e mais alarmante é a necessidade cada vez mais frequente de revisar as premissas dos cenários de aquecimento para condições mais pessimistas.



## Referências Bibliográficas

- Alves J. H. G. d. M., Ribeiro E. O., Matheson G. S. G., Lima J. A. M., Ribeiro C. E. P., Reconstituição do Clima de Ondas no Sul-Sudeste Brasileiro entre 1997 e 2005, *Revista Brasileira de Geofísica*, 2009, vol. 27, p. 427
- Ambrizzi T., Reboita M. S., da Rocha R. P., Llopart M., The state-of-the-art and fundamental aspects of regional climate modeling in South America, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2018, vol. Special Issue: Climate Sciences
- American Petroleum Institute, 2007 Recommended Practice API RP 2MET API RP 2MET, Recommended Practice 2MET Derivation of Metocean Design and Operating Conditions ISO 19901-1:2005 (Modified). American Petroleum Institute
- Amores A., Marcos M., Ocean Swells along the Global Coastlines and Their Climate Projections for the Twenty-First Century, *Journal of Climate*, 2020, vol. 33, p. 9819
- Ardhuin F., Rogers E., Babanin A. V., Filipot J.-F., Magne R., Roland A., van der Westhuysen A., Queffelec P., Lefevre J.-M., Aouf L., Collard F., Semiempirical Dissipation Source Functions for Ocean Waves. Part I: Definition, Calibration, and Validation, *Journal of Physical Oceanography*, 2010, vol. 40, p. 1917–1941
- Badriana M. R., Lee H. S., Multimodel Ensemble Projections of Wave Climate in the Western North Pacific Using CMIP6 Marine Surface Winds, *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, vol. 9, p. 835
- Bitner-Gregersen E. M., Vanem E., Gramstad O., Hørte T., Aarnes O. J., Reistad M., Breivik [U+FFFF], Magnusson A. K., Natvig B., Climate change and safe design of ship structures, *Ocean Engineering*, 2018, vol. 149, p. 226–237

- Campos R., Alves J., Guedes Soares C., Guimaraes L., Parente C., Extreme wind-wave modeling and analysis in the south Atlantic ocean, *Ocean Modelling*, 2018, vol. 124, p. 75
- Candella R. N., Innocentini V., Caetano Neto E. S., SISPRON - Sistema de Previsão de Ondas. In *Anais do X Simpósio da Associação Brasileira de Recursos Hídricos*, Gramado, 1993
- Cardoso A. A., Rocha R. P., Crespo N. M., Synoptic Climatology of Subtropical Cyclone Impacts on Near[2010]Surface Winds Over the South Atlantic Basin, *Earth and Space Science*, 2022, vol. 9, p. 1
- Casas-Prat M., Wang X. L., Swart N., CMIP5-based global wave climate projections including the entire Arctic Ocean, *Ocean Modelling*, 2018, vol. 121, p. 116
- Cavalcanti I. F. d. A., Ferreira N. J., Dias M. A. F. d. S., Silva M. G. A. J. d., *Tempo e clima no Brasil. Oficina de Textos*, 2009, 463 p.
- Collins W. J., Bellouin N., Doutriaux-Boucher M., Gedney N., Halloran P., Hinton T., Hughes J., Jones C. D., Joshi M., Liddicoat S., Martin G., O'Connor F., Rae J., Senior C., Sitch S., Totterdell I., Wiltshire A., Woodward S., Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2, *Geoscientific Model Development*, 2011, vol. 4, p. 1051–1075
- Crespo N. M., da Silva N. P., Palmeira R. M. J., Cardoso A. A., Kaufmann C. L. G., Lima J. A. M., Andrioni M., de Camargo R., da Rocha R. P., Western South Atlantic Climate Experiment (WeSACEx): Extreme Winds and Waves over the Southeastern Brazilian Sedimentary Basins, *Climate Dynamics*, 2023, vol. 60, p. 571
- da Rocha R. P., Reboita M. S., Dutra L. M. M., Llopart M. P., Coppola E., Interannual variability associated with ENSO: present and future climate projections of RegCM4 for South America-CORDEX domain, *Climatic Change*, 2014, vol. 125, p. 95–109
- da Silva N. P., Crespo N. M., Kaufmann C. L. G., Lima J. A. M., Andrioni M., de Camargo R., da Rocha R. P., Adjustment of Extreme Wind Speed in Regional Climate Downscaling over Southwestern South Atlantic, *International Journal of Climatology*, 2022

- de Jesus E. M., da Rocha R. P., Crespo N. M., Reboita M. S., Gozzo L. F., Multi-model climate projections of the main cyclogenesis hot-spots and associated winds over the eastern coast of South America, *Climate Dynamics*, 2020, vol. 56, p. 537–557
- de Sa Cotrim C., Semedo A., Lemos G., Brazil Wave Climate from a High-Resolution Wave Hindcast, *Climate*, 2022, vol. 10, p. 53
- Dee D. P., Uppala S. M., Simmons A. J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M. A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A. C. M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A. J., Haimberger L., Healy S. B., Hersbach H., Holm E. V., Isaksen L., Kallberg P., Kohler M., Matricardi M., McNally A. P., Monge-Sanz B. M., Morcrette J. J., Park B. K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thepaut J. N., Vitart F., The ERA [U+2010] Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, vol. 137, p. 553–597
- Dickinson R., Errico R., Giorgi F., Bates G., A regional climate model for the western United States, *Climatic Change*, 1989, vol. 15
- DNV, 2007 Technical report Recommended Practice DNV-RP-C205. Environmental Conditions and Environmental Loads
- Dobrynin M., Murawsky J., Yang S., Evolution of the global wind wave climate in CMIP5 experiments, *Geophysical Research Letters*, 2012, vol. Oceans
- Espindola R. L., Araújo A. M., Wave energy resource of Brazil: An analysis from 35 years of ERA-Interim reanalysis data, *PLOS ONE*, 2017, vol. 12, p. e0183501
- Fan Y., Lin S.-J., Griffies S. M., Hemer M. A., Simulated Global Swell and Wind-Sea Climate and Their Responses to Anthropogenic Climate Change at the End of the Twenty-First Century, *Journal of Climate*, 2014, vol. 27, p. 3516
- Field C., Barros V., Stocker T., Qin D., Dokken D., Ebi K., Mastrandrea M., Mach K., Plattner G.-K., Allen S., Tignor M., Midgley P., , 2012 Summary for Policymakers. Cambridge University Press Cambridge, UK, and New York, NY, USA pp 3–21

- Forristall G. Z., Cooper C., Design current profiles using empirical orthogonal function (EOF) and inverse FORM methods. In *Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, 1997, p. 11
- Franco B. C., Defeo O., Piola A. R., Barreiro M., Yang H., Ortega L., Gianelli I., Castello J. P., Vera C., Buratti C., Pájaro M., Pezzi L. P., Möller O. O., Climate change impacts on the atmospheric circulation, ocean, and fisheries in the southwest South Atlantic Ocean: a review, *Climatic Change*, 2020, vol. 162, p. 2359
- Franz G., Garcia C. A. E., Pereira J., de Freitas Assad L. P., Rollnic M., Garbossa L. H. P., da Cunha L. C., Lentini C. A. D., Nobre P., Turra A., Trotte-Duhá J. R., Cirano M., Estefen S. F., Lima J. A. M., Paiva A. M., Noernberg M. A., Tanajura C. A. S., Moutinho J. L., Campuzano F., Pereira E. S., Lima A. C., Mendonça L. F. F., Nocko H., Machado L., Alvarenga J. B. R., Martins R. P., Böck C. S., Toste R., Landau L., Miranda T., dos Santos F., Pellegrini J., Juliano M., Neves R., Polejack A., *Coastal Ocean Observing and Modeling Systems in Brazil: Initiatives and Future Perspectives*, *Frontiers in Marine Science*, 2021, vol. 8
- Gan M. A., Rao V. B., Surface Cyclogenesis over South America, *Monthly Weather Review*, 1991, vol. 119, p. 1293–1302
- Giorgetta M. A., Jungclaus J., Reick C. H., Legutke S., Bader J., Böttinger M., Brovkin V., Crueger T., Esch M., Fieg K., Glushak K., Gayler V., Haak H., Hollweg H., Ilyina T., Kinne S., Kornblueh L., Matei D., Mauritsen T., Mikolajewicz U., Mueller W., Notz D., Pithan F., Raddatz T., Rast S., Redler R., Roeckner E., Schmidt H., Schnur R., Segsneider J., Six K. D., Stockhause M., Timmreck C., Wegner J., Widmann H., Wieners K., Claussen M., Marotzke J., Stevens B., *Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI[U+2010]ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5*, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2013, vol. 5, p. 572–597
- Giorgi F., Coppola E., Solmon F., Mariotti L., Sylla M., Bi X., Elguindi N., Diro G., Nair V., Giuliani G., Turuncoglu U., Cozzini S., Güttler I., O'Brien T., Tawfik A., Shalaby A., Zakey A., Steiner A., Stordal F., Sloan L., Brankovic C., *RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains*, *Climate Research*, 2012, vol. 52, p. 7–29

- Giorgi F., Mearns L. O., Introduction to special section: Regional Climate Modeling Revisited, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, vol. 104, p. 6335
- Gozzo L. F., da Rocha R. P., Reboita M. S., Sugahara S., Subtropical Cyclones over the Southwestern South Atlantic: Climatological Aspects and Case Study, *Journal of Climate*, 2014, vol. 27, p. 8543–8562
- Gramscianinov C., Campos R., Guedes Soares C., de Camargo R., Extreme waves generated by cyclonic winds in the western portion of the South Atlantic Ocean, *Ocean Engineering*, 2020, vol. 213, p. 107745
- Gramscianinov C. B., de Camargo R., Campos R. M., Soares C. G., da Silva Dias P. L., Impact of extratropical cyclone intensity and speed on the extreme wave trends in the Atlantic Ocean, *Climate Dynamics*, 2022, vol. 60, p. 1447
- Gramscianinov C. B., Staneva J., Souza C. R. G., Linhares P., de Camargo R., da Silva Dias P. L., Recent changes in extreme wave events in the south-western South Atlantic, *State of the Planet*, 2023, vol. 1-osr7, p. 12
- Hemer M. A., Church J. A., Hunter J. R., Variability and trends in the directional wave climate of the Southern Hemisphere, *International Journal of Climatology*, 2010, vol. 30, p. 475
- Hemer M. A., Fan Y., Mori N., Semedo A., Wang X. L., Projected changes in wave climate from a multi-model ensemble, *Nature Climate Change*, 2013, vol. 3, p. 471
- Hemer M. A., Wang X. L., Weisse R., Swail V. R., Advancing Wind-Waves Climate Science: The COWCLIP Project, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, vol. 93, p. 791–796
- Hersbach H., Bell B., Berrisford The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, vol. 146, p. 1999–2049
- Hosking J. R. M., L[U+2010] Moments: Analysis and Estimation of Distributions Using Linear Combinations of Order Statistics, *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 1990, vol. 52, p. 105–124

- Hussain M., Mahmud I., pyMannKendall: a python package for non parametric Mann Kendall family of trend tests., *Journal of Open Source Software*, 2019, vol. 4, p. 1556
- Innocentini V., Caetano Neto E. d. S., A Case Study of the 9 August 1988 South Atlantic Storm: Numerical Simulations of the Wave Activity, *Weather and Forecasting*, 1996, vol. 11, p. 78
- IPCC Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Geneva, Switzerland, 2014, 151
- IPCC IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland., 2023
- ISO19901-1, 2013 Petroleum and natural gas industries – Specific requirements for offshore structures – Part 1: Metocean design and operating considerations
- Jaagus J., Sepp M., Tamm T., Järvet A., Mõisja K., Trends and regime shifts in climatic conditions and river runoff in Estonia during 1951–2015, *Earth System Dynamics*, 2017, vol. 8, p. 963–976
- Jacob D., Barring L., Christensen O. B., Christensen J. H., de Castro M., Déqué M., Giorgi F., Hagemann S., Hirschi M., Jones R., Kjellström E., Lenderink G., Rockel B., Sánchez E., Schär C., Seneviratne S. I., Somot S., van Ulden A., van den Hurk B., An inter-comparison of regional climate models for Europe: model performance in present-day climate, *Climatic Change*, 2007, vol. 81, p. 31–52
- Kaiser J., Nogueira I. C. M., Campos R. M., Parente C. E., Martins R. P., Belo W. C., Evaluation of wave model performance in the South Atlantic Ocean: a study about physical parameterization and wind forcing calibration, *Ocean Dynamics*, 2022, vol. 72, p. 137–150
- Kendall M., Rank Correlation Methods 4th edn. Charles Griffin London, 1975

- Law-Chune S., Aouf L., Dalphinnet A., Levier B., Drillet Y., Drevillon M., WAVERYS: a CMEMS global wave reanalysis during the altimetry period, *Ocean Dyn.*, 2021, vol. 71, p. 357
- Lemos G., Menendez M., Semedo A., Camus P., Hemer M., Dobrynin M., Miranda P. M., On the need of bias correction methods for wave climate projections, *Global and Planetary Change*, 2020, vol. 186, p. 103109
- Liu Q., Wan S., Gu B., A Review of the Detection Methods for Climate Regime Shifts, *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2016, vol. 2016, p. 1–10
- Llopart M., Coppola E., Giorgi F., da Rocha R. P., Cuadra S. V., Climate change impact on precipitation for the Amazon and La Plata basins, *Climatic Change*, 2014, vol. 125, p. 111–125
- Lobeto H., Menendez M., Losada I. J., Future behavior of wind wave extremes due to climate change, *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, p. 7869
- Maia N. Z., Almeida L. P., Emmendorfer L., Nicolodi J. L., Calliari L., Wave climate trends and breakpoints during the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) in southern Brazil, *Ocean and Coastal Research*, 2022, vol. 70
- Maia N. Z., Almeida L. P., Nicolodi J. L., Calliari L., Castelle B., Long-term trends and wave climate variability in the South Atlantic Ocean: The influence of climate indices, *Regional Studies in Marine Science*, 2023, vol. 66, p. 103131
- Mann H. B., Nonparametric Tests Against Trend, *Econometrica*, 1945, vol. 13, p. 245
- Marengo J., F Scarano C G Souza SC Chou AF Klein, 2012 Technical report Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.36042.16329>
- Marengo J., Muller-Karger F., Pelling M., Reynolds C. J., Merrill S. B., Nunes L. H., Paterson S., Gray A. J., Lockman J. T., Kartez J., Moreira F. A., Greco R., Harari J., Souza C. R. G., Alves L. M., Hosokawa E. K., Tabuchi E. K., An Integrated Framework

- to Analyze Local Decision Making and Adaptation to Sea Level Rise in Coastal Regions in Selsey (UK), Broward County (USA), and Santos (Brazil), *American Journal of Climate Change*, 2017, vol. 06, p. 403
- Martins R. P., Dereczynski C., Kaiser J., Vasconcellos F., Gallo M., da Silveira I., Dottori M., , 2022 Technical report Projeto de Caracterização Regional da Bacia de Santos PCR-BS: Meteorologia e Oceanografia Física da Bacia de Santos <https://comunicabaciadesantos.petrobras.com.br/projeto-de-caracterizacao-regional-da-bacia-de-santos> PETROBRAS
- Martins R. P., Grossmann-Matheson G. S., *Meteorology and Oceanography: Regional Environmental Characterization of the Campos Basin, Southwest Atlantic. Habitats Series*, v. 2, Elsevier Rio de Janeiro, 2017, 254 p.
- Mears C., Lee T., Ricciardulli L., Wang X., Wentz F., , 2022 RSS Cross-Calibrated Multi-Platform (CCMP) 6-hourly ocean vector wind analysis on 0.25 deg grid, Version 3.0
- Meinshausen M., Smith S. J., Calvin K., Daniel J. S., Kainuma M. L. T., Lamarque J.-F., Matsumoto K., Montzka S. A., Raper S. C. B., Riahi K., Thomson A., Velders G. J. M., van Vuuren D. P., The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300, *Climatic Change*, 2011, vol. 109, p. 213–241
- Melo Filho E., The Sea Sentinels Project: Watching Waves In Brazil. In *Proceedings of COASTAL ZONE '93* , vol. 1, Saint Louis, USA, 1993, p. 505
- Meucci A., Young I. R., Hemer M., Kirezci E., Ranasinghe R., Projected 21st century changes in extreme wind-wave events, *Sci Adv*, 2020, vol. 6, p. eaaz7295
- Ministério do Meio Ambiente, MMA, 2018 Technical report Sistema de Modelagem Costeira - Ondas <http://www.mma.gov.br/publicacoes/P964s>. MMA Brasília-DF
- Mori N., Yasuda T., Mase H., Tom T., Oku Y., Projection of Extreme Wave Climate Change under Global Warming, *Hydrological Research Letters*, 2010, vol. 4, p. 15
- Morim J., Hemer M., Wang X. L., Cartwright N., Trenham C., Semedo A., Young I., Bricheno L., Camus P., Casas-Prat M., Erikson L., Mentaschi L., Mori N., Shimura T., Timmermans B., Aarnes O., Øyvind Breivik Behrens A., Dobrynin M., Menendez M.,

- Staneva J., Wehner M., Wolf J., Kamranzad B., Andutta F., Robustness and uncertainties in global multivariate wind-wave climate projections, *Nature Climate Change*, 2019, vol. 9, p. 711
- Morim J., Vitousek S., Hemer M., Reguero B., Erikson L., Casas-Prat M., Wang X. L., Semedo A., Mori N., Shimura T., Mentaschi L., Timmermans B., Global-scale changes to extreme ocean wave events due to anthropogenic warming, *Environmental Research Letters*, 2021, vol. 16, p. 074056
- Mosquera-Mosquera I., Simão M. L., Videiro P. M., Sagrilo L. V., Evaluating the impact of climate change on offshore structures design: A practical case study, *Applied Ocean Research*, 2020, vol. 94, p. 101992
- Muehe D., Brazilian coastal vulnerability to climate change, *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, 2010, vol. 5, p. 173
- NORSOK, 2017 Standard N-003: Action and Action Effects. NORSOK rev 3 edn
- Palmeira R. M. J., Climatologia de Ciclones Extratropicais na Região da América do Sul, Dep. de Meteorologia, UFRJ, 2003, Monografia de graduação, 39 p.
- Parente C. E., DAAT - Uma nova técnica adaptativa para análise direcional de ondas. In *Anais do II Encontro de Ondas e Marés*, Arraial do Cabo, 1997
- Parente C. E., Souza M. H. S., Wave Climate off Rio de Janeiro. In *Proceedings do 21st Coastal Engineering Conference*, Malaga, 1989
- Perez J., Menendez M., Losada I. J., GOW2: A global wave hindcast for coastal applications, *Coastal Engineering*, 2017, vol. 124, p. 1–11
- Pianca C., Mazzini P. L. F., Siegle E., Brazilian Offshore Wave Climate Based on NWW3 Reanalysis, *Brazilian Journal of Oceanography*, 2010, vol. 58, p. 53
- Quetzalcóatl O., González M., Cánovas V., Medina R., Espejo A., Klein A., Tessler M., Almeida L., Jaramillo C., Garnier R., Kakeh N., González-Ondina J., SMC, a coastal modeling system for assessing beach processes and coastal interventions: Application to the Brazilian coast, *Environmental Modelling & Software*, 2019, vol. 116, p. 131

- Reboita M. S., da Rocha R. P., de Souza M. R., Llopart M., Extratropical cyclones over the southwestern South Atlantic Ocean: HadGEM2[U+2010]ES and RegCM4 projections, *International Journal of Climatology*, 2018, vol. 38, p. 2866–2879
- Reguero B. G., Losada I. J., Díaz-Simal P., Méndez F. J., Beck M. W., Effects of Climate Change on Exposure to Coastal Flooding in Latin America and the Caribbean, *PLOS ONE*, 2015, vol. 10, p. e0133409
- Rodionov S. N., A sequential algorithm for testing climate regime shifts, *Geophysical Research Letters*, 2004, vol. 31
- Rodrigues R. R., Taschetto A. S., Gupta A. S., Foltz G. R., Common cause for severe droughts in South America and marine heatwaves in the South Atlantic, *Nature Geoscience*, 2019, vol. 12, p. 620
- Saha S., Moorthi S., Pan H.-L., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Kistler R., Woollen J., Behringer D., Liu H., Stokes D., Grumbine R., Gayno G., Wang J., Hou Y.-T., Chuang H.-y., Juang H.-M. H., Sela J., Iredell M., Treadon R., Kleist D., Van Delst P., Keyser D., Derber J., Ek M., Meng J., Wei H., Yang R., Lord S., van den Dool H., Kumar A., Wang W., Long C., Chelliah M., Xue Y., Huang B., Schemm J.-K., Ebisuzaki W., Lin R., Xie P., Chen M., Zhou S., Higgins W., Zou C.-Z., Liu Q., Chen Y., Han Y., Cucurull L., Reynolds R. W., Rutledge G., Goldberg M., The NCEP Climate Forecast System Reanalysis, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2010, vol. 91, p. 1015–1058
- Semedo A., Sušelj K., Rutgersson A., Sterl A., A Global View on the Wind Sea and Swell Climate and Variability from ERA-40, *Journal of Climate*, 2011, vol. 24, p. 1461
- Semedo Á., Weisse R., Behrens A., Sterl A., Bengtsson L., Günther H., Projection of Global Wave Climate Change toward the End of the Twenty-First Century, *Journal of Climate*, 2012, vol. 25, p. 8269
- Sen P. K., Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau, *Journal of the American Statistical Association*, 1968, vol. 63, p. 1379–1389
- Silva A. P., Klein A. H. F., Fetter-Filho A. F. H., Hein C. J., Méndez F. J., Broggio M. F.,

- Dalinghaus C., Climate-induced variability in South Atlantic wave direction over the past three millennia, *Scientific Reports*, 2020, vol. 10
- Skamarock W., Klemp J., Dudhia J., Gill D., Barker D., Wang W., Huang X.-Y., Duda M., , 2008 Technical report A Description of the Advanced Research WRF Version 3 <http://opensky.ucar.edu/islandora/object/technotes:500>
- Sterl A., Komen G. J., Cotton P. D., Fifteen years of global wave hindcasts using winds from the European Centre for Medium[+2010]Range Weather Forecasts reanalysis: Validating the reanalyzed winds and assessing the wave climate, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1998, vol. 103, p. 5477–5492
- Stopa J. E., Cheung K. F., Periodicity and patterns of ocean wind and wave climate, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, vol. 119, p. 5563
- Tapiador F. J., Navarro A., Moreno R., Sánchez J. L., García-Ortega E., Regional climate models: 30 years of dynamical downscaling, *Atmospheric Research*, 2020, vol. 235, p. 104785
- Taylor K. E., Stouffer R. J., Meehl G. A., An Overview of CMIP5 and the Experiment Design, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, vol. 93, p. 485–498
- Tolman H. L., Alleviating the Garden Sprinkler Effect in wind wave models, *Ocean Modelling*, 2002, vol. 4, p. 269–289
- Tucker M., Pitt E., *Waves in Ocean Engineering*. Elsevier Amsterdam, 2001
- van Vuuren D., Edmonds J., Kainuma M., outros The Representative Concentration Pathways: An Overview, *Climatic Change*, 2011, vol. 109
- Vanem E., Joint statistical models for significant wave height and wave period in a changing climate, *Marine Structures*, 2016, vol. 49, p. 180
- Violante-Carvalho N., Parente C. E., Investigation of the Wave Climate in Campos Basin, Rio de Janeiro - Brazil and its Correlation with the Meteorological Situations. In *Proceedings do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia* , 1998
- Wang X. L., Feng Y., Swail V. R., Changes in global ocean wave heights as projected using multimodel CMIP5 simulations, *Geophysical Research Letters*, 2014, vol. 41, p. 1026

- Wang X. L., Swail V. R., Cox A., Dynamical versus statistical downscaling methods for ocean wave heights, *International Journal of Climatology*, 2009, vol. 30, p. 317
- WAVEWATCH III R Development Group (WW3DG), 2019 Tech. Note 333 User manual and system documentation of WAVEWATCH III R version 6.07. NOAA/NWS/NCEP/MMAB College Park, MD, USA
- Wilby R., Wigley T., Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations, *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 1997, vol. 21, p. 530–548
- Winterstein S. R., Ude T. C., Cornell C. A., Bjerager P., Haver S., Environmental parameters for extreme response: Inverse form with omission factors. In *Proceedings, ICOS-SAR'93*, Innsbruck, Austria, 1993
- Young I., Seasonal variability of the global ocean wind and wave climate, *International Journal of Climatology*, 1999, vol. 19, p. 931–950
- Young I. R., Babanin A. V., Zieger S., Response to Comment on “Global Trends in Wind Speed and Wave Height”, *Science*, 2011, vol. 334, p. 905

# Apêndice



## Apêndice A

---

### Mapas sazonais de diferença média e percentil 95

#### *A.1 Altura Significativa de Ondas*

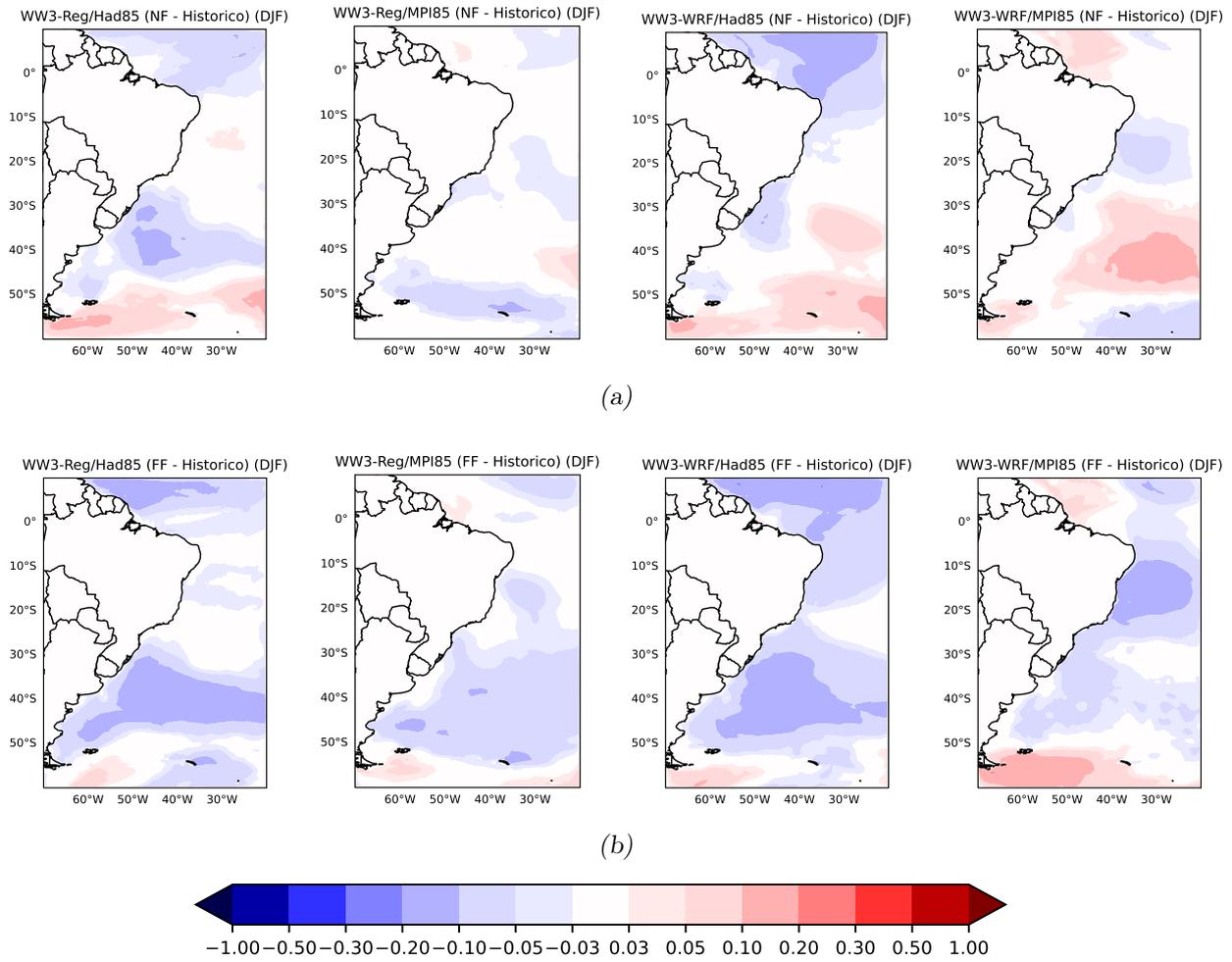


Figura A.1: Mapas de diferença entre o campo médio dos meses de dezembro, janeiro e fevereiro (DJF) da Altura Significativa de Onda (metros) entre o futuro próximo de 2006 a 2030 NF (a), futuro distante de 2031 a 2060 - FF (b).

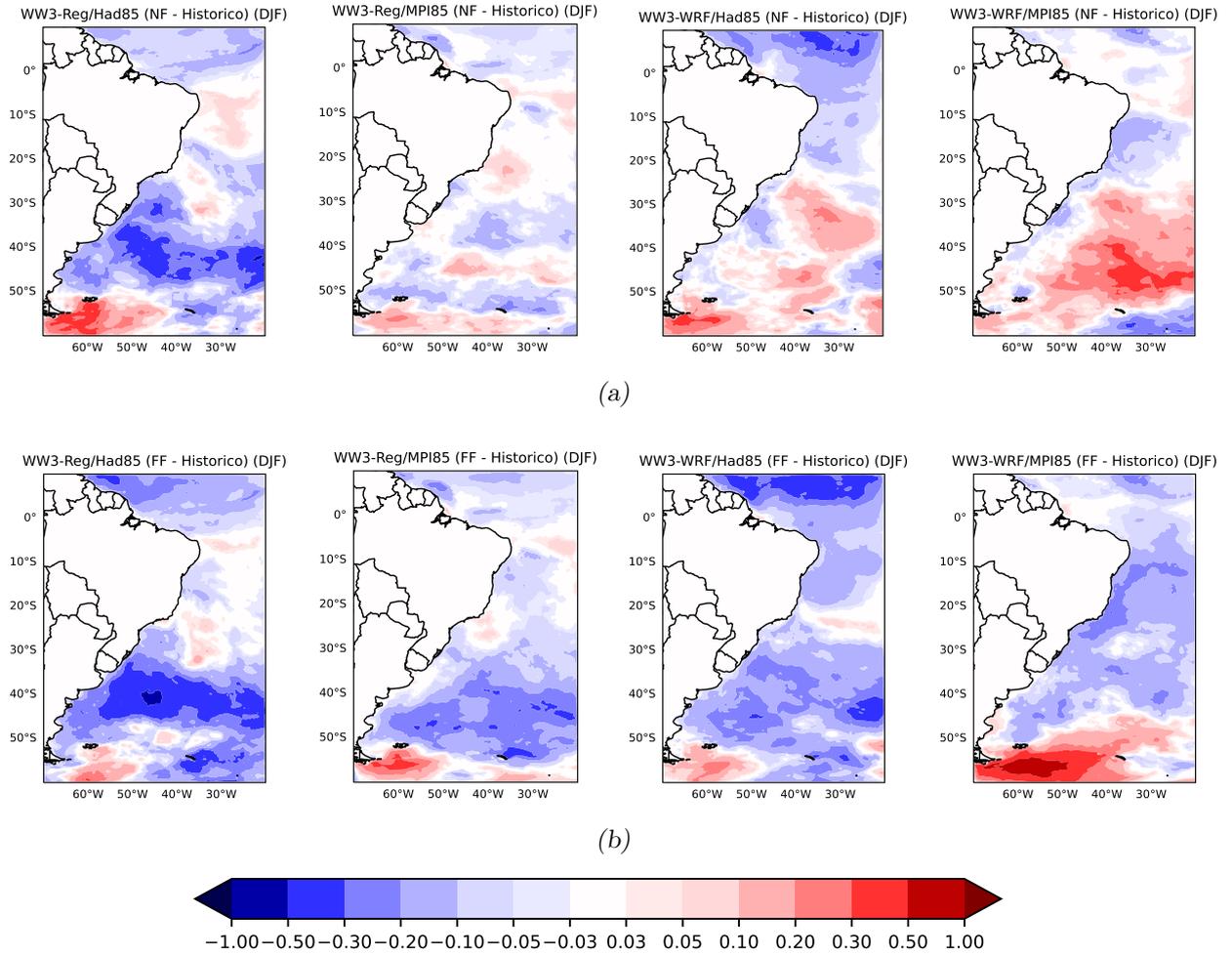


Figura A.2: Mapas de diferença entre o campo do p95 dos meses de dezembro, janeiro e fevereiro (DJF) da Altura Significativa de Onda (metros) entre o futuro próximo de 2006 a 2030 NF (a), futuro distante de 2031 a 2060 - FF (b).

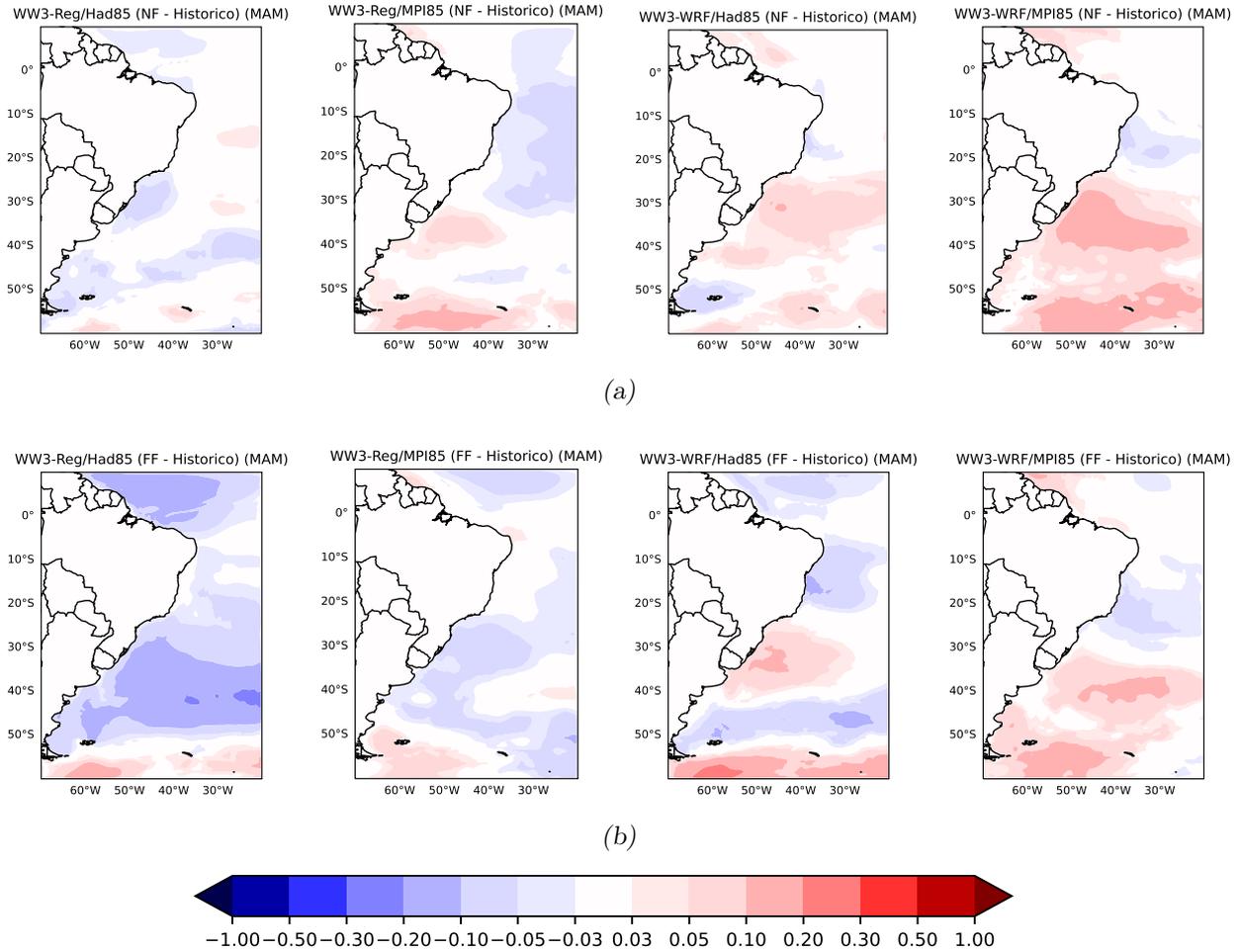


Figura A.3: Mapas de diferença entre o campo médio dos meses de março, abril e maio (MAM) da Altura Significativa de Onda (metros) entre o futuro próximo de 2006 a 2030 NF (a), futuro distante de 2031 a 2060 - FF (b).

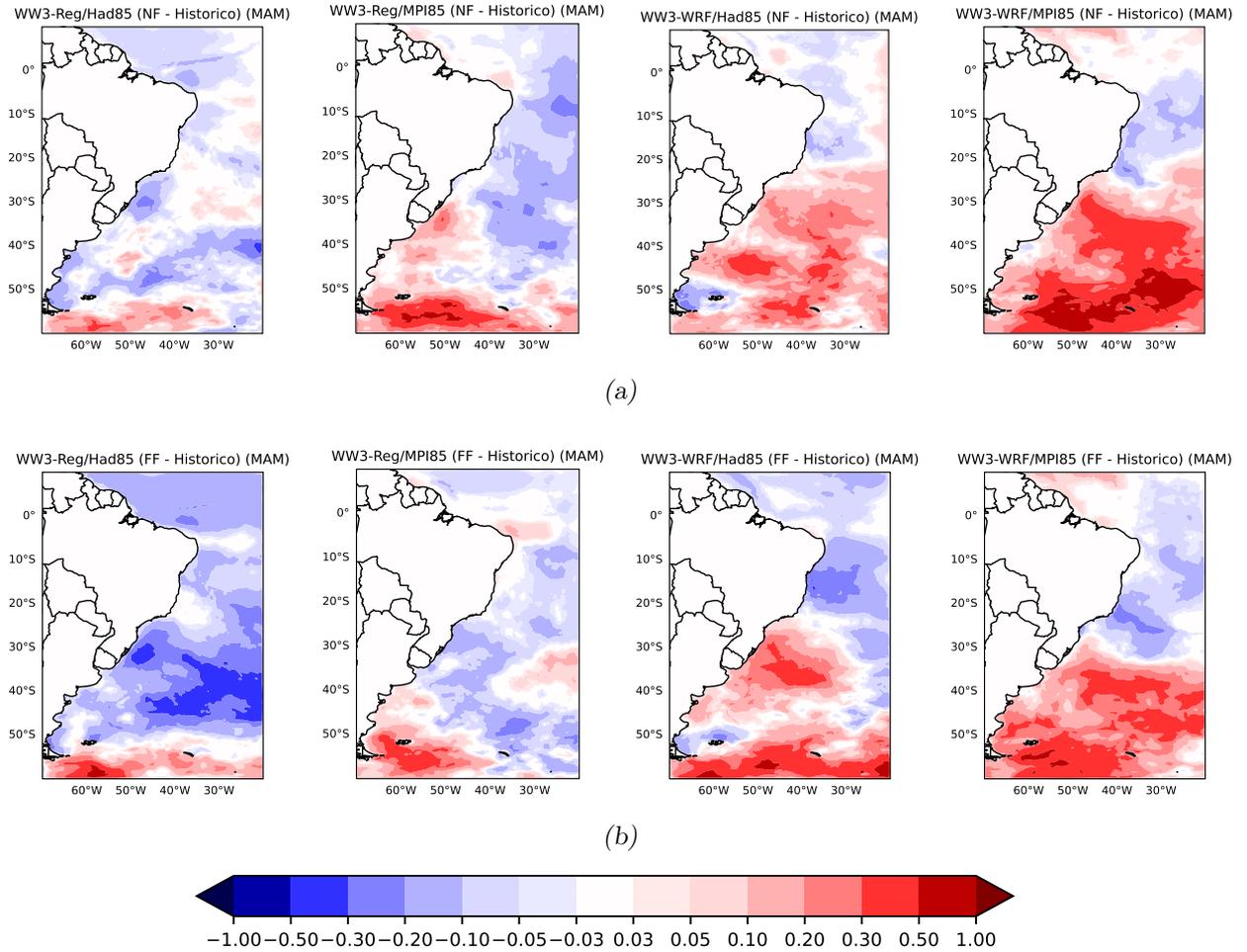


Figura A.4: Mapas de diferença entre o campo do p95 dos meses de março, abril e maio (MAM) da Altura Significativa de Onda (metros) entre o futuro próximo de 2006 a 2030 NF (a), futuro distante de 2031 a 2060 - FF (b).

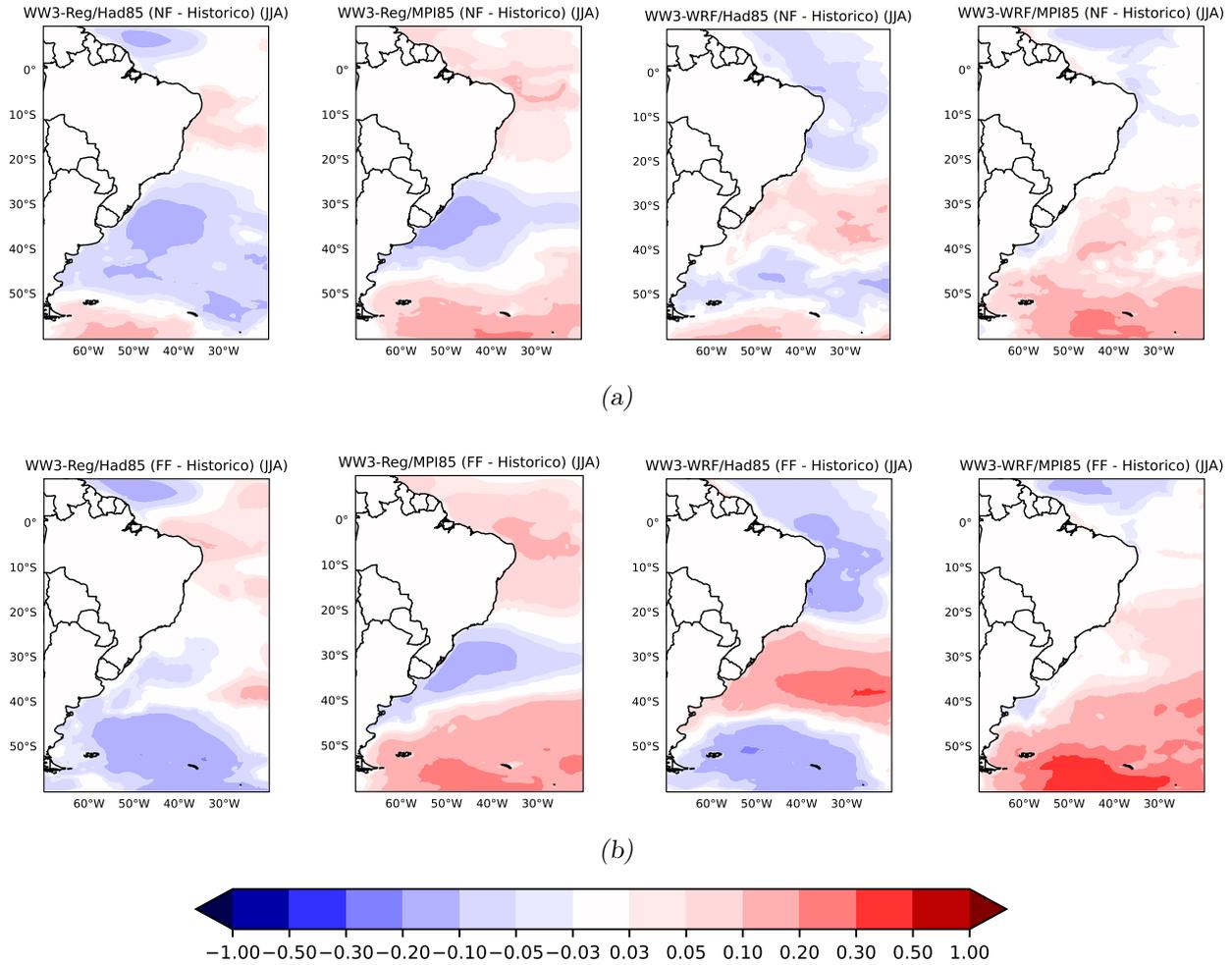


Figura A.5: Mapas de diferença entre o campo médio dos meses de junho, julho e agosto (JJA) da Altura Significativa de Onda (metros) entre o futuro próximo de 2006 a 2030 NF (a), futuro distante de 2031 a 2060 - FF (b).

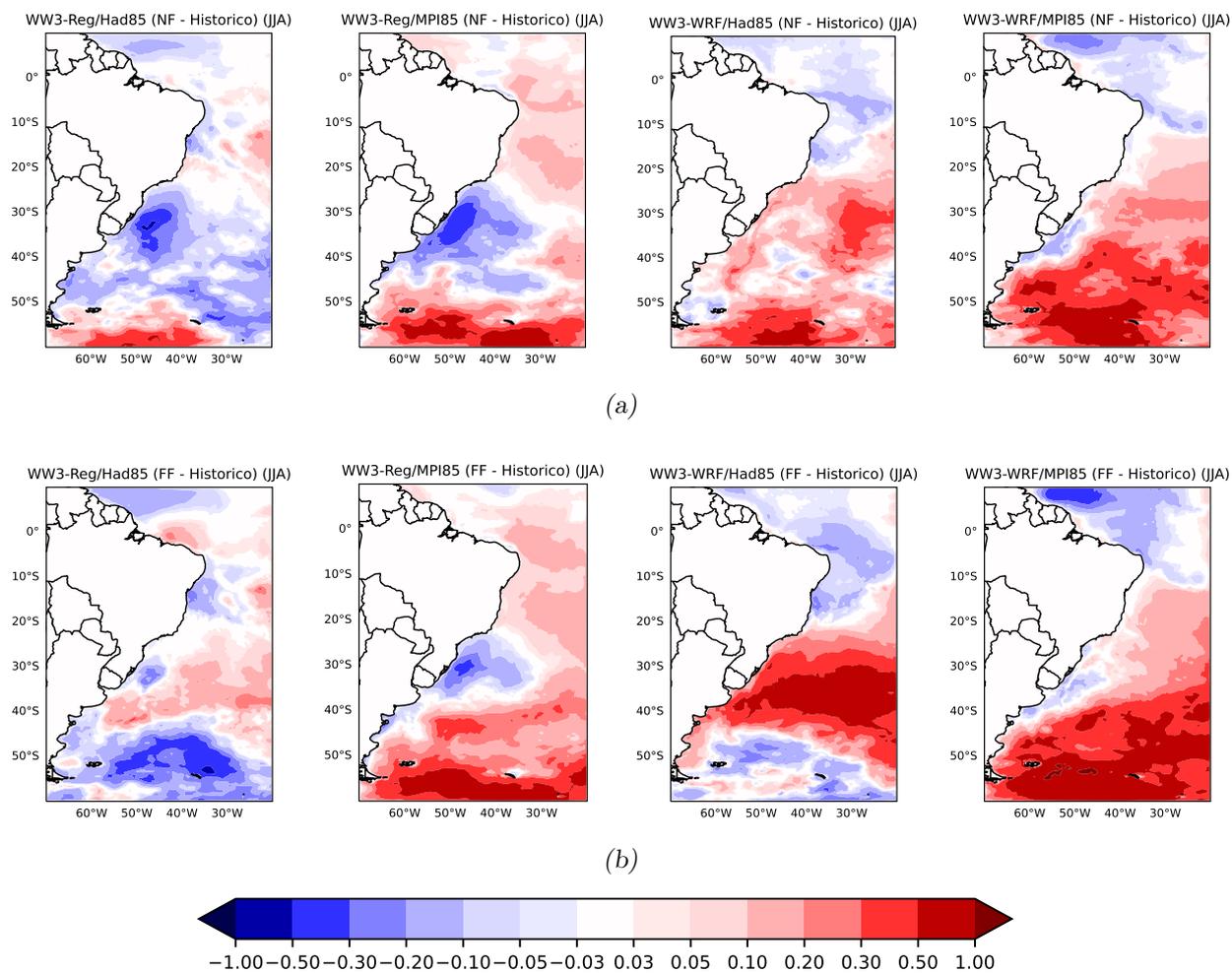


Figura A.6: Mapas de diferença entre o campo do p95 dos meses de junho, julho e agosto (JJA) da Altura Significativa de Onda (metros) entre o futuro próximo de 2006 a 2030 NF (a), futuro distante de 2031 a 2060 - FF (b).

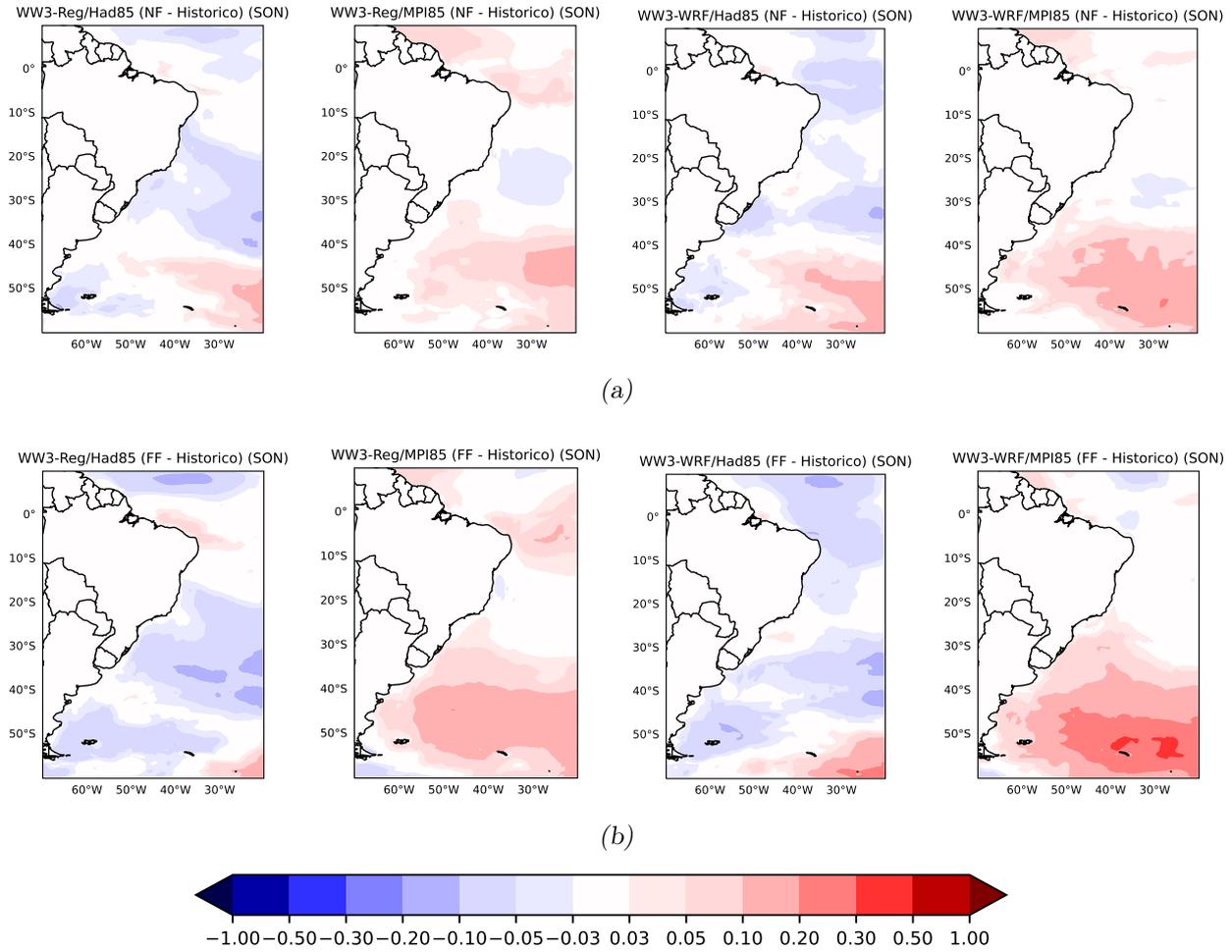


Figura A.7: Mapas de diferença entre o campo médio dos meses de setembro, outubro e novembro (SON) da Altura Significativa de Onda (metros) entre o futuro próximo de 2006 a 2030 NF (a), futuro distante de 2031 a 2060 - FF (b).

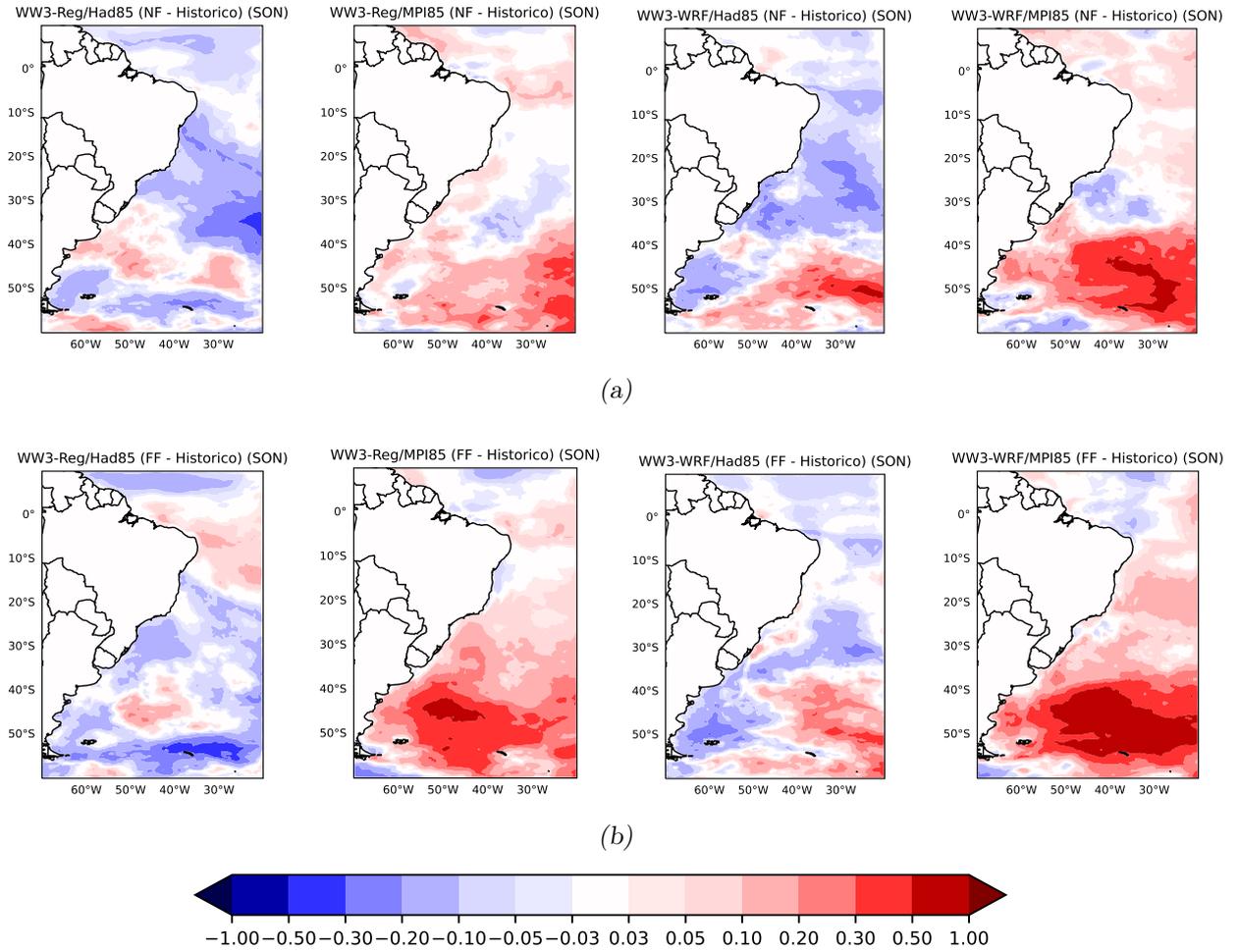


Figura A.8: Mapas de diferença entre o campo do p95 dos meses de setembro, outubro e novembro (SON) da Altura Significativa de Onda (metros) entre o futuro próximo de 2006 a 2030 NF (a), futuro distante de 2031 a 2060 - FF (b).

## A.2 *Período de Pico*

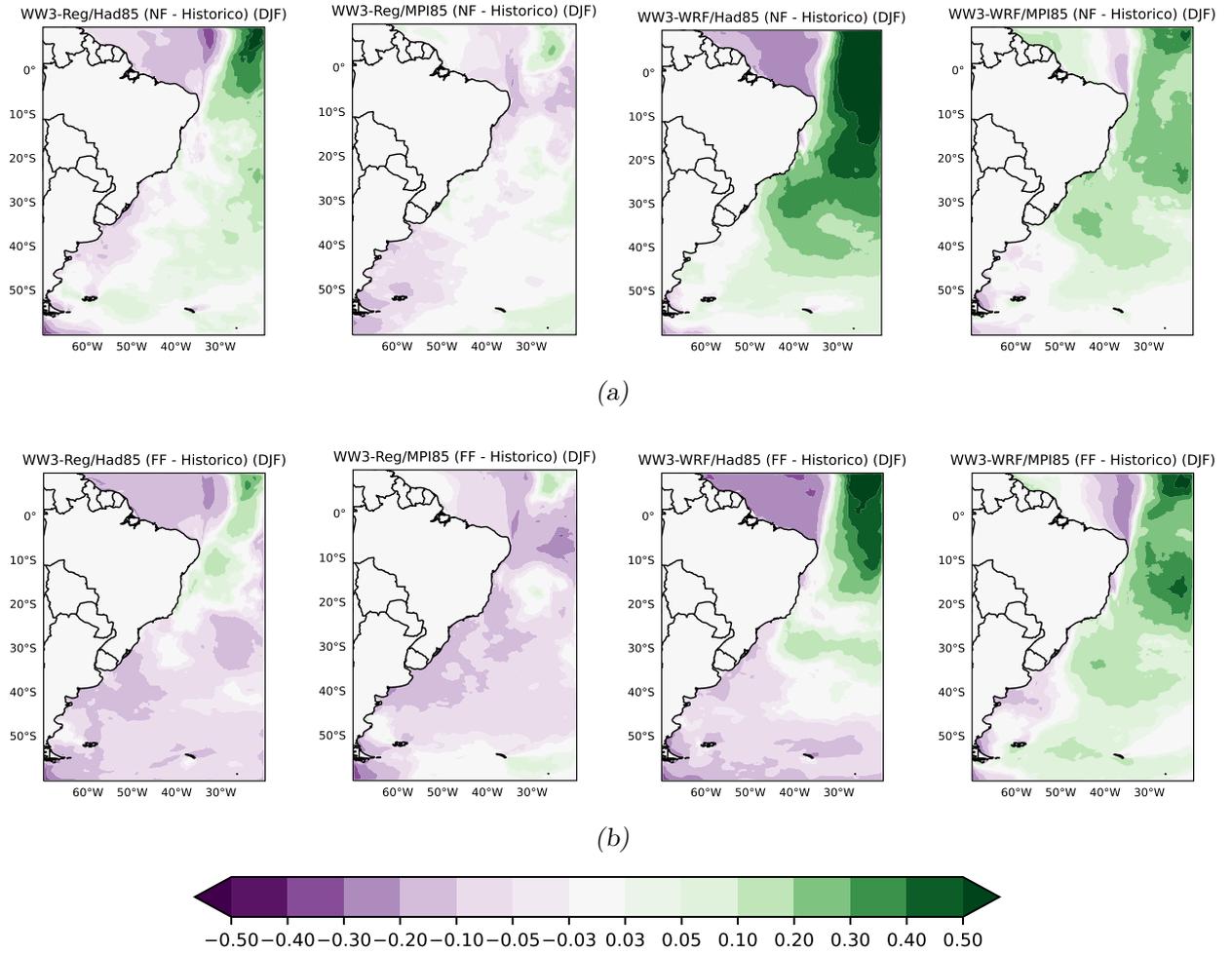


Figura A.9: Mapas de diferença entre o campo médio dos meses de dezembro, janeiro e fevereiro (DJF) do Período de Pico das Onda (segundos) entre o futuro próximo de 2006 a 2030 NF (a), futuro distante de 2031 a 2060 - FF (b).

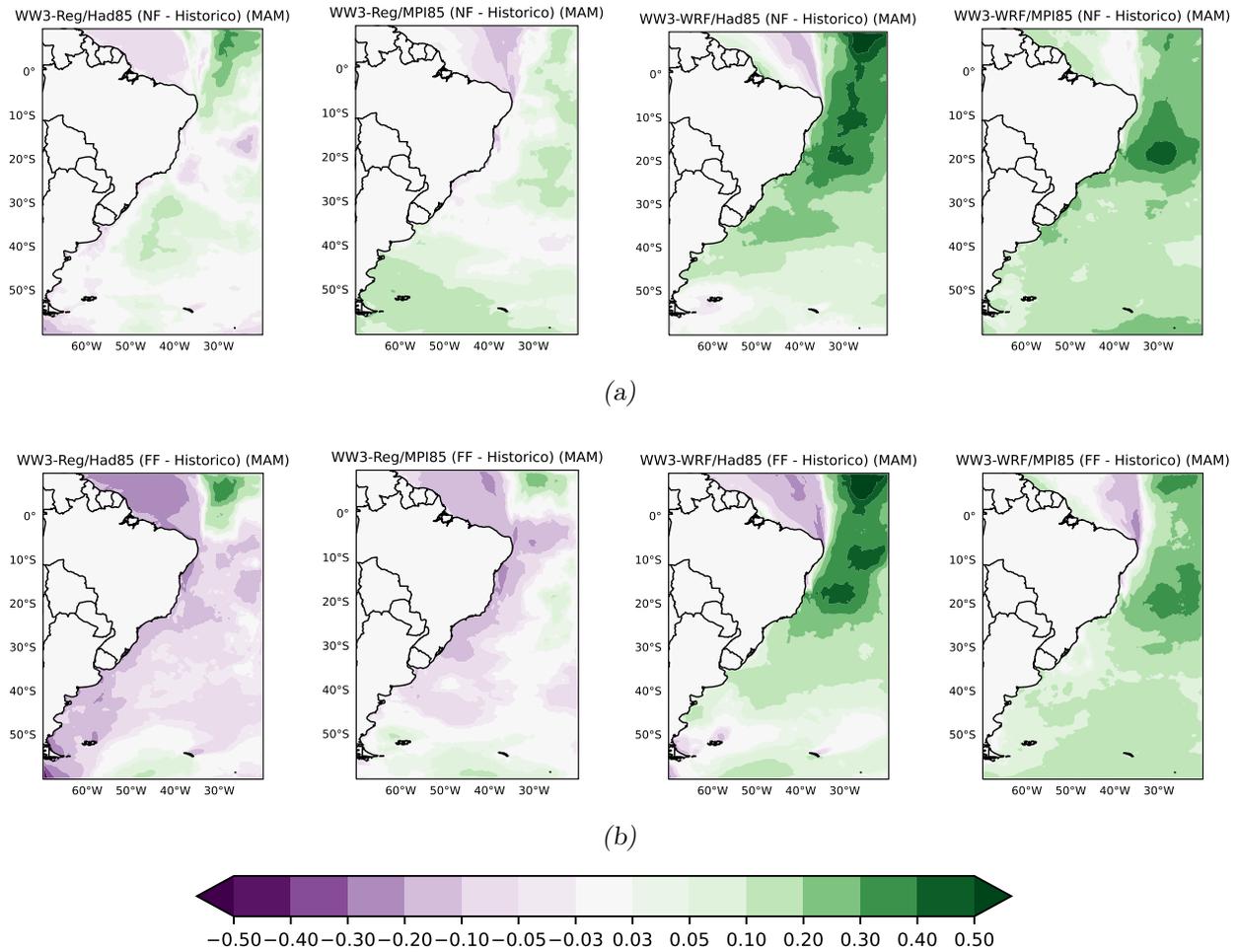


Figura A.10: Mapas de diferença entre o campo médio dos meses de março, abril e maio (MAM) do Período de Pico das Onda (segundos) entre o futuro próximo de 2006 a 2030 NF (a), futuro distante de 2031 a 2060 - FF (b).

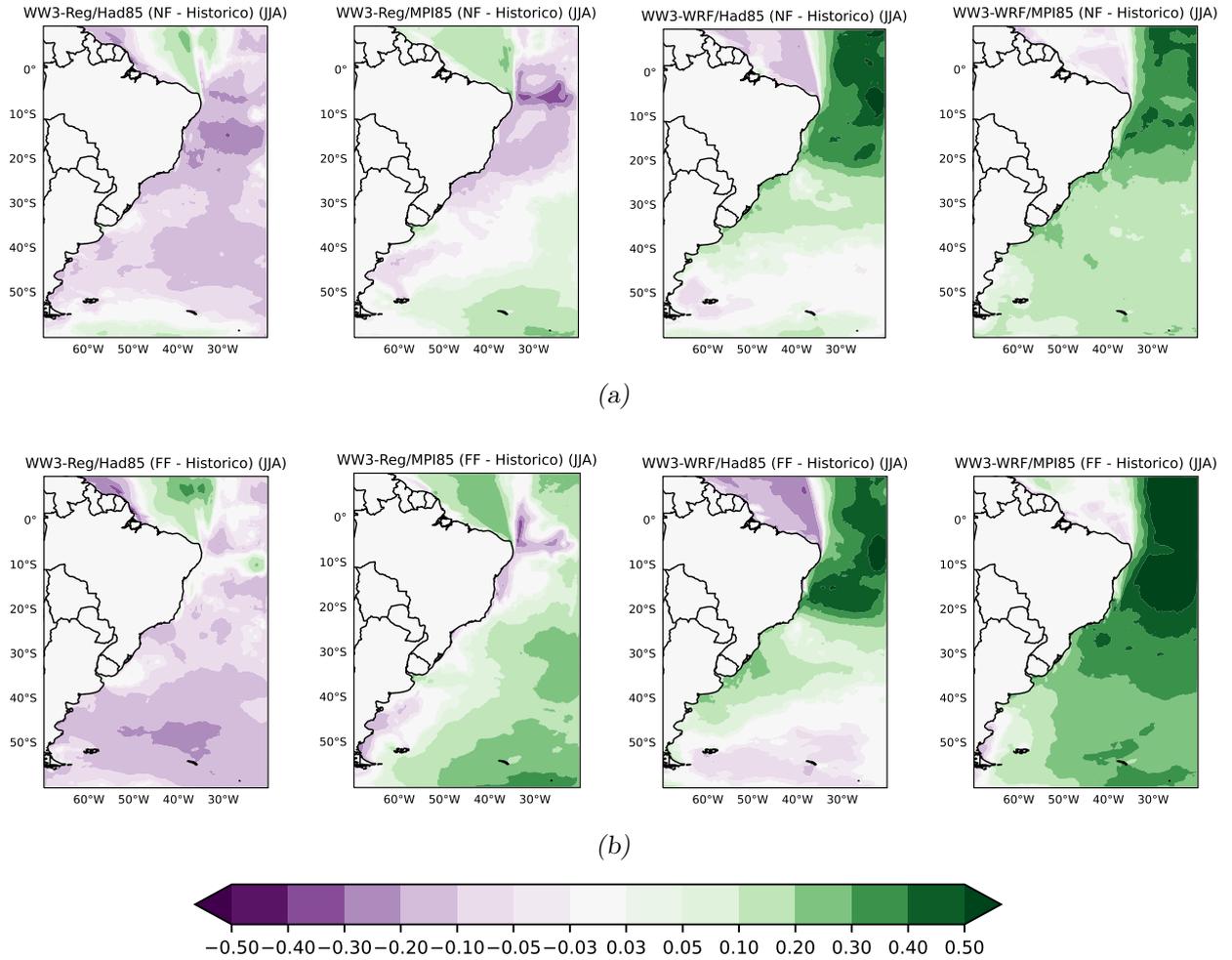


Figura A.11: Mapas de diferença entre o campo médio dos meses de junho, julho e agosto (JJA) do Período de Pico das Onda (segundos) entre o futuro próximo de 2006 a 2030 NF (a), futuro distante de 2031 a 2060 - FF (b).

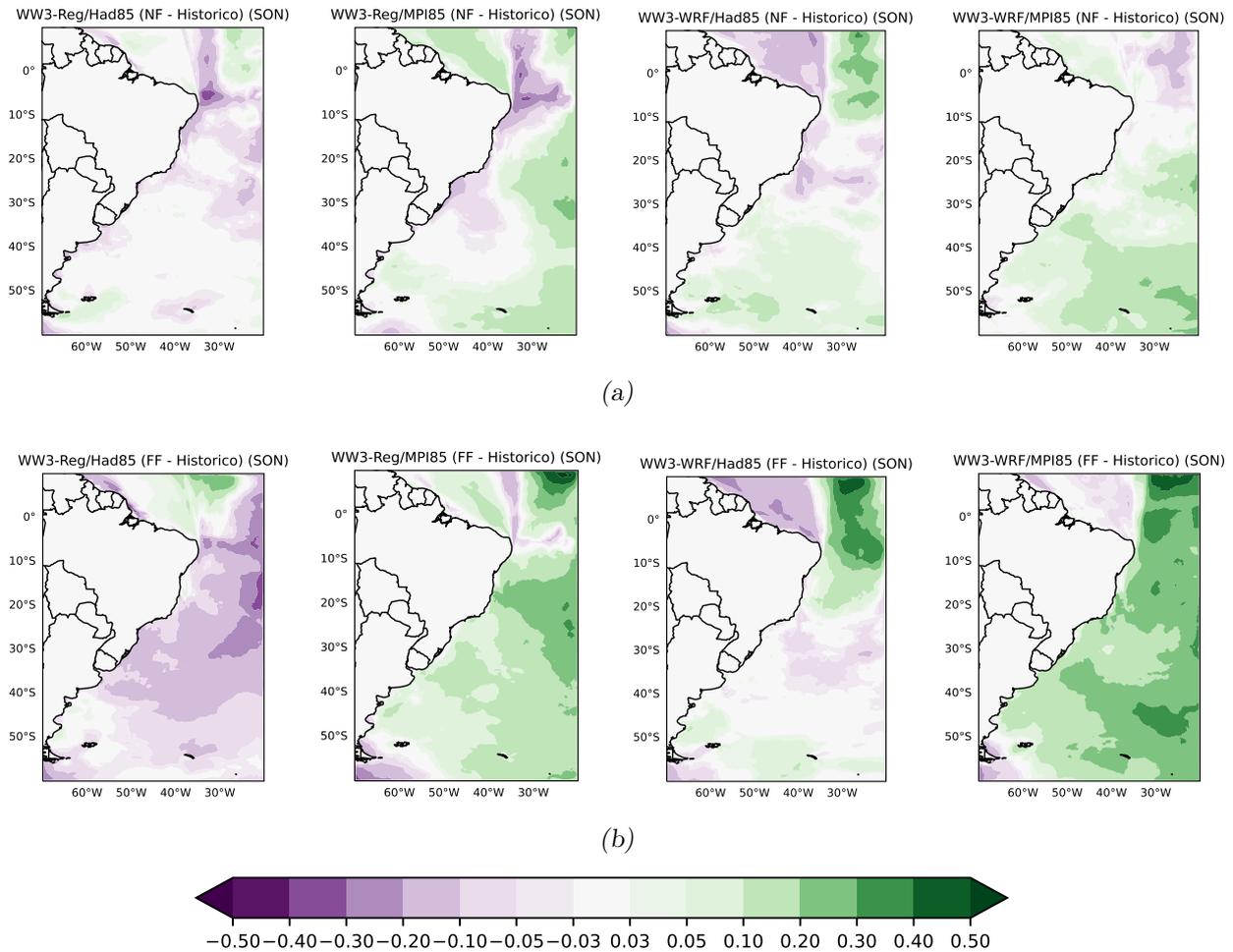


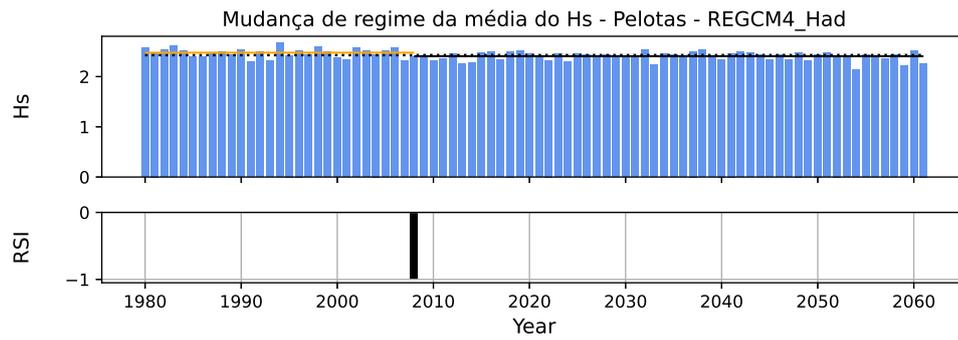
Figura A.12: Mapas de diferença entre o campo médio dos meses de setembro, outubro e novembro (SON) do Período de Pico das Onda (segundos) entre o futuro próximo de 2006 a 2030 NF (a), futuro distante de 2031 a 2060 - FF (b).

Apêndice B 

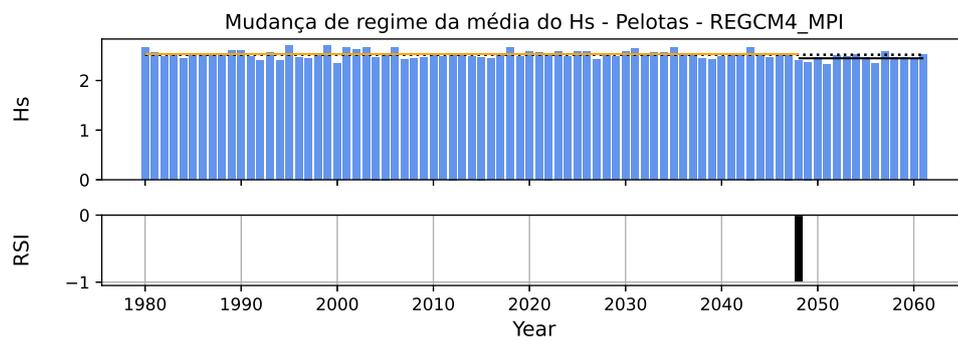
---

Teste de Rodionov para mudança de regime por bacia

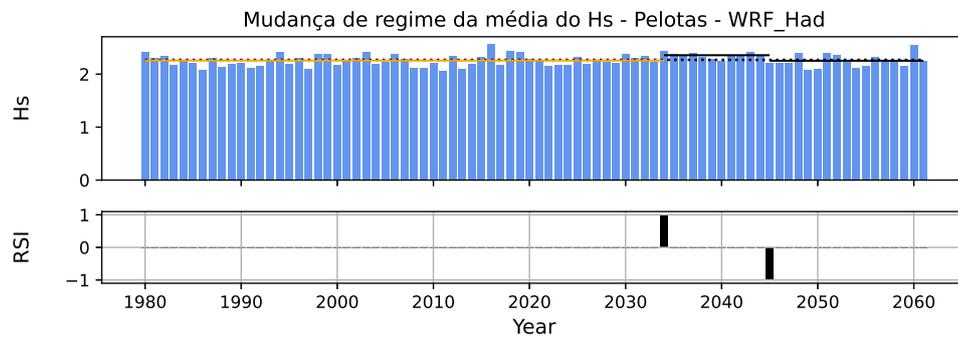




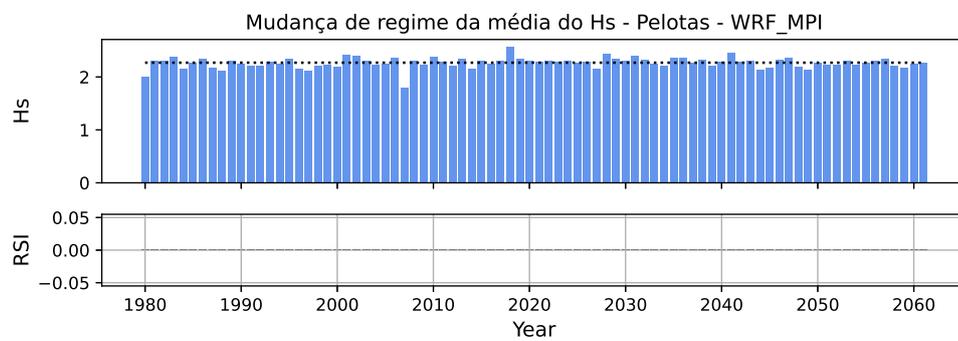
(a)



(b)

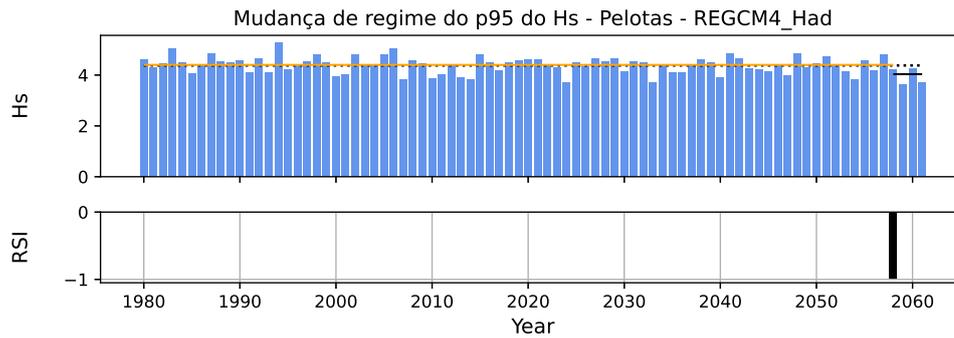


(c)

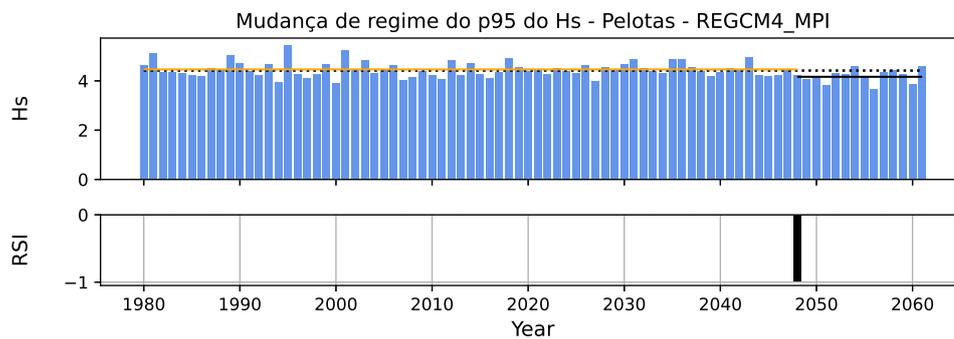


(d)

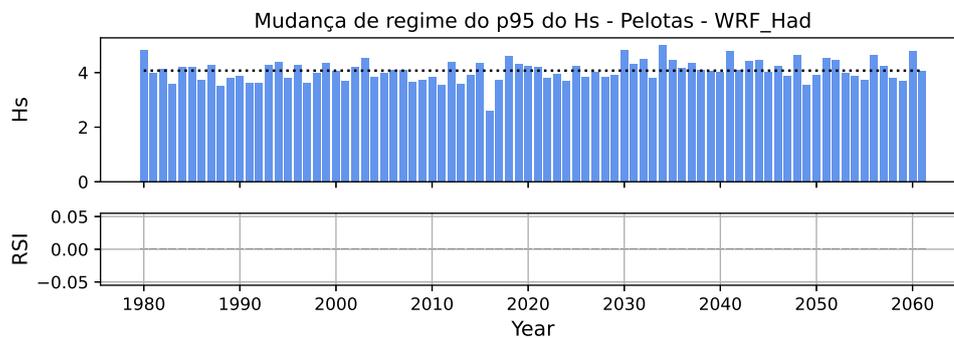
Figura B.1: Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Pelotas.



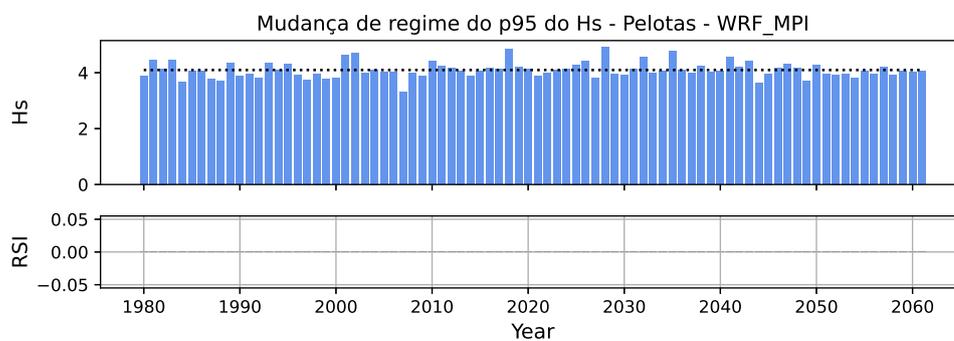
(a)



(b)

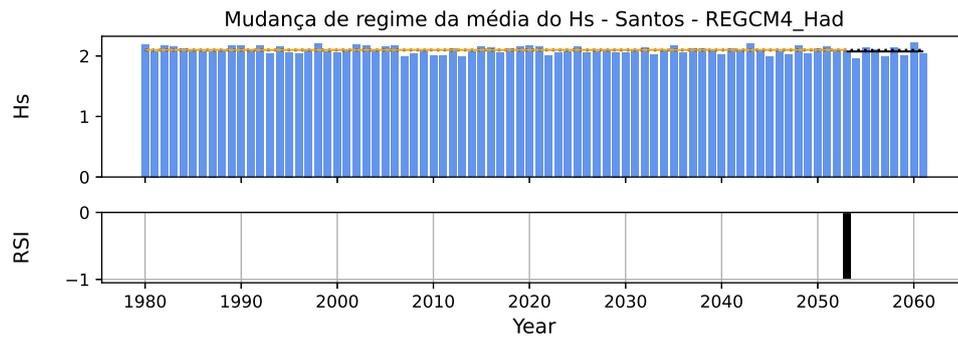


(c)

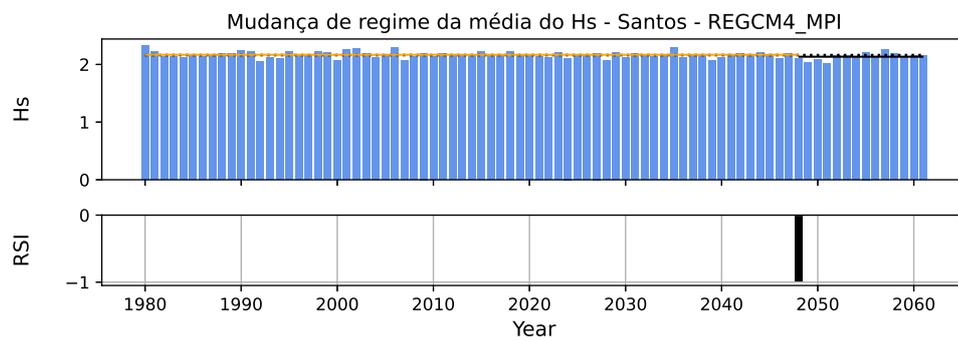


(d)

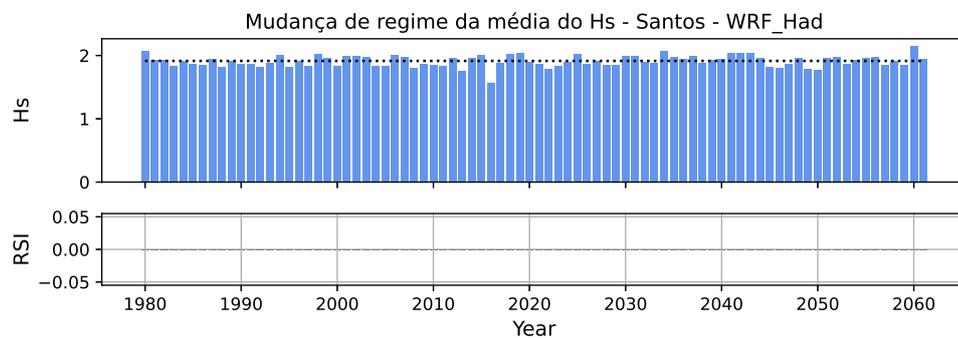
Figura B.2: Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Pelotas.



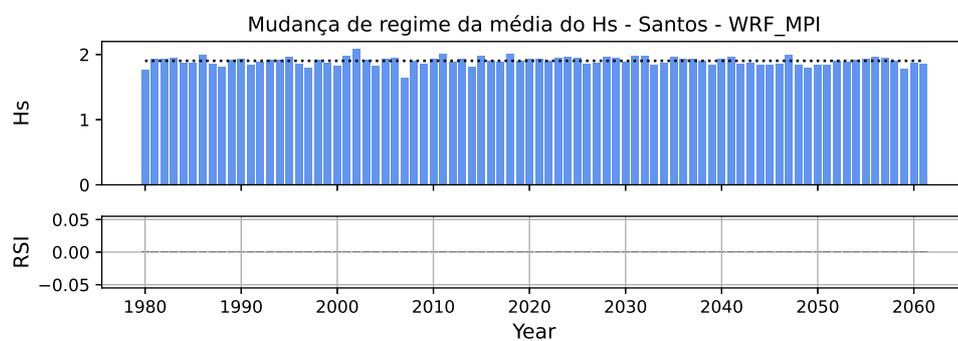
(a)



(b)

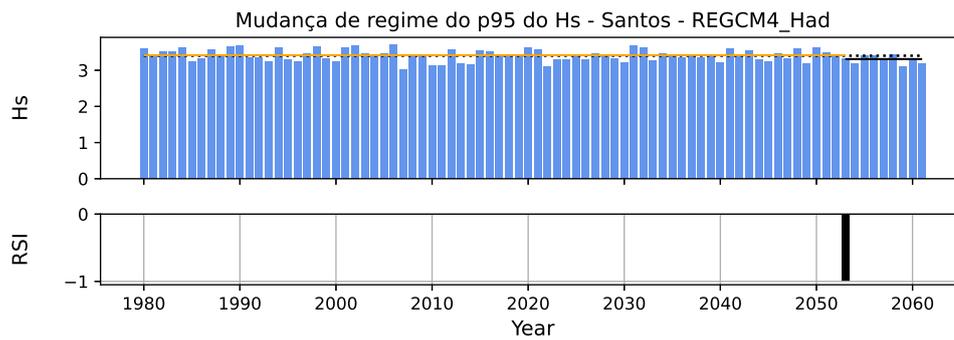


(c)

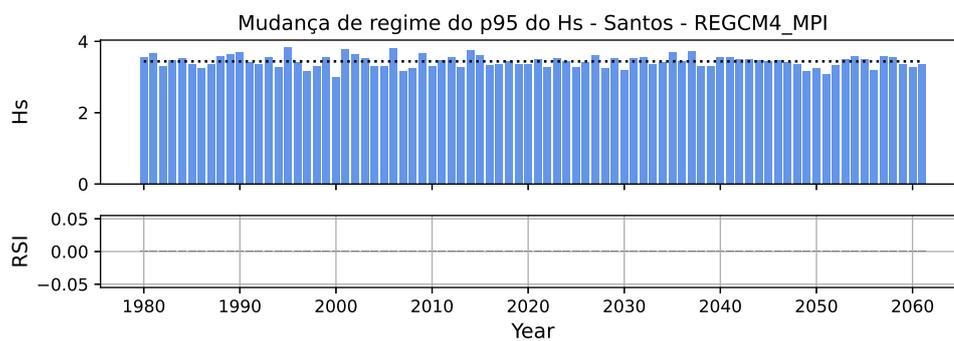


(d)

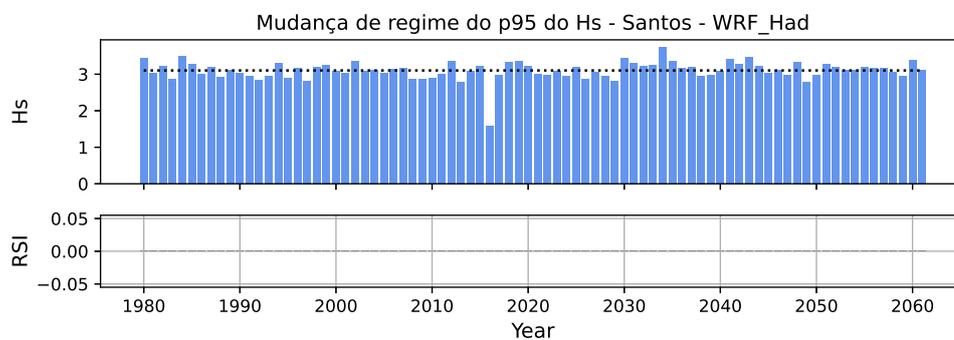
Figura B.3: Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Santos.



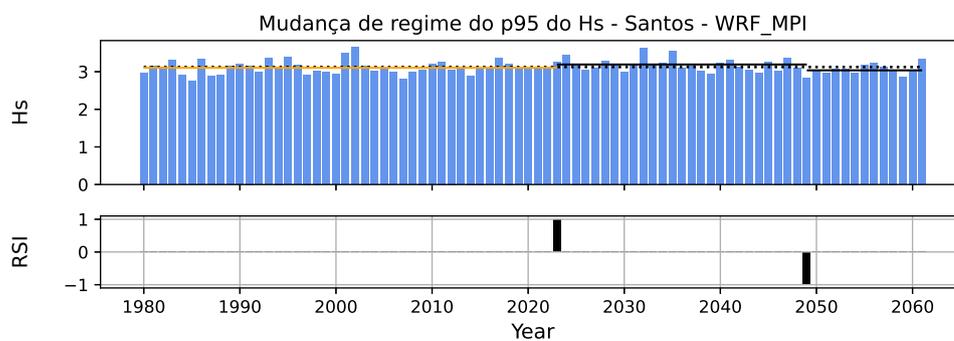
(a)



(b)

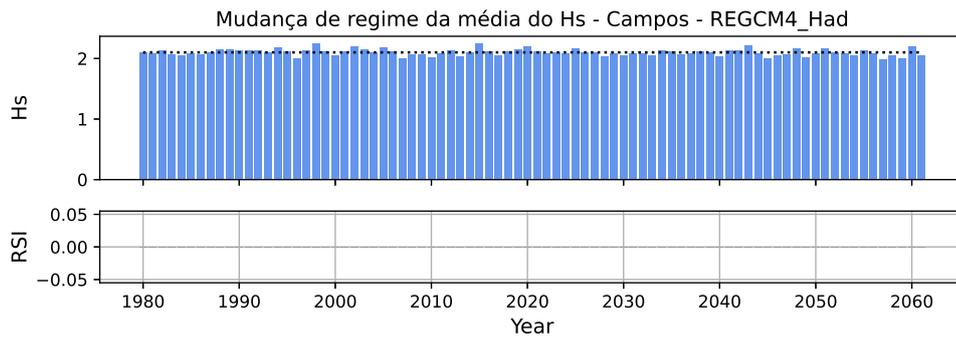


(c)

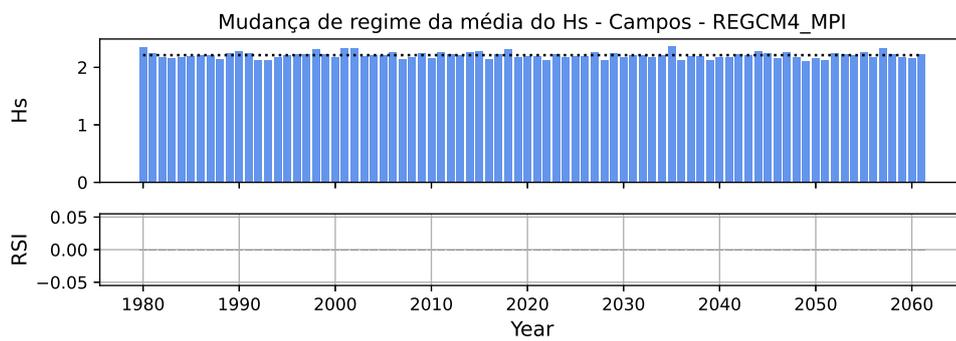


(d)

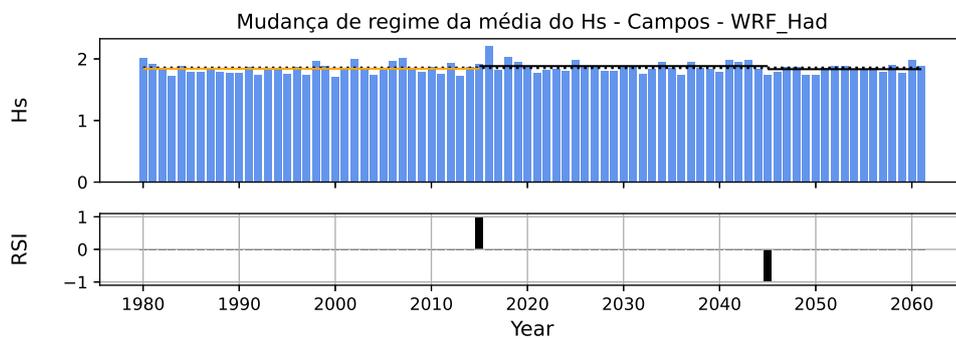
Figura B.4: Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Santos.



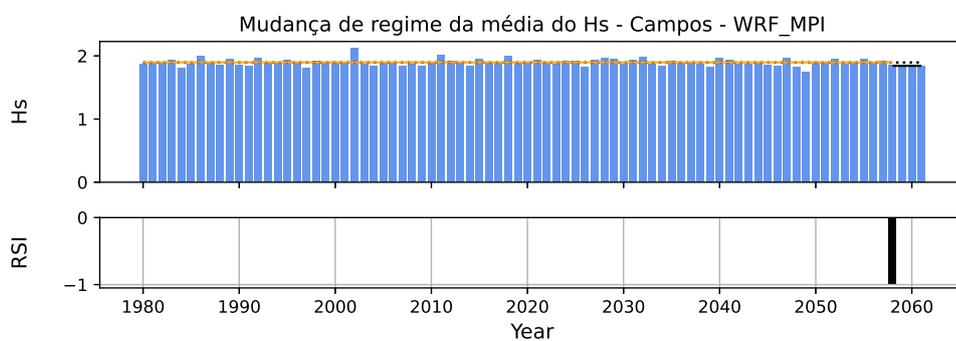
(a)



(b)

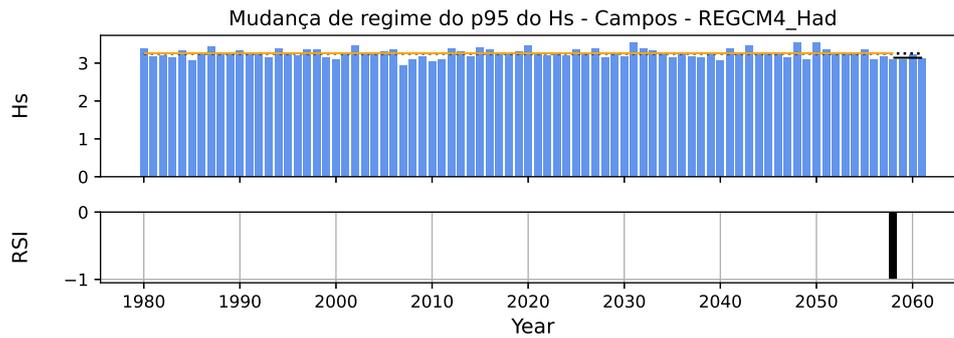


(c)

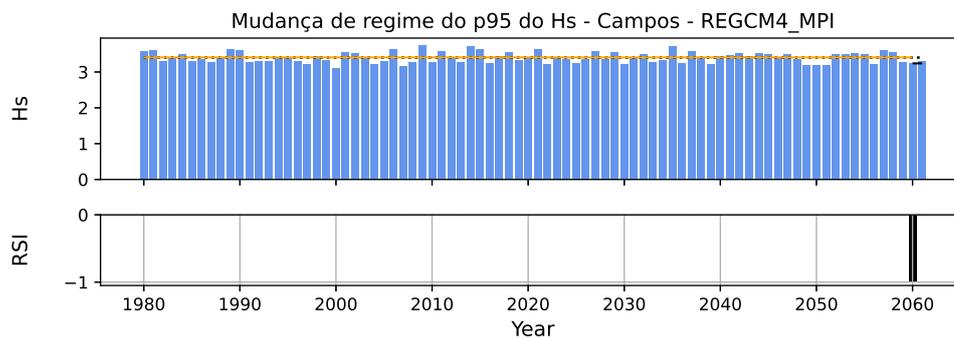


(d)

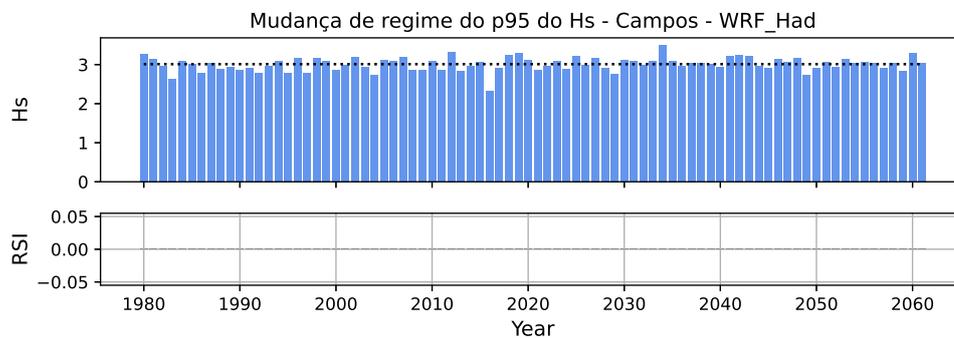
Figura B.5: Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Campos.



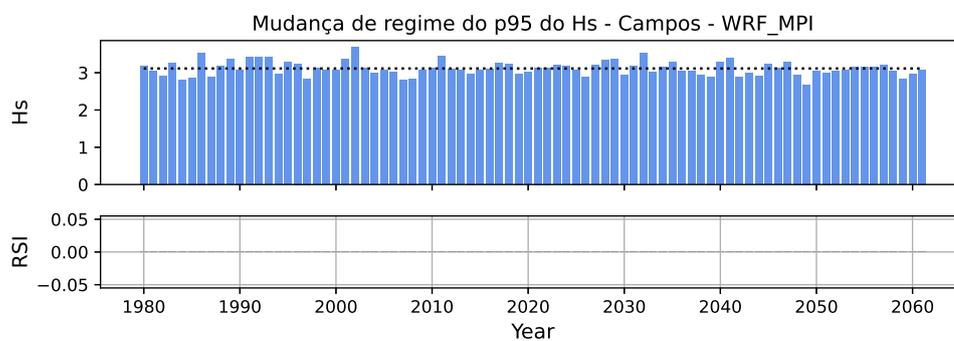
(a)



(b)

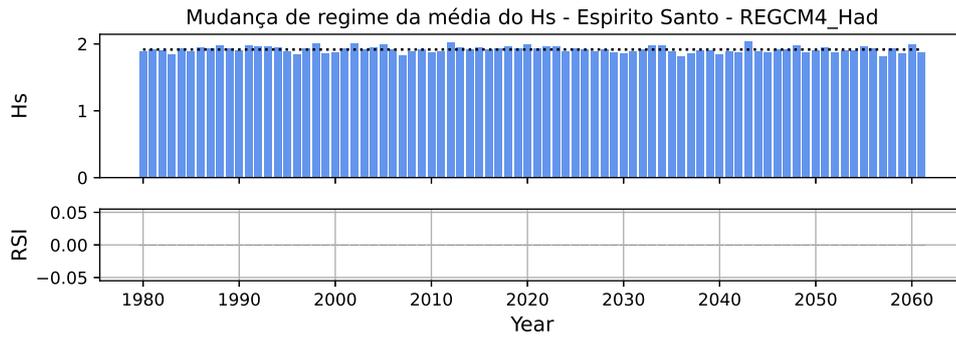


(c)

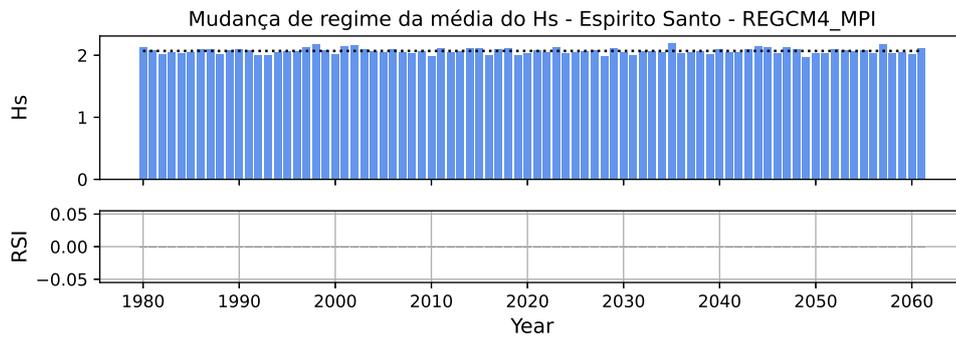


(d)

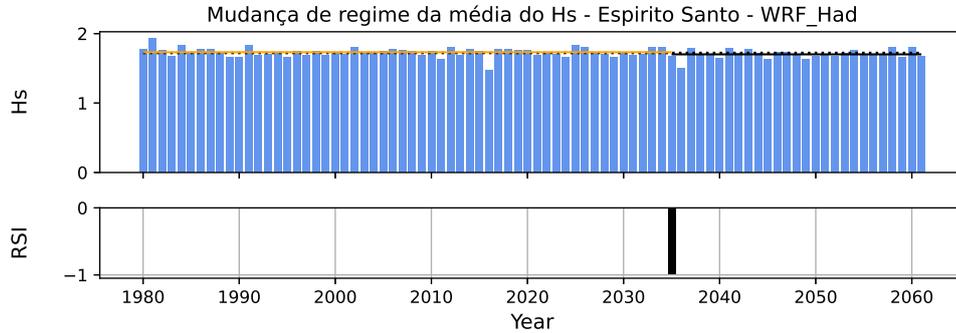
Figura B.6: Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Campos.



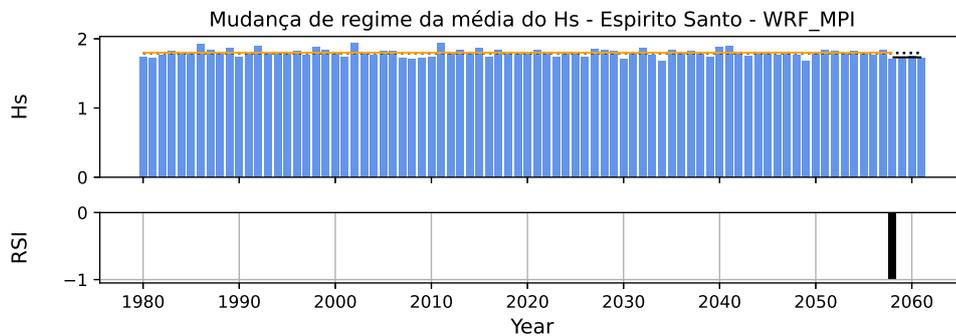
(a)



(b)

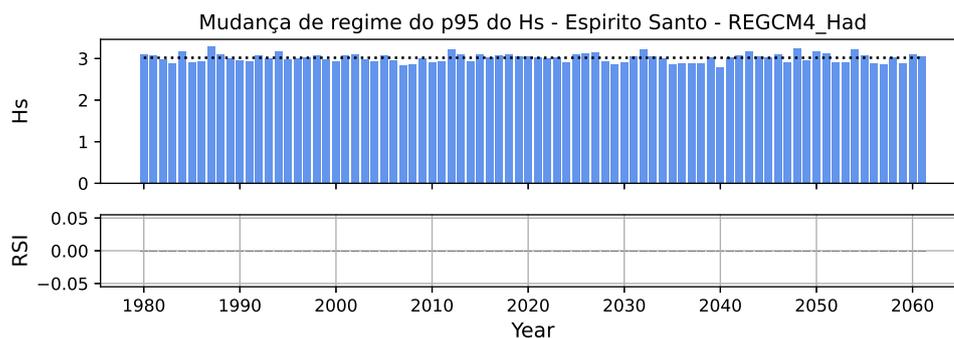


(c)

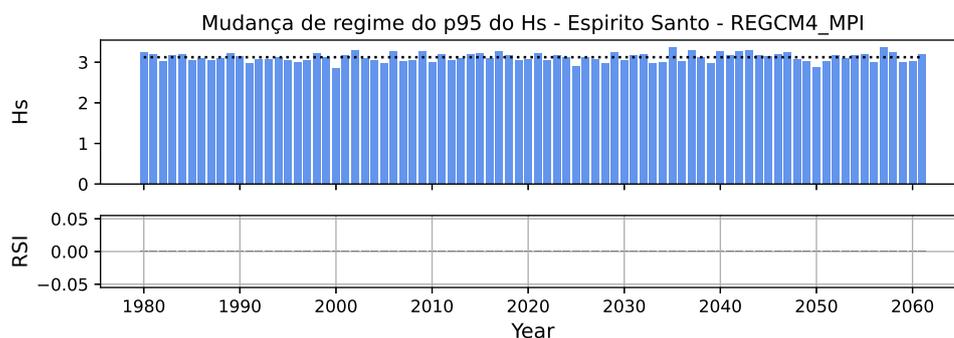


(d)

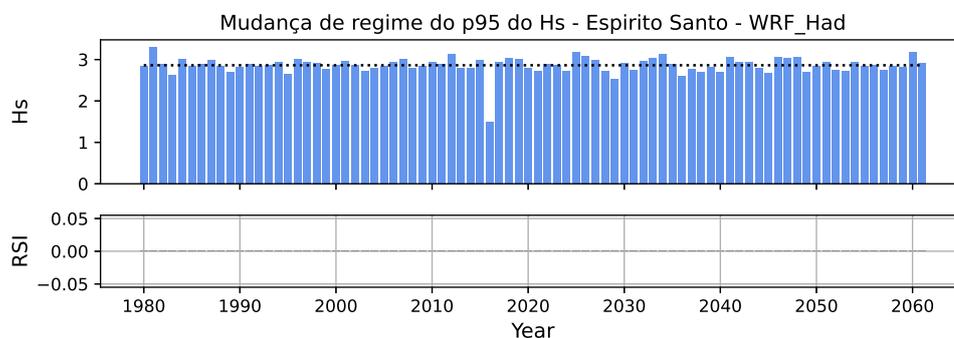
Figura B.7: Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia do Espirito Santo.



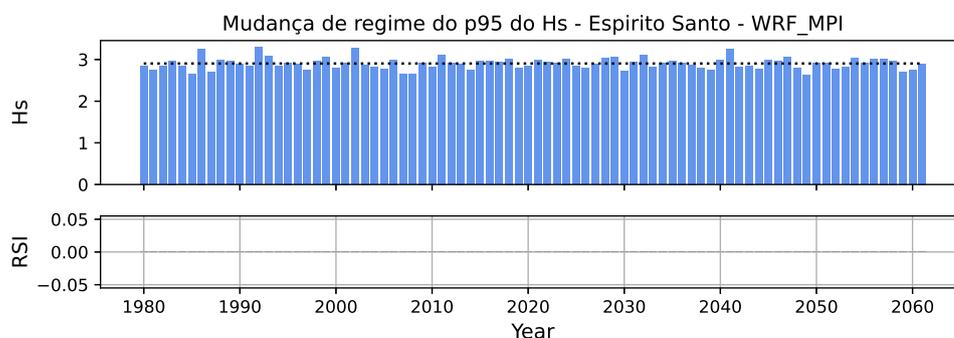
(a)



(b)

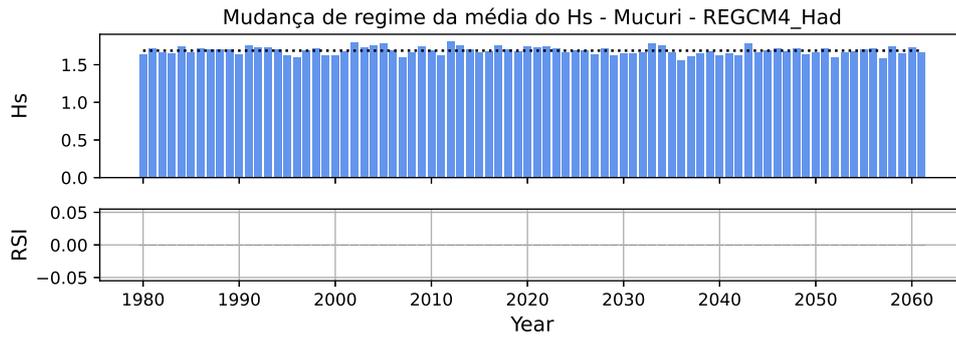


(c)

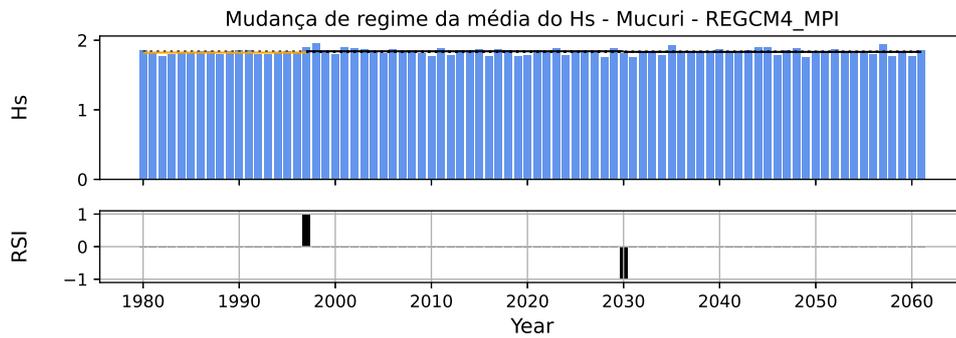


(d)

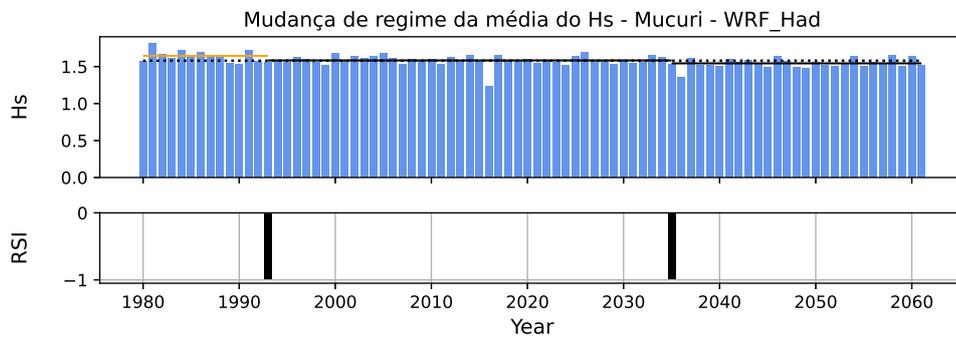
Figura B.8: Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia do Espirito Santo.



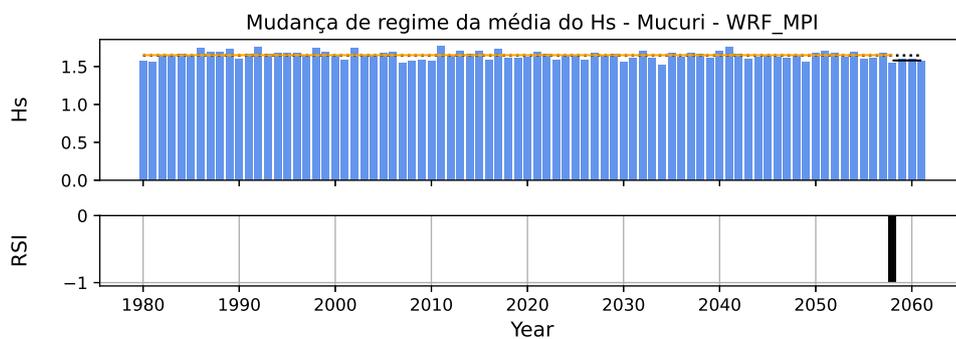
(a)



(b)

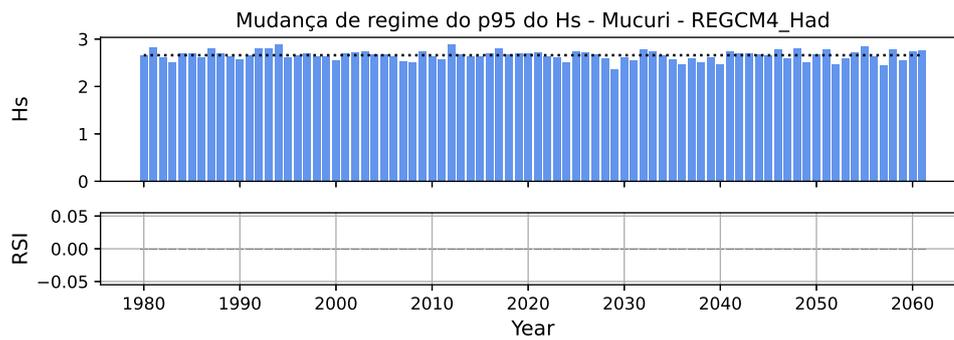


(c)

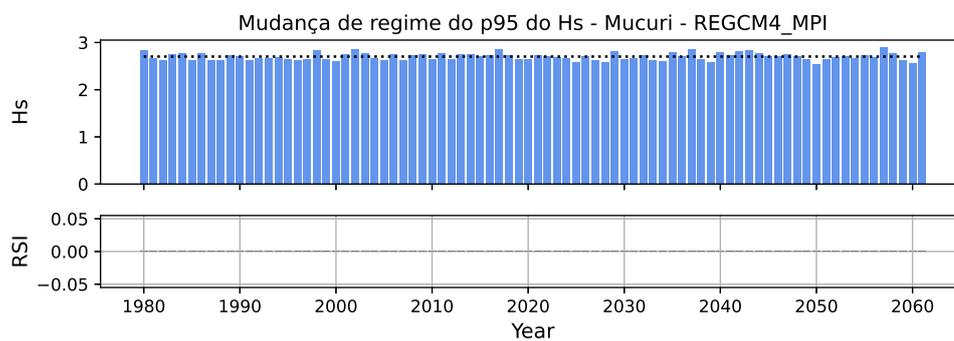


(d)

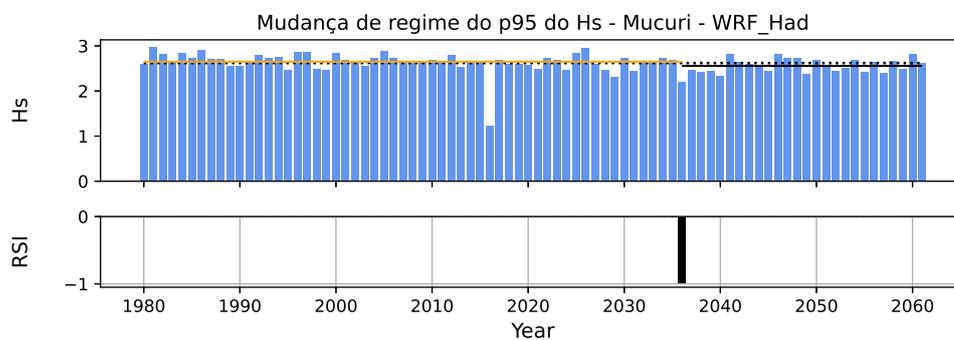
Figura B.9: Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Mucuri.



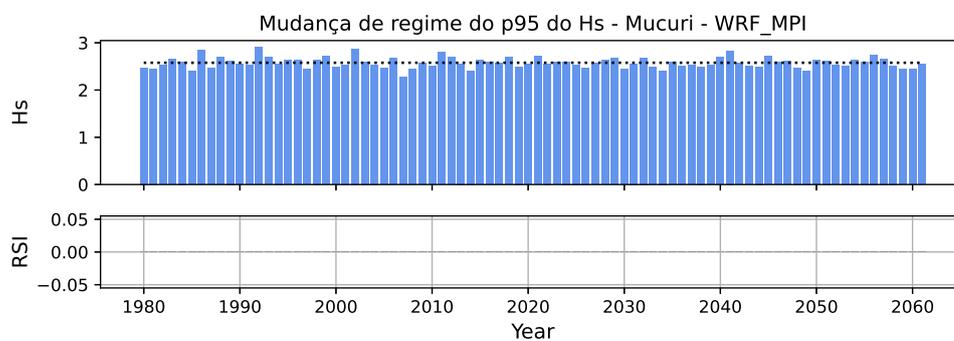
(a)



(b)

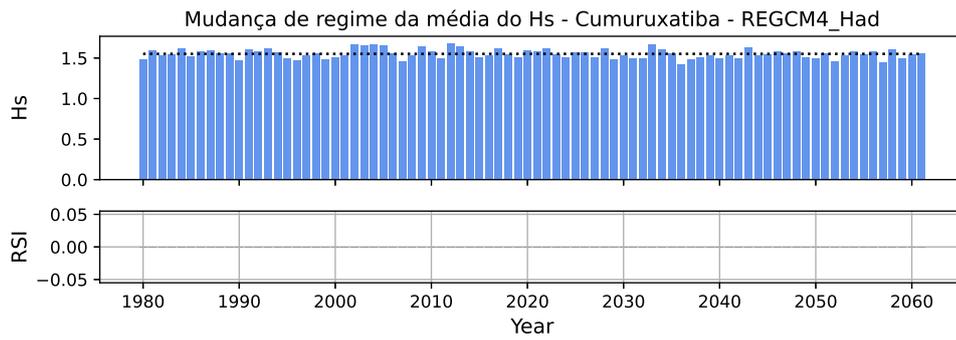


(c)

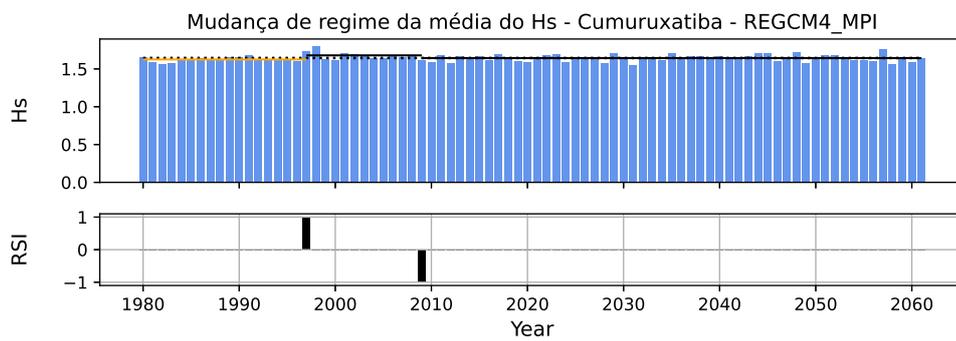


(d)

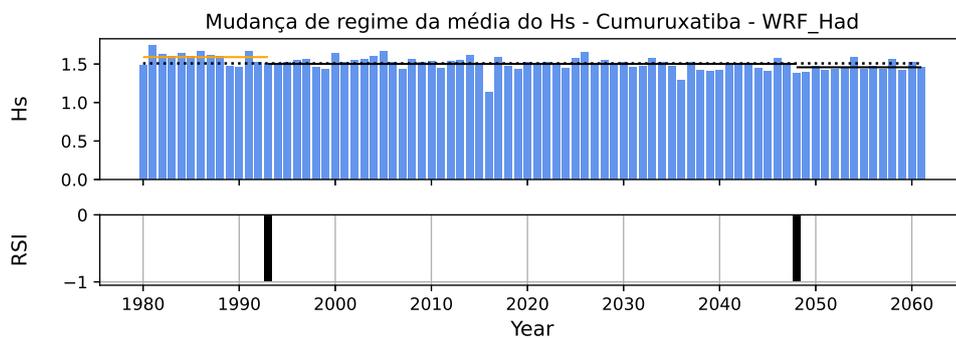
Figura B.10: Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Mucuri.



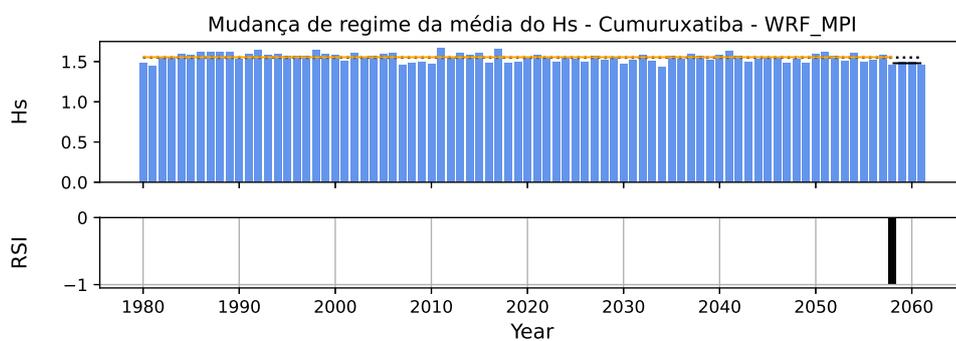
(a)



(b)

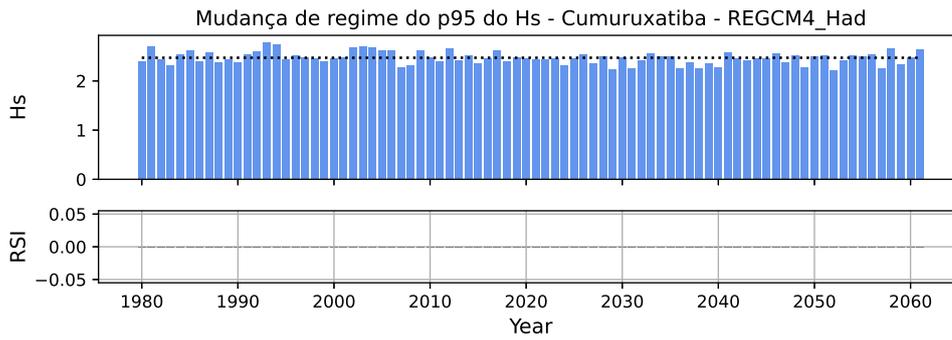


(c)

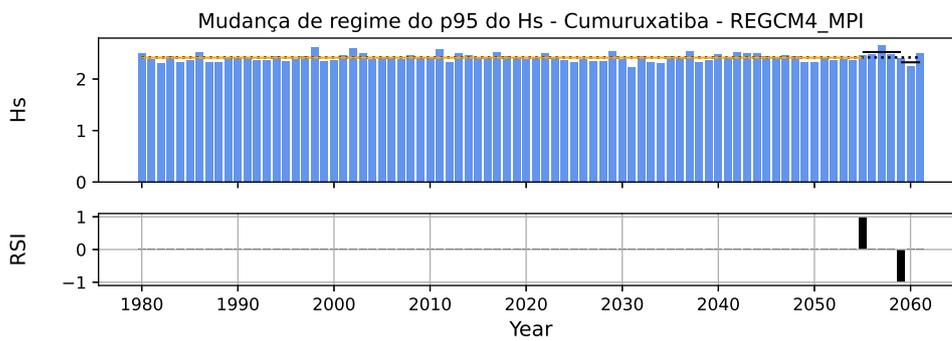


(d)

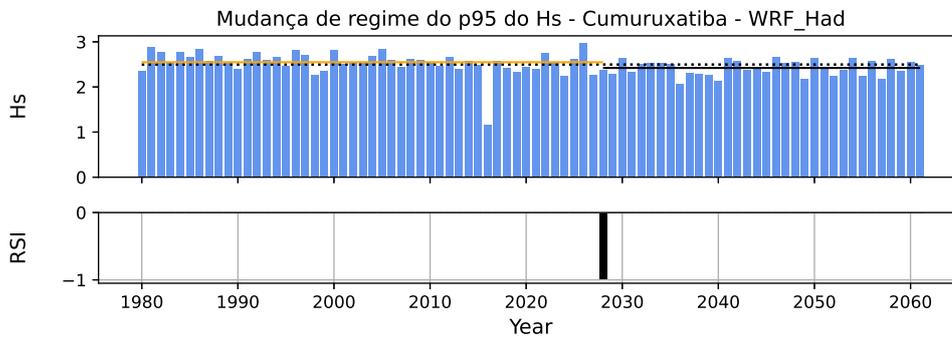
Figura B.11: Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Cumuruxatiba.



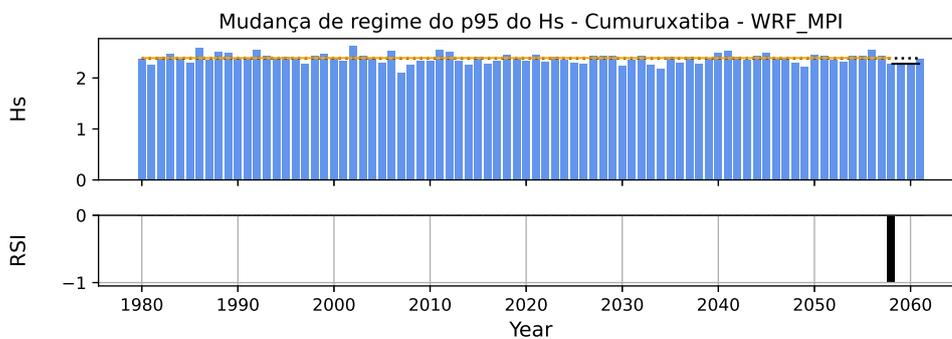
(a)



(b)

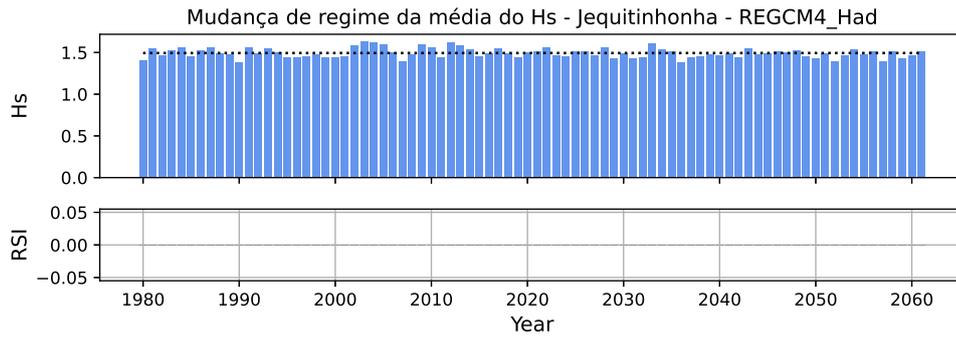


(c)

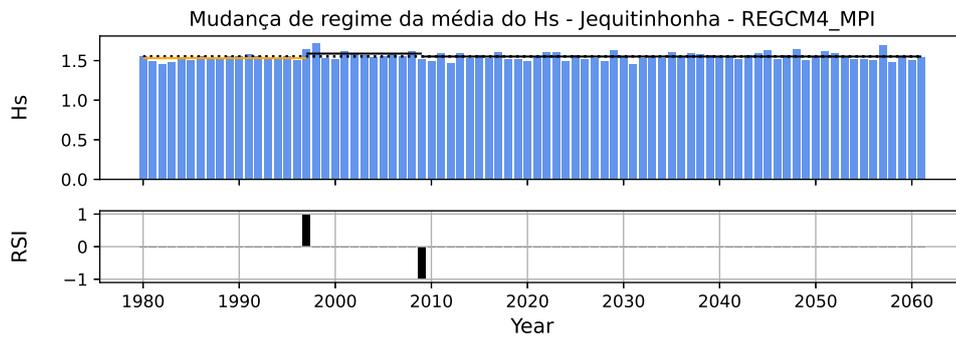


(d)

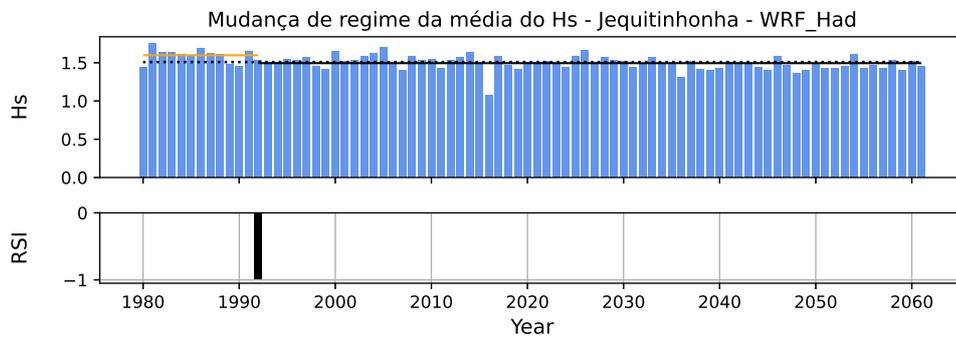
Figura B.12: Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Cumuruxatiba.



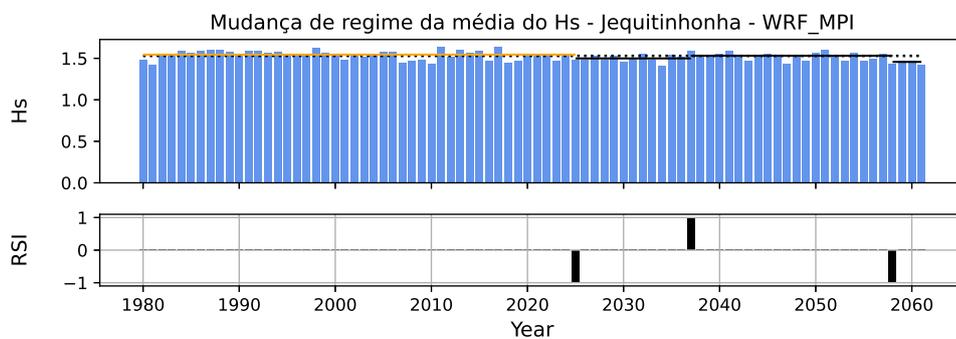
(a)



(b)

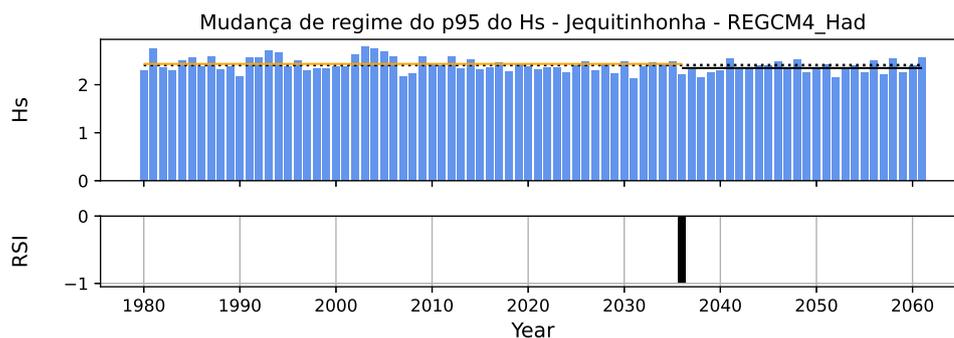


(c)

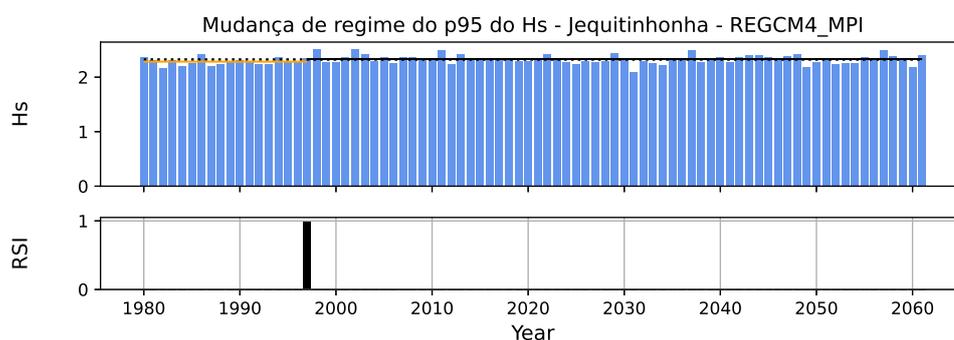


(d)

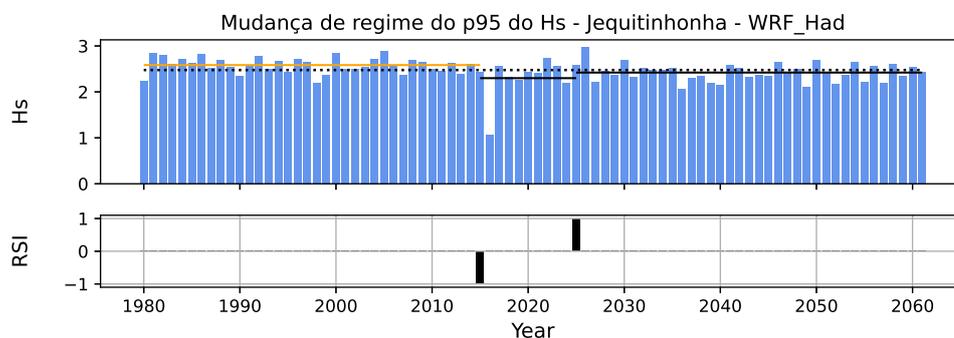
Figura B.13: Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Jequitinhonha.



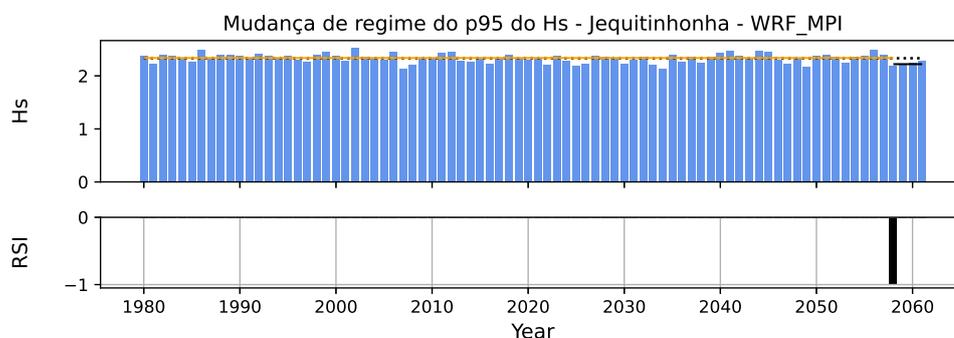
(a)



(b)

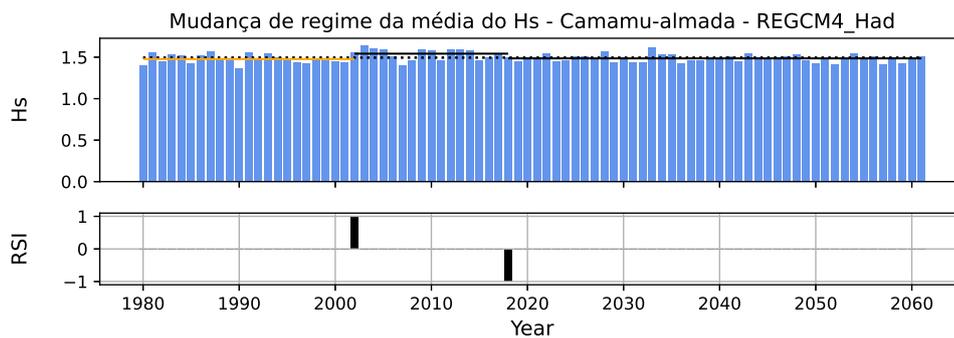


(c)

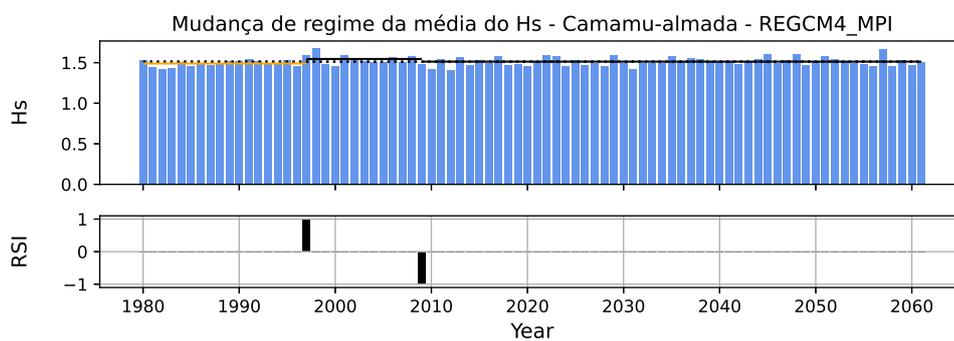


(d)

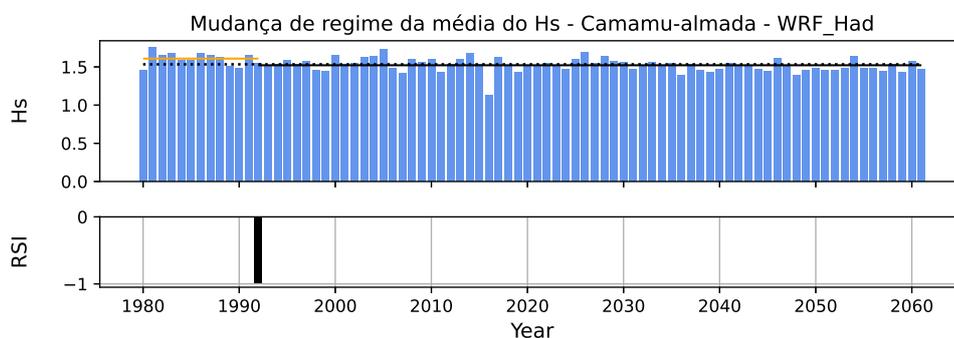
Figura B.14: Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Jequitinhonha.



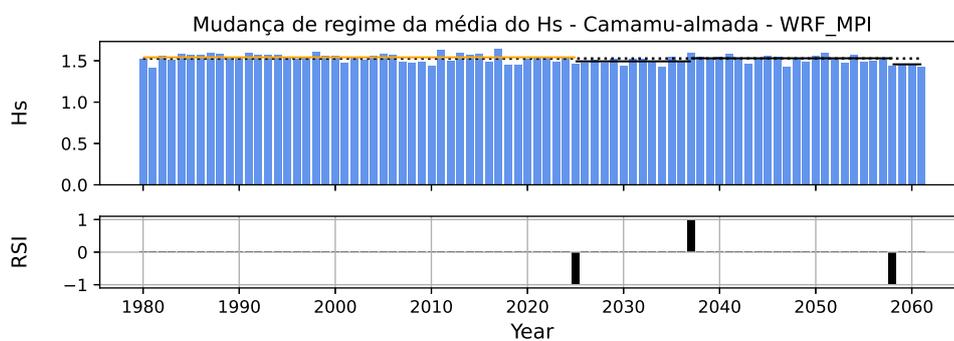
(a)



(b)

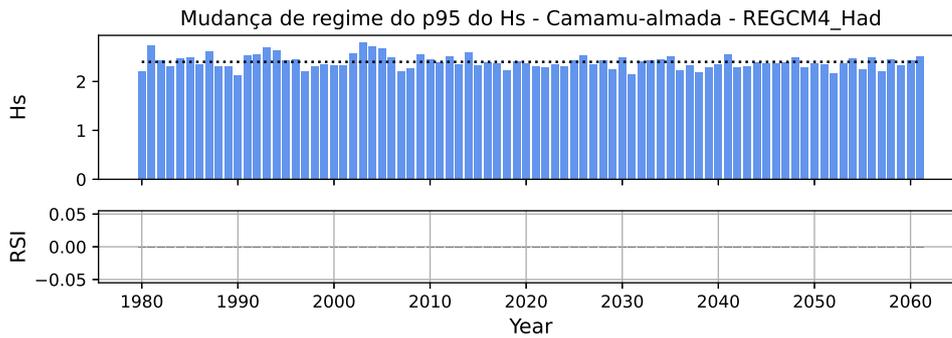


(c)

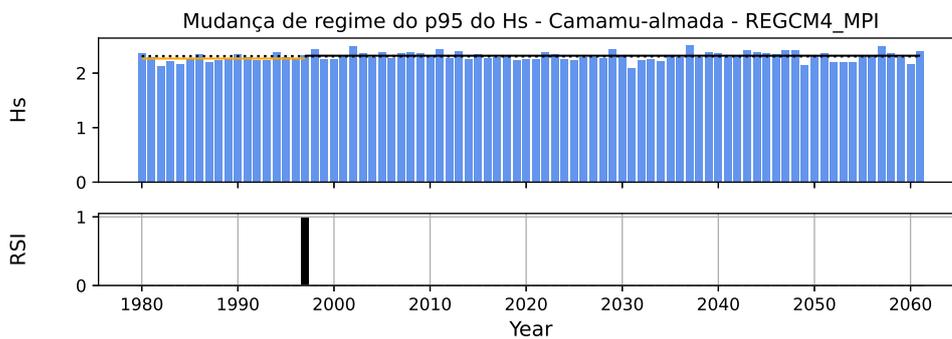


(d)

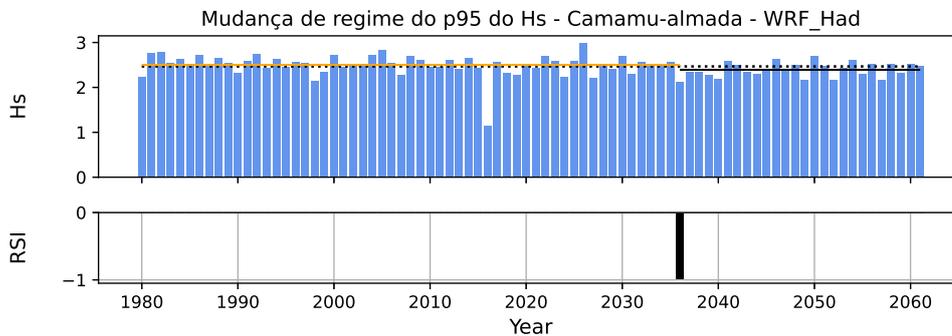
Figura B.15: Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Camamu-Almada.



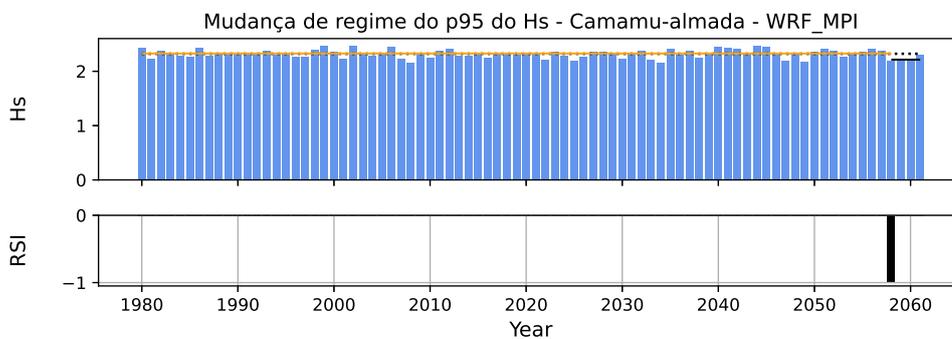
(a)



(b)

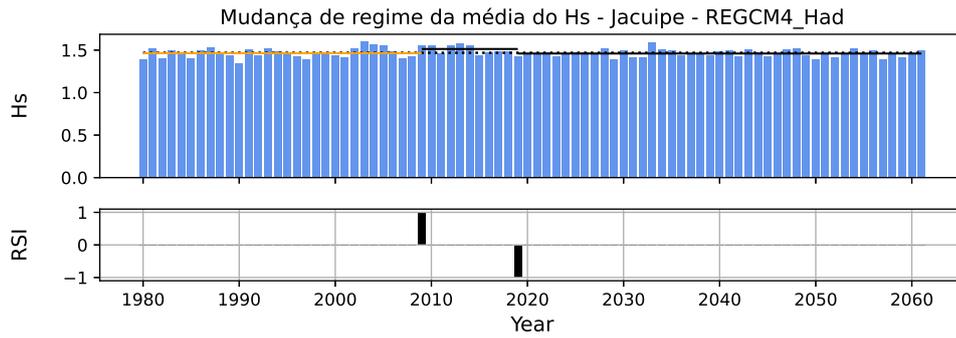


(c)

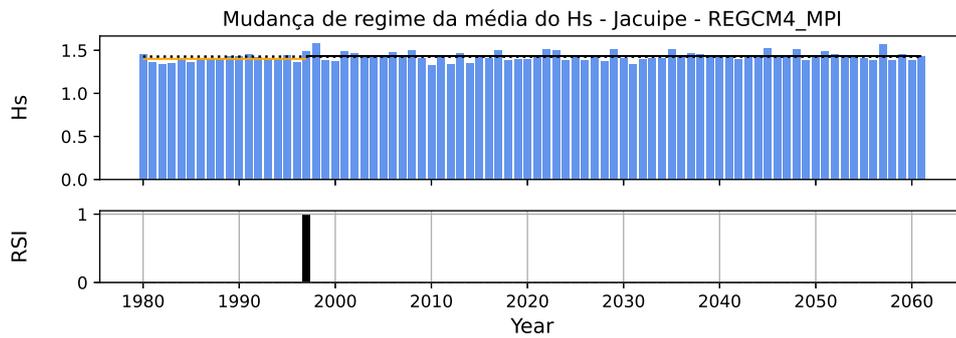


(d)

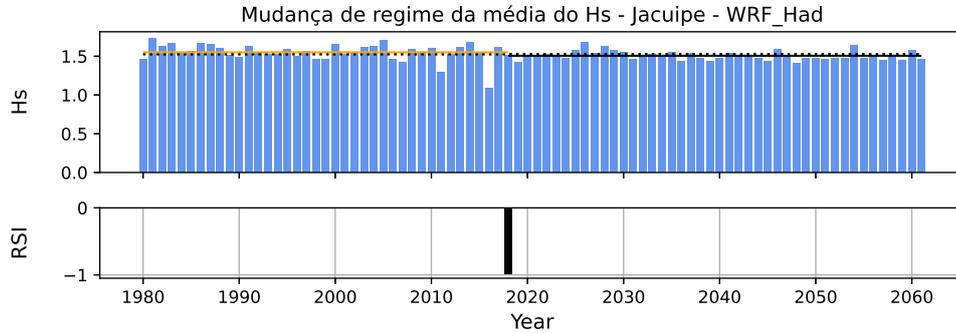
Figura B.16: Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Camamu-Almada.



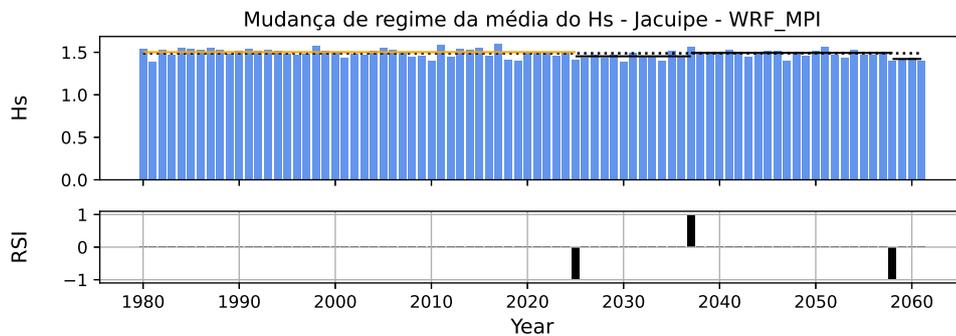
(a)



(b)

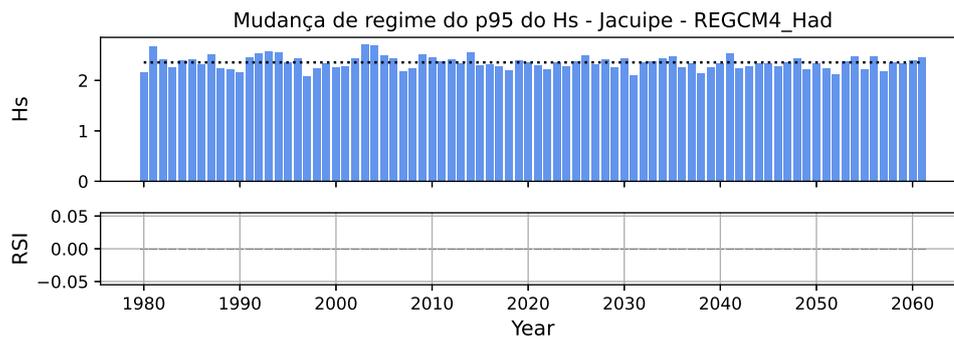


(c)

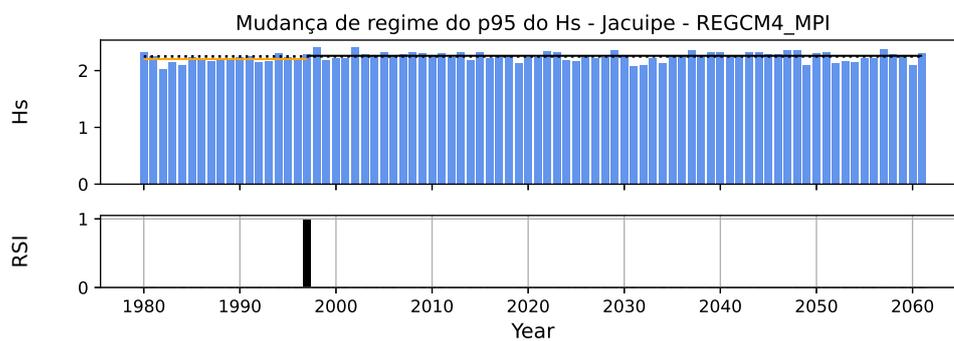


(d)

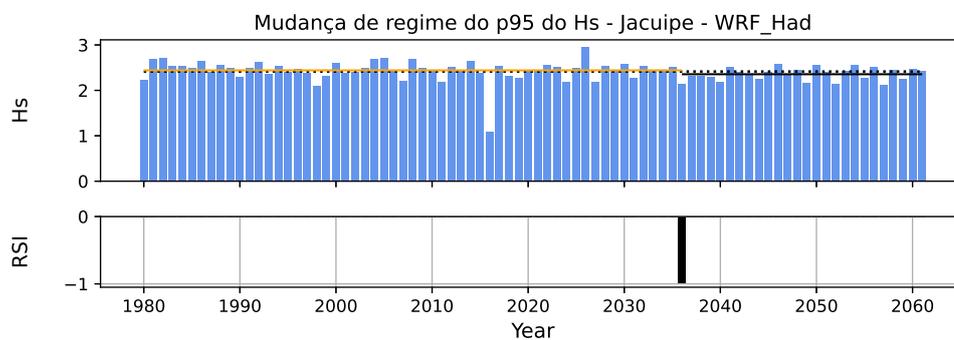
Figura B.17: Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Jacuipe.



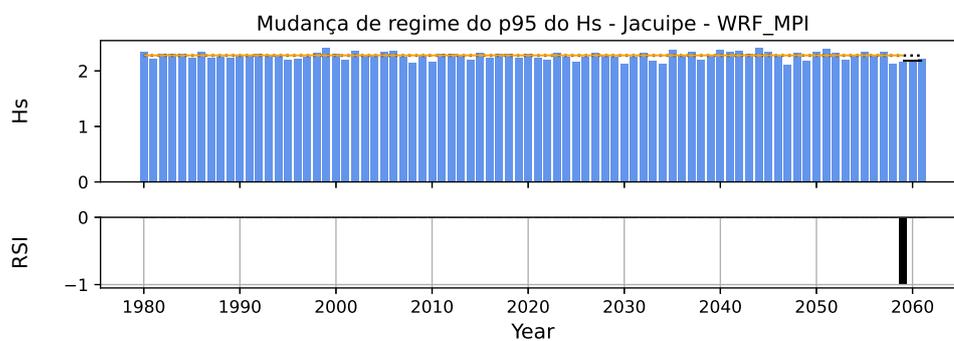
(a)



(b)

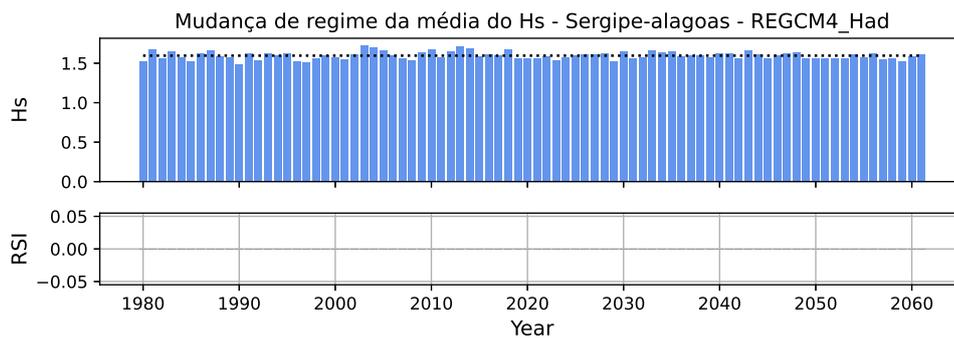


(c)

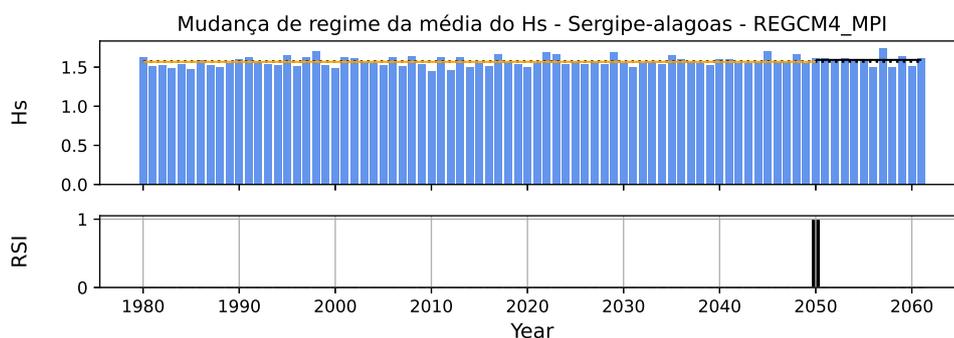


(d)

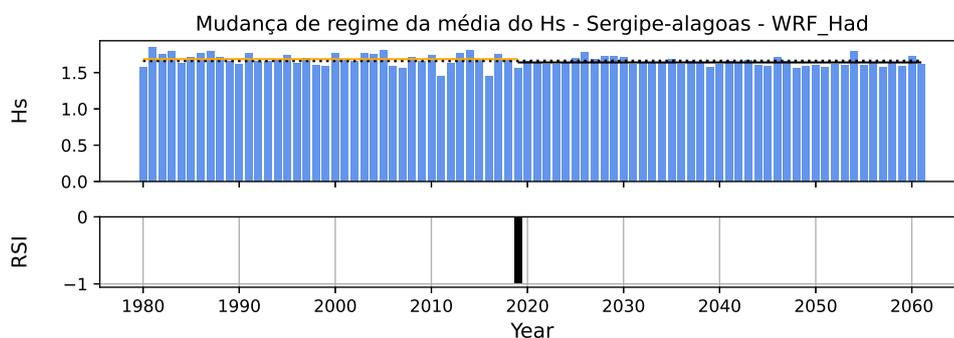
Figura B.18: Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Jacuipe.



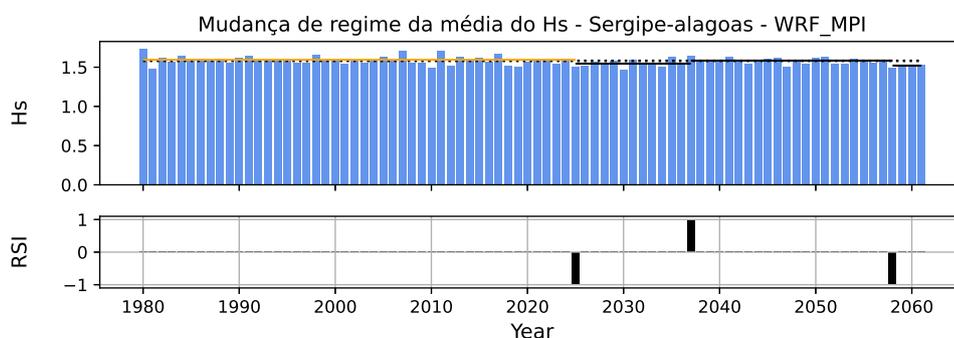
(a)



(b)

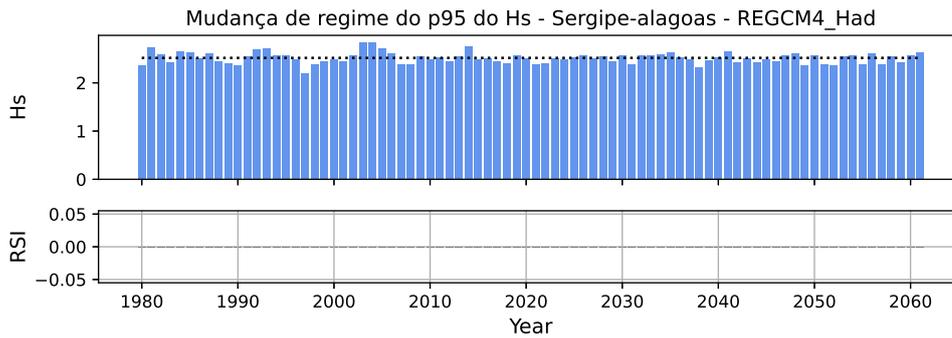


(c)

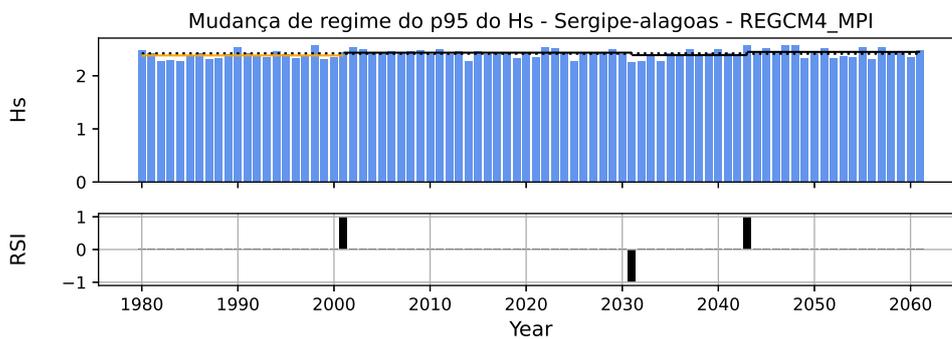


(d)

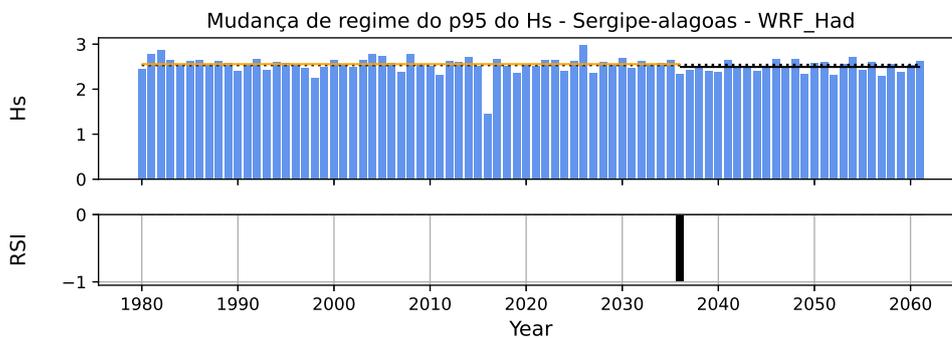
Figura B.19: Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Sergipe-Alagoas.



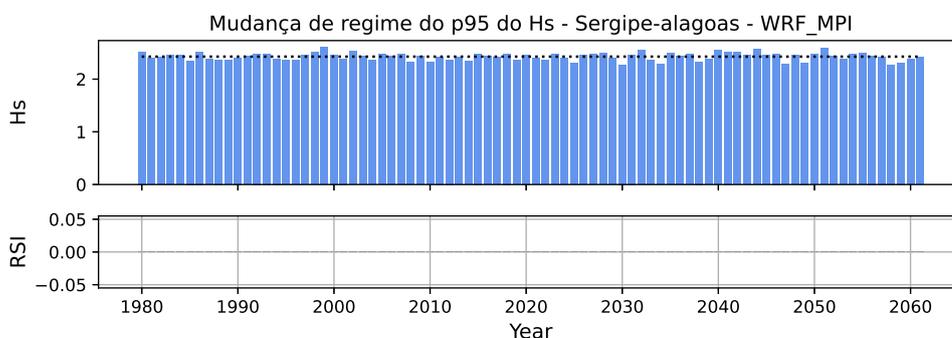
(a)



(b)

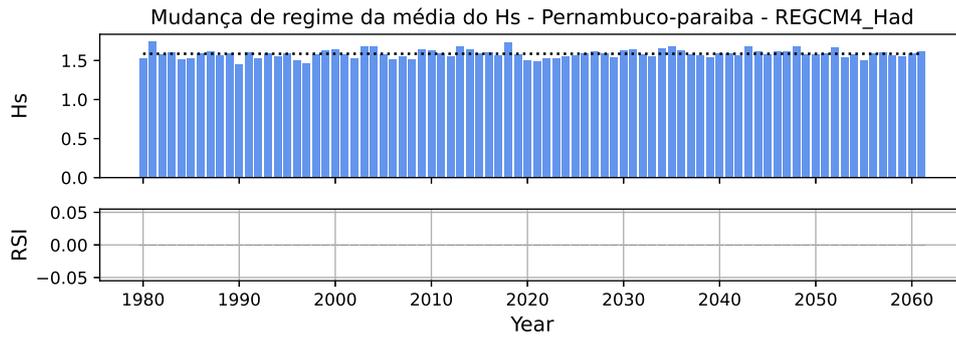


(c)

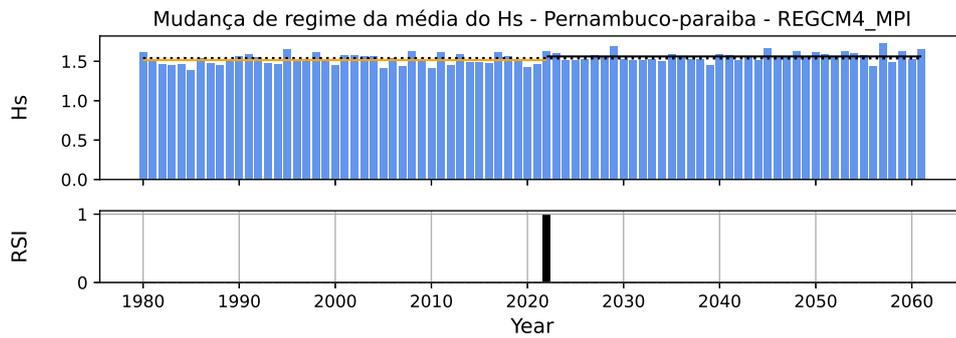


(d)

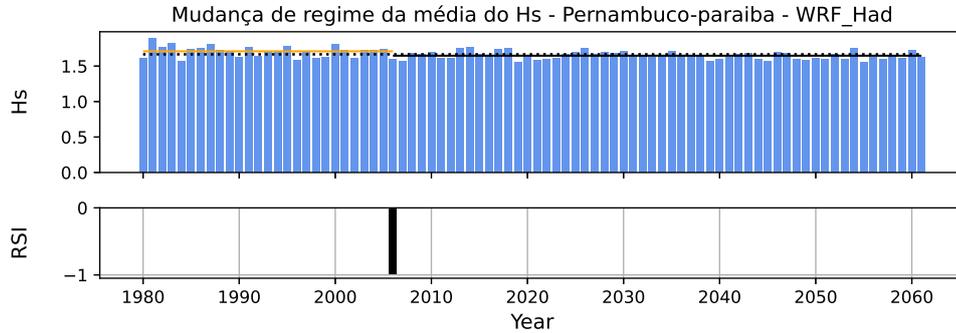
Figura B.20: Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Sergipe-Alagoas.



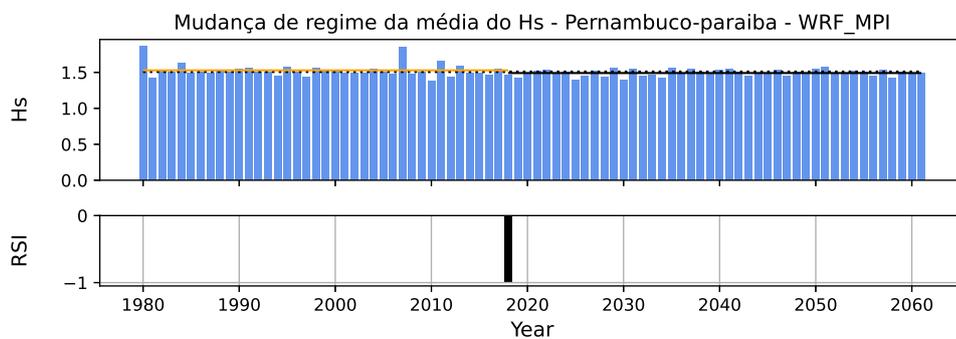
(a)



(b)

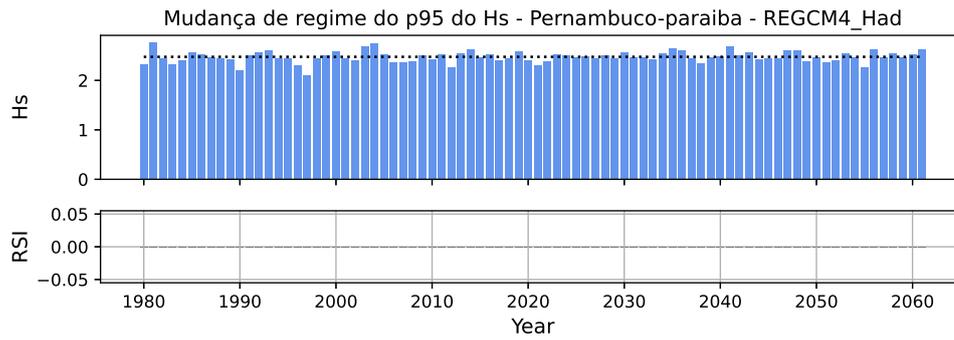


(c)

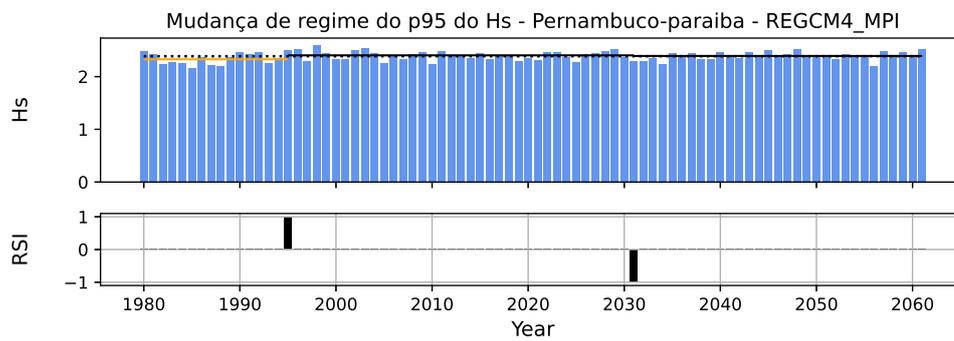


(d)

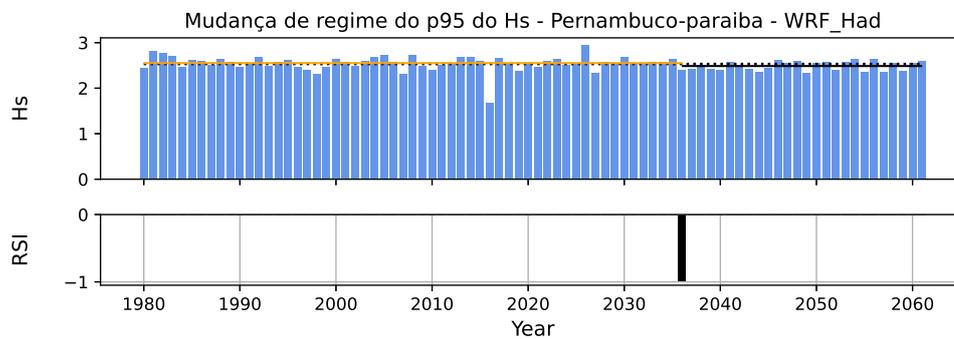
Figura B.21: Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Pernambuco-Paraíba.



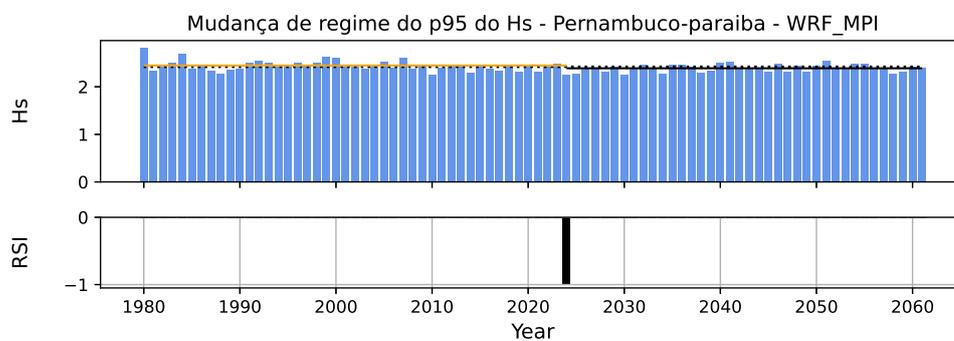
(a)



(b)

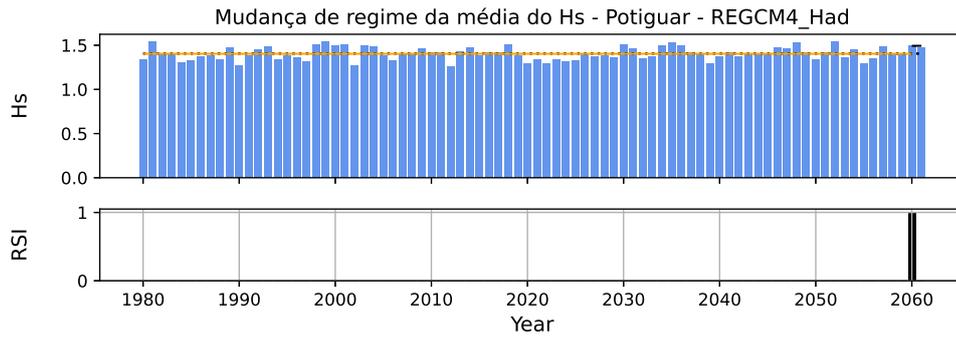


(c)

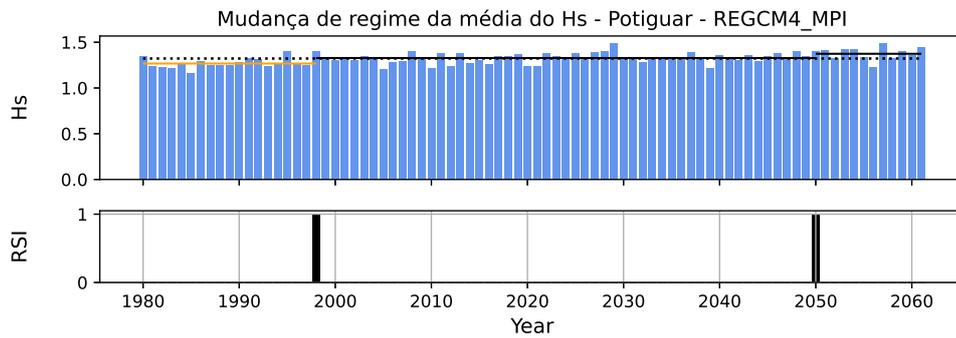


(d)

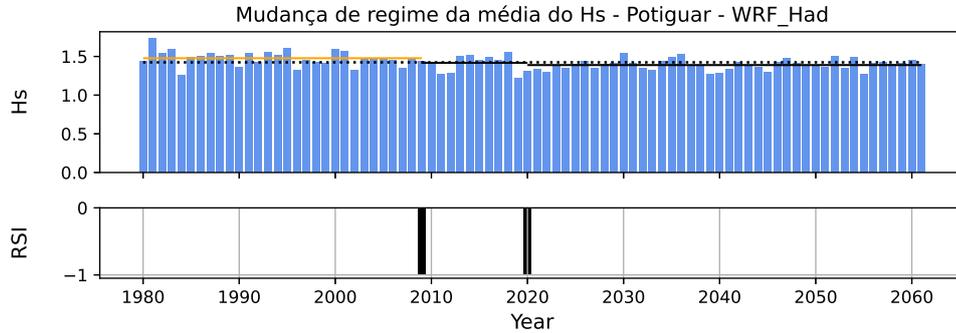
Figura B.22: Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Pernambuco-Paraíba.



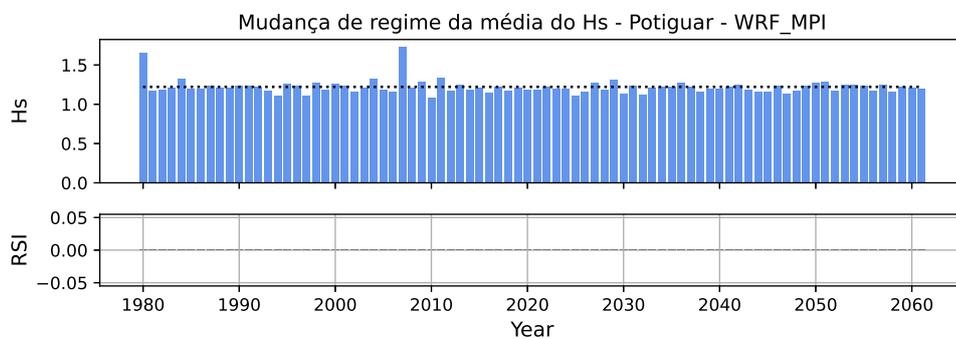
(a)



(b)

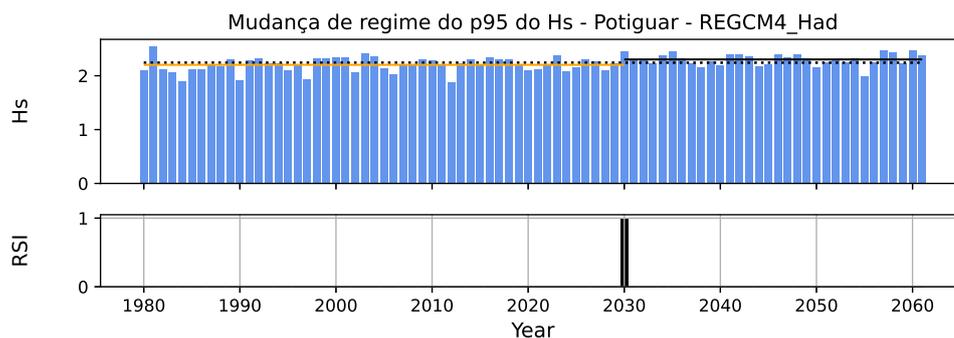


(c)

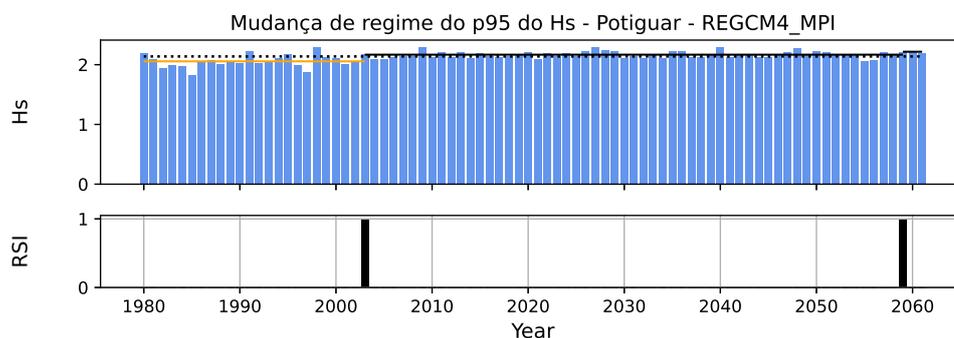


(d)

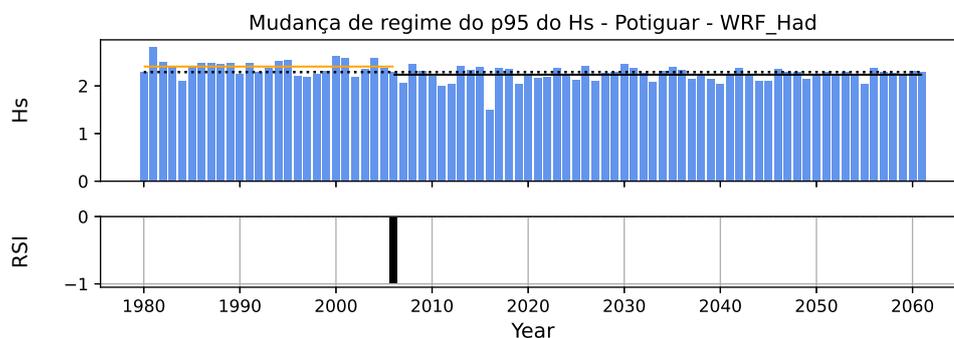
Figura B.23: Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Potiguar.



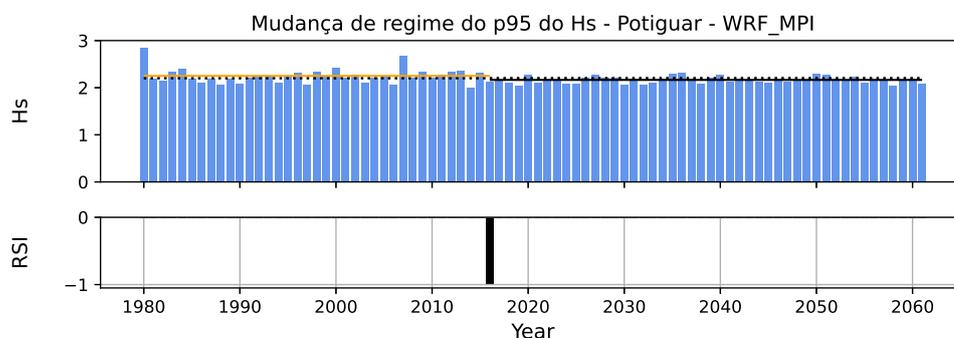
(a)



(b)

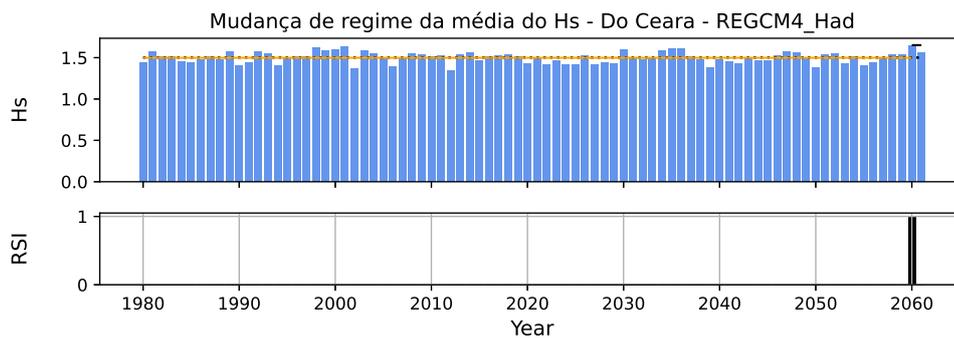


(c)

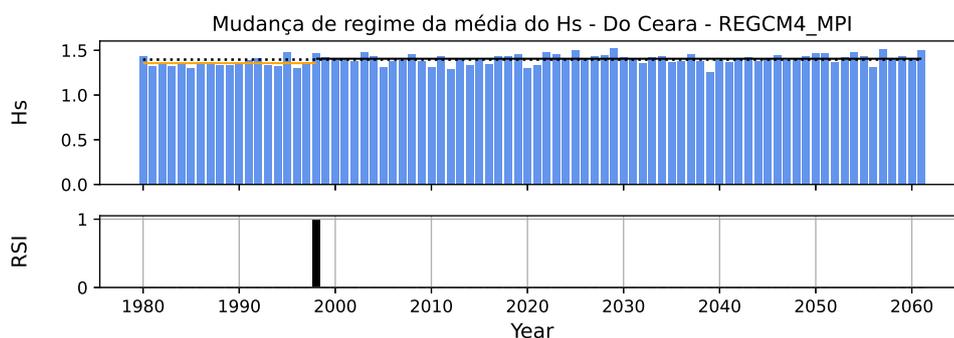


(d)

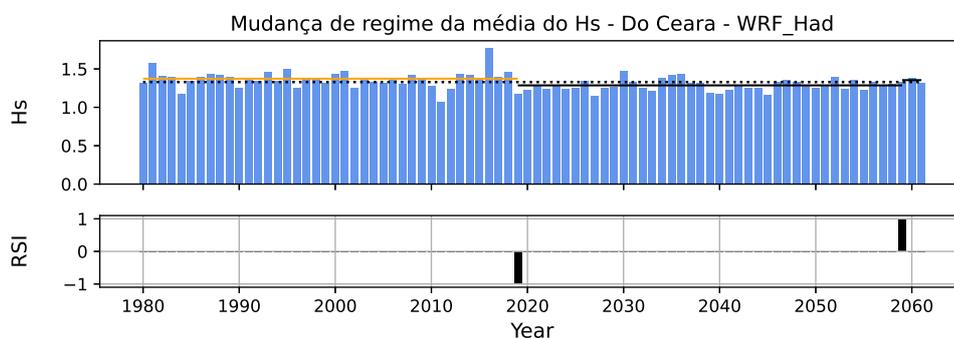
Figura B.24: Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Potiguar.



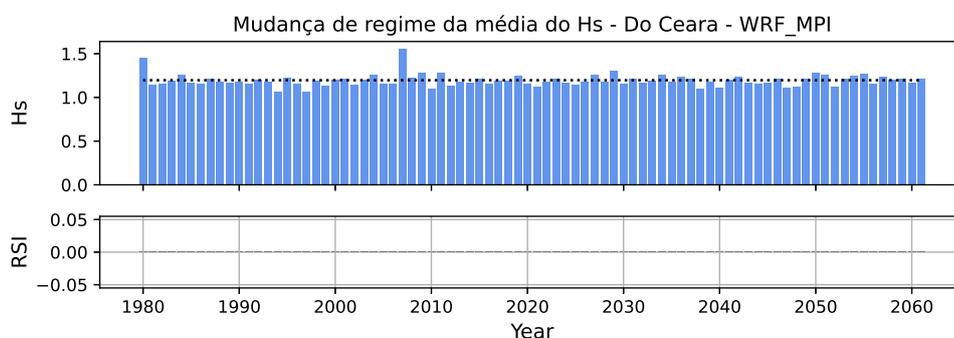
(a)



(b)

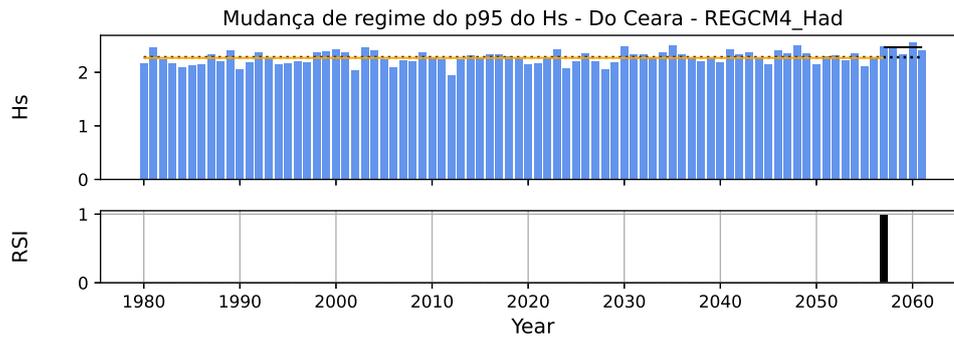


(c)

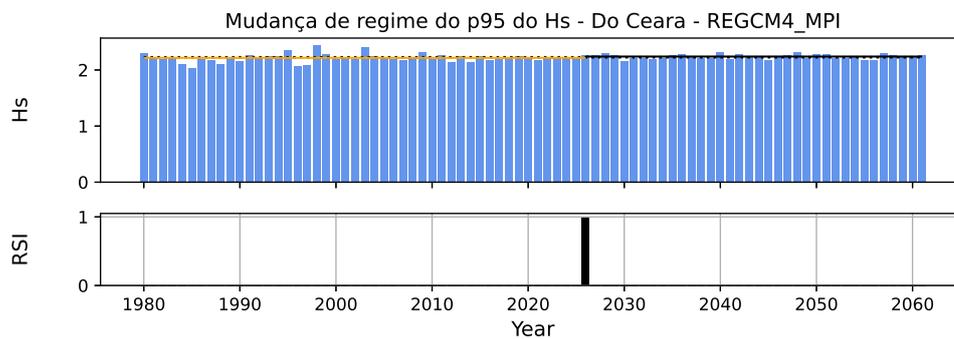


(d)

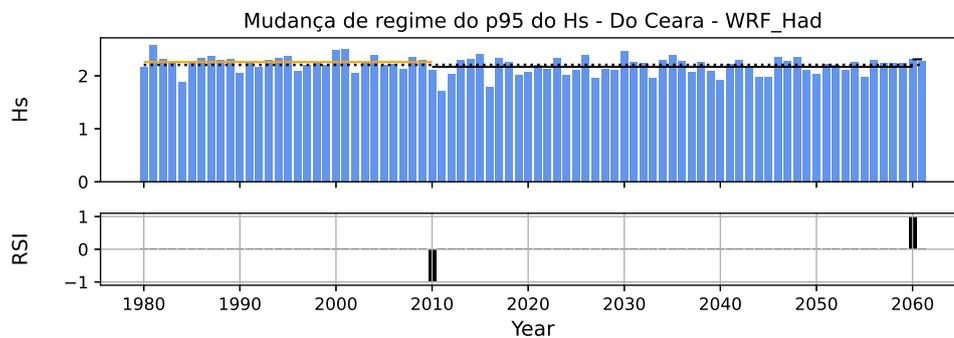
Figura B.25: Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia do Ceará.



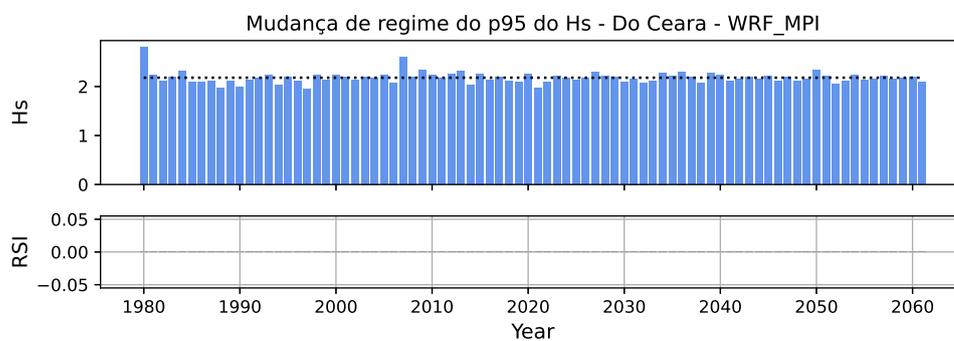
(a)



(b)

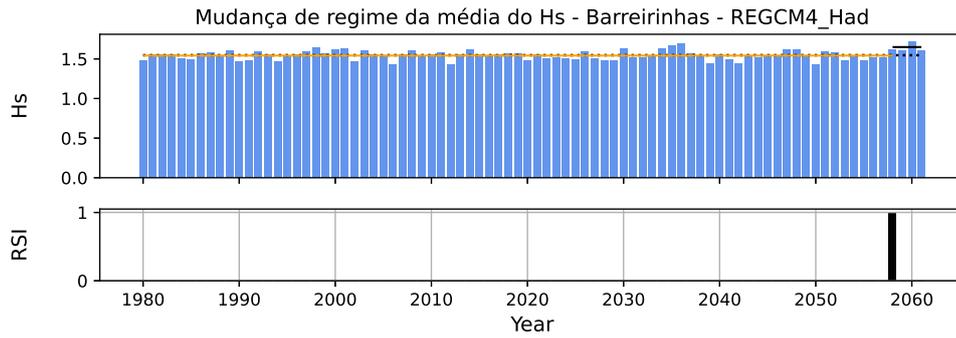


(c)

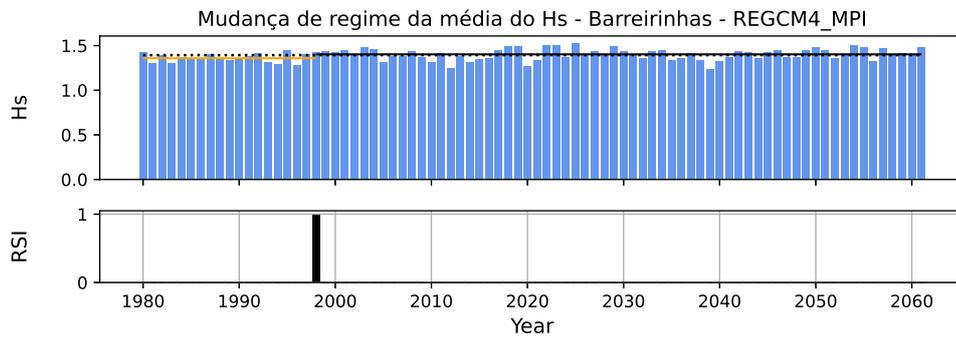


(d)

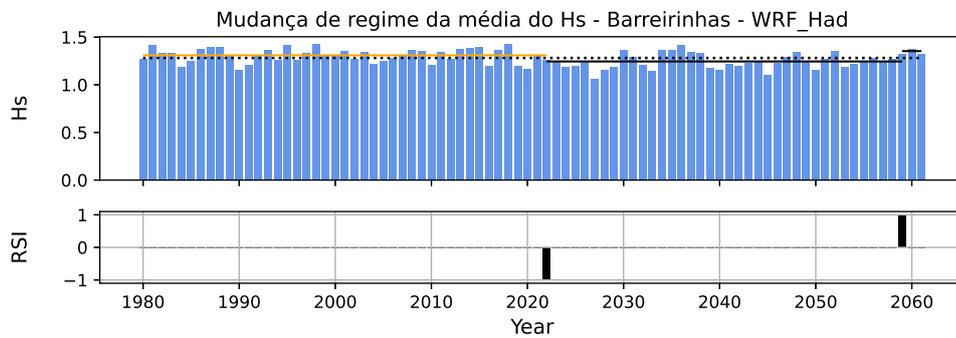
Figura B.26: Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia do Ceará.



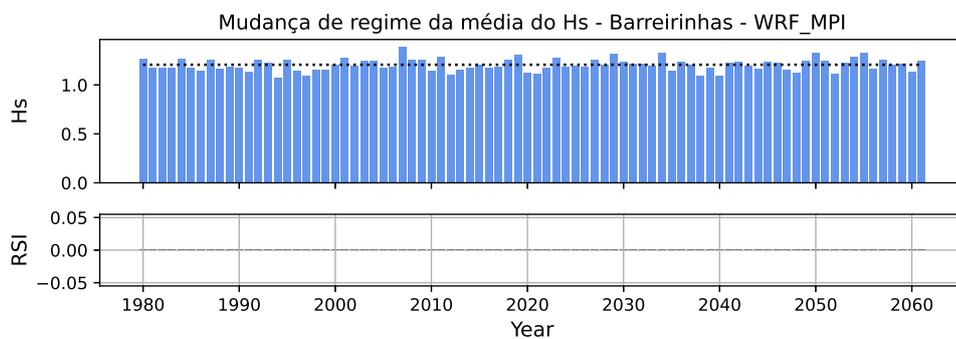
(a)



(b)

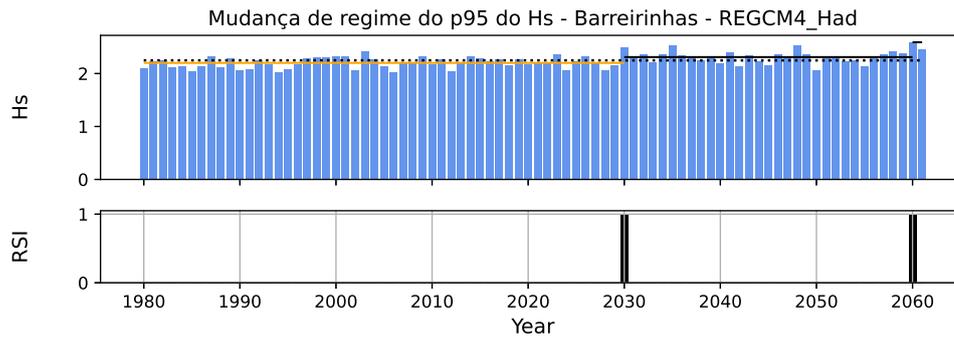


(c)

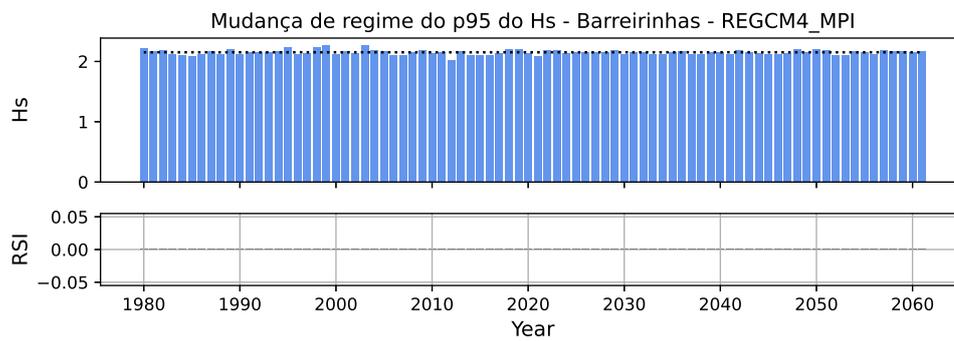


(d)

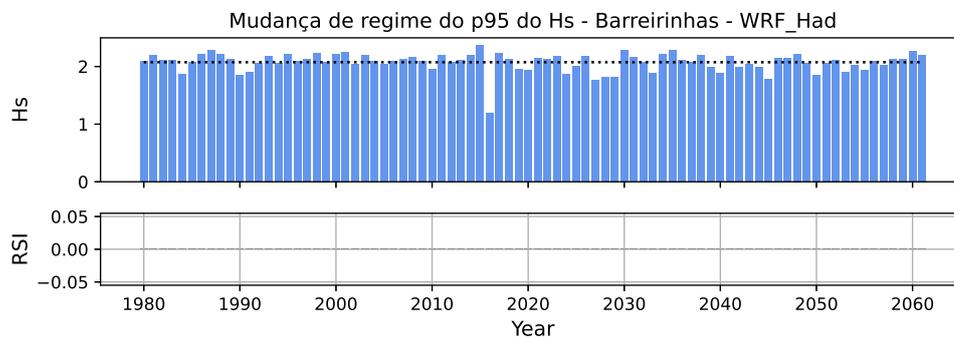
Figura B.27: Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Barreirinhas.



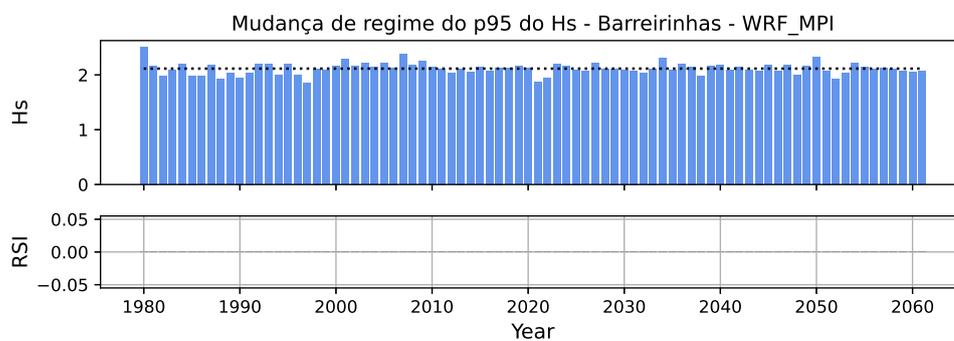
(a)



(b)

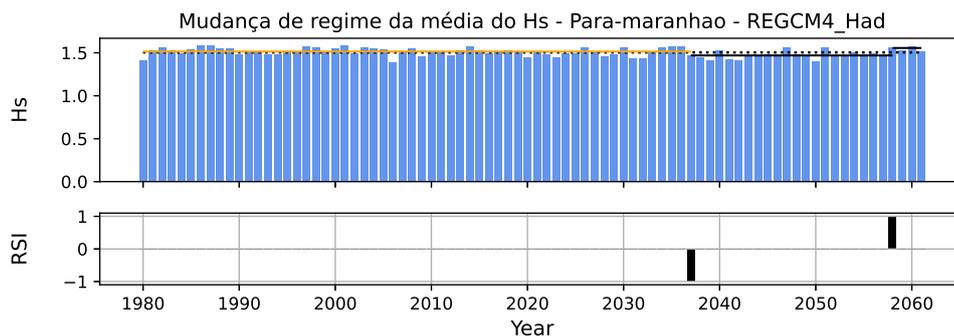


(c)

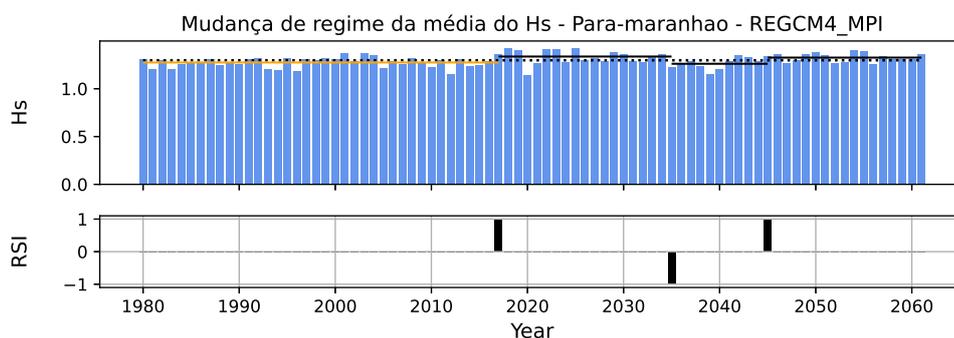


(d)

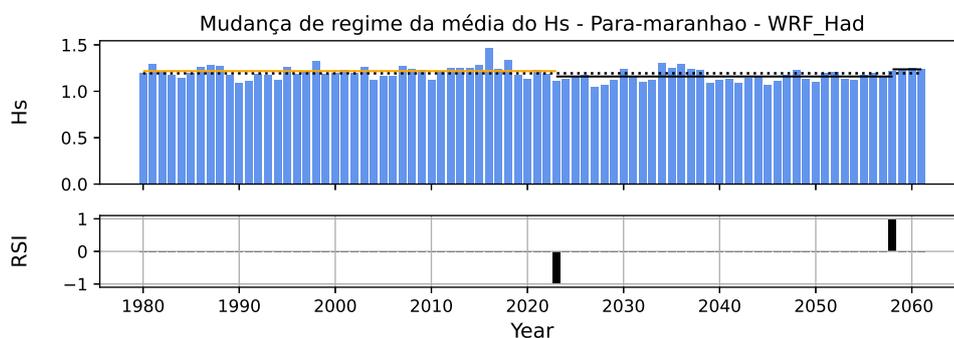
Figura B.28: Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Barreirinhas.



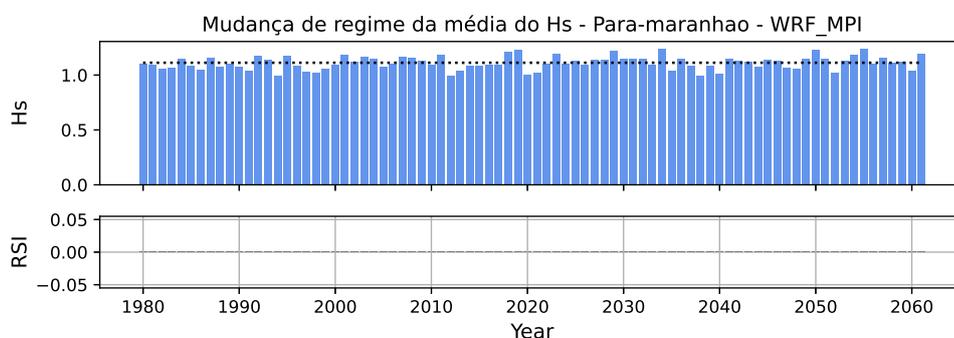
(a)



(b)

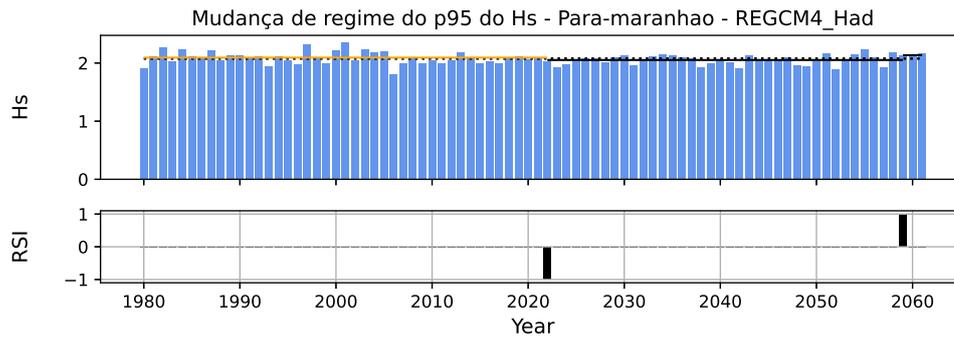


(c)

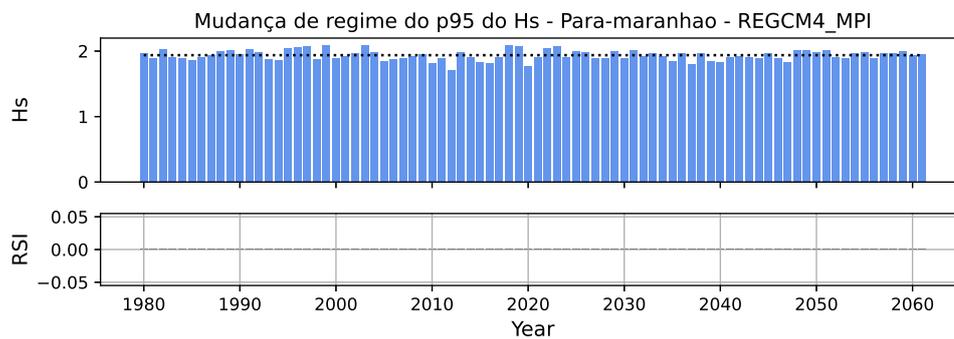


(d)

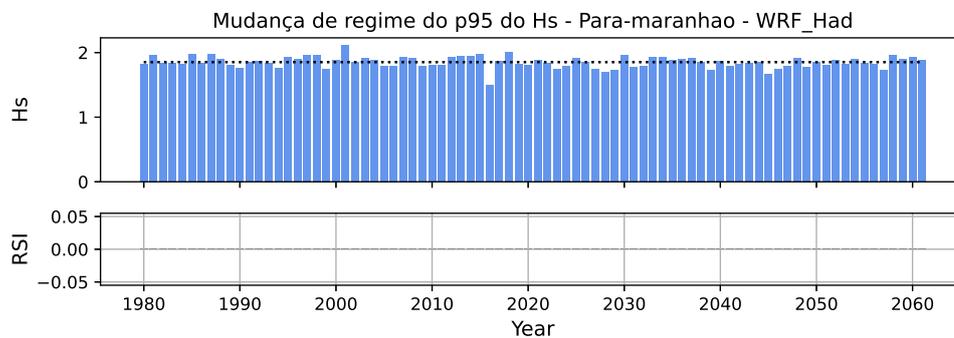
Figura B.29: Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Pará-Maranhão.



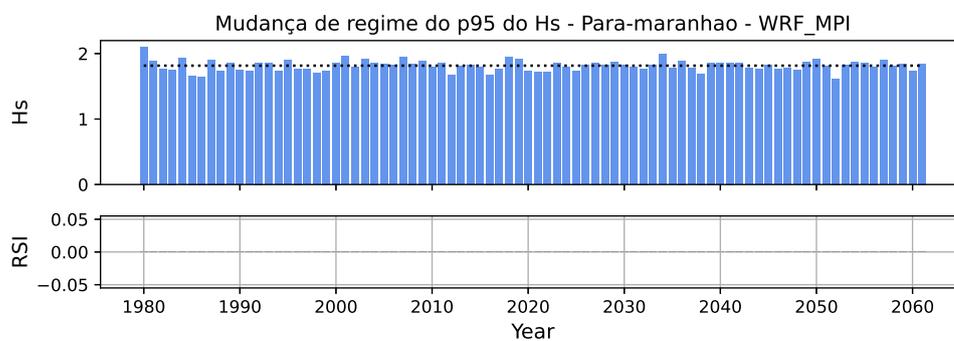
(a)



(b)

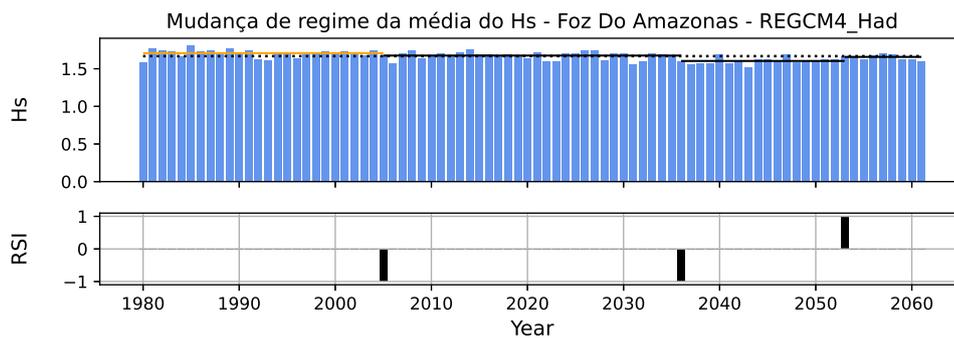


(c)

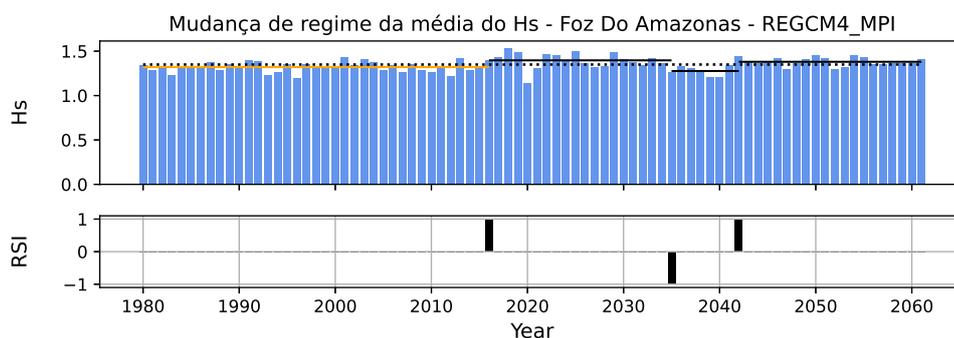


(d)

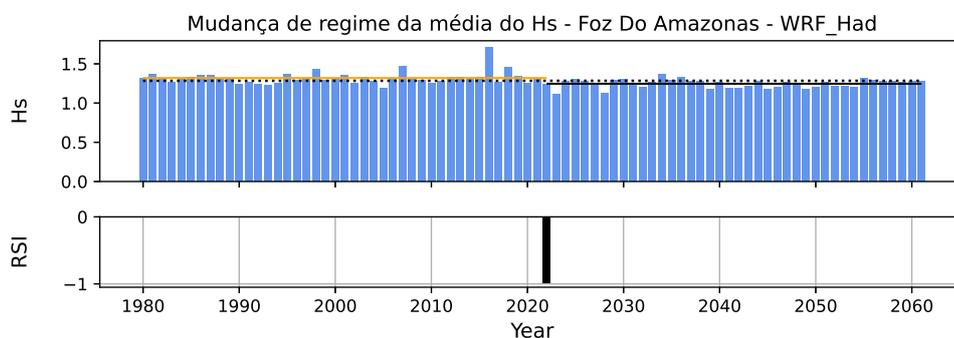
Figura B.30: Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia do Pará-Maranhão.



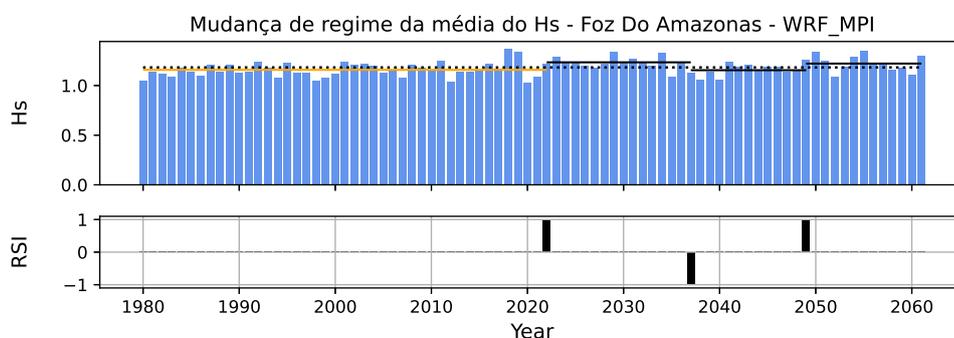
(a)



(b)

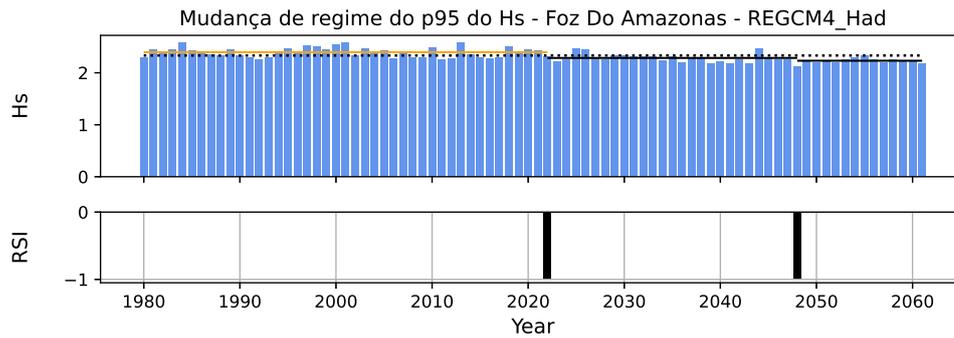


(c)

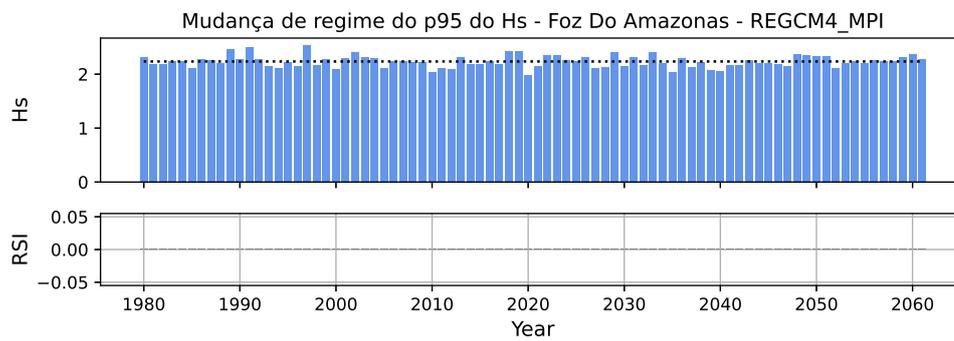


(d)

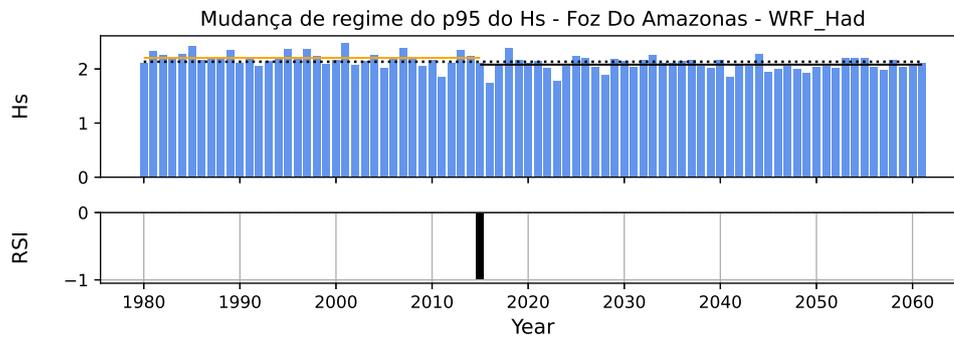
Figura B.31: Séries temporais da média anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia da Foz do Amazonas.



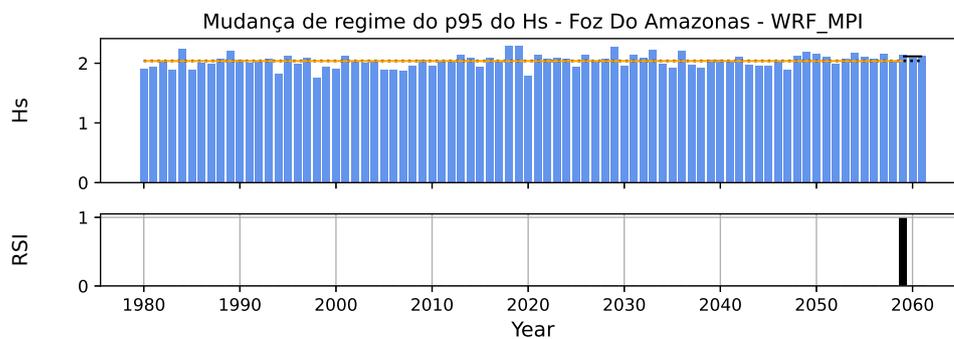
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura B.32: Séries temporais do P95 anual do Hs e as mudanças de regime detectadas pelo método de Rodionov para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia da Foz do Amazonas.

## Apêndice C

---

Análises I-FORM (contornos ambientais) por bacia

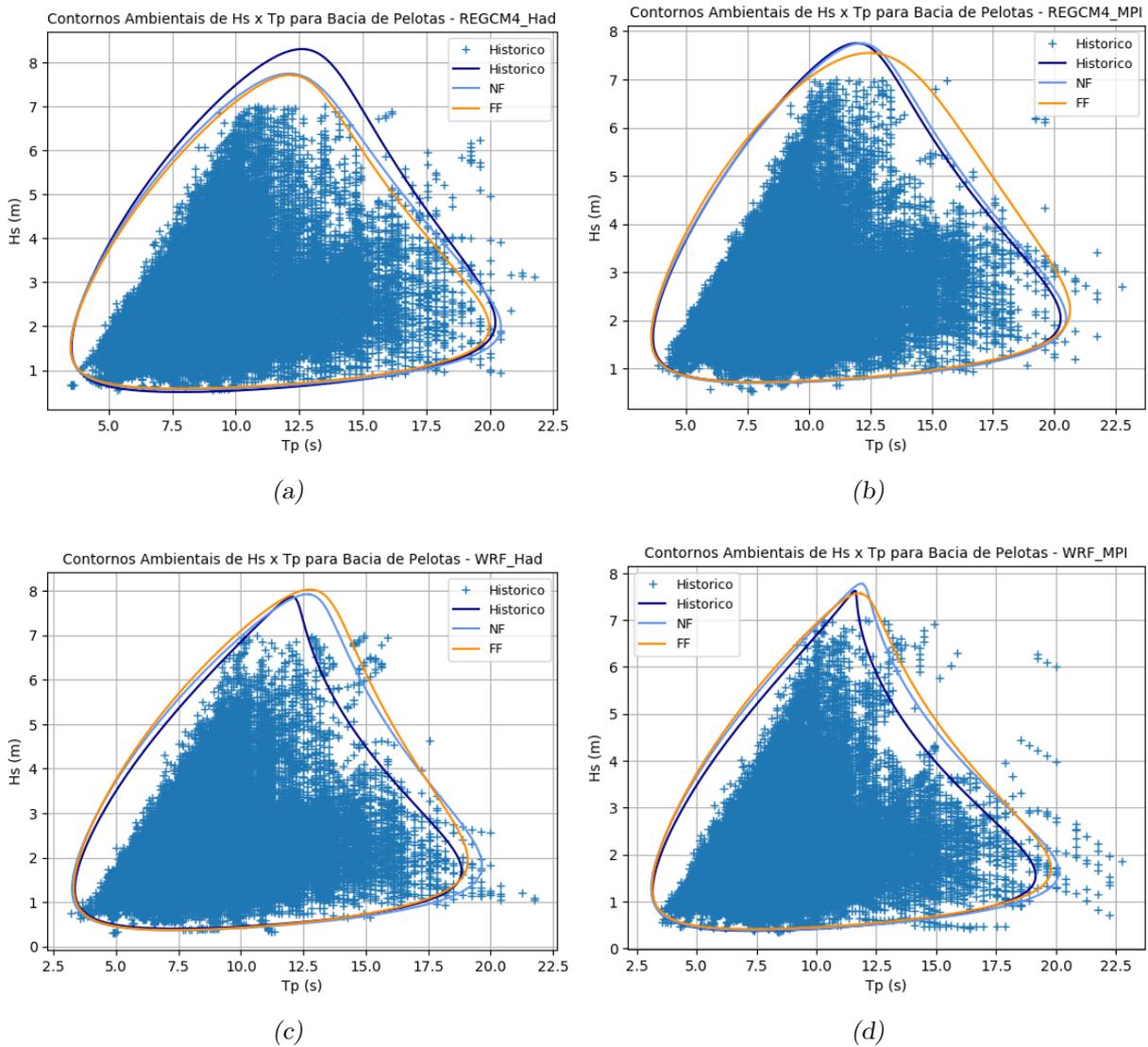


Figura C.1: Contornos ambientais (IFORM) do Hs com Tp associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Pelotas.

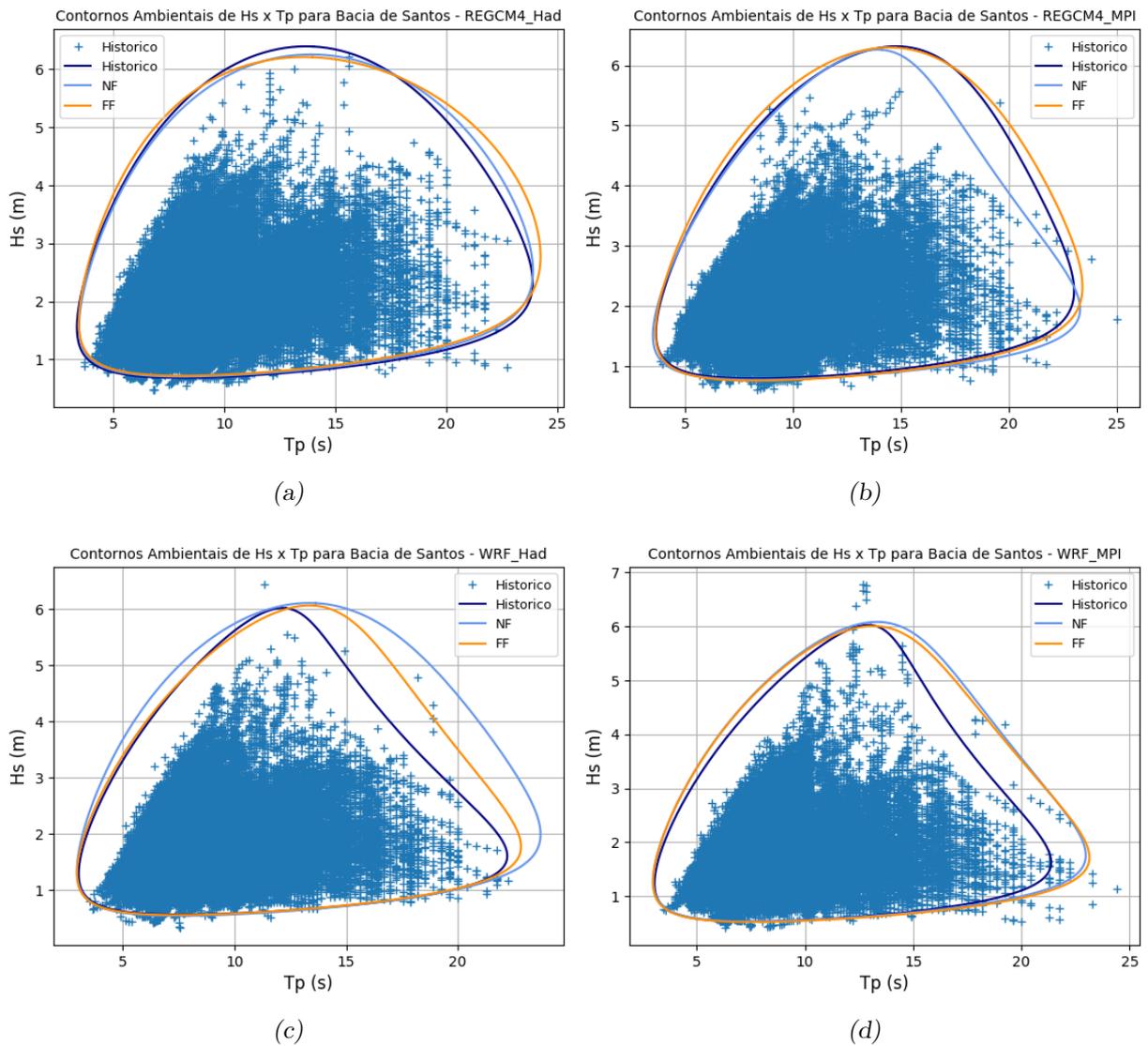


Figura C.2: Contornos ambientais (IFORM) do  $H_s$  com  $T_p$  associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Santos.

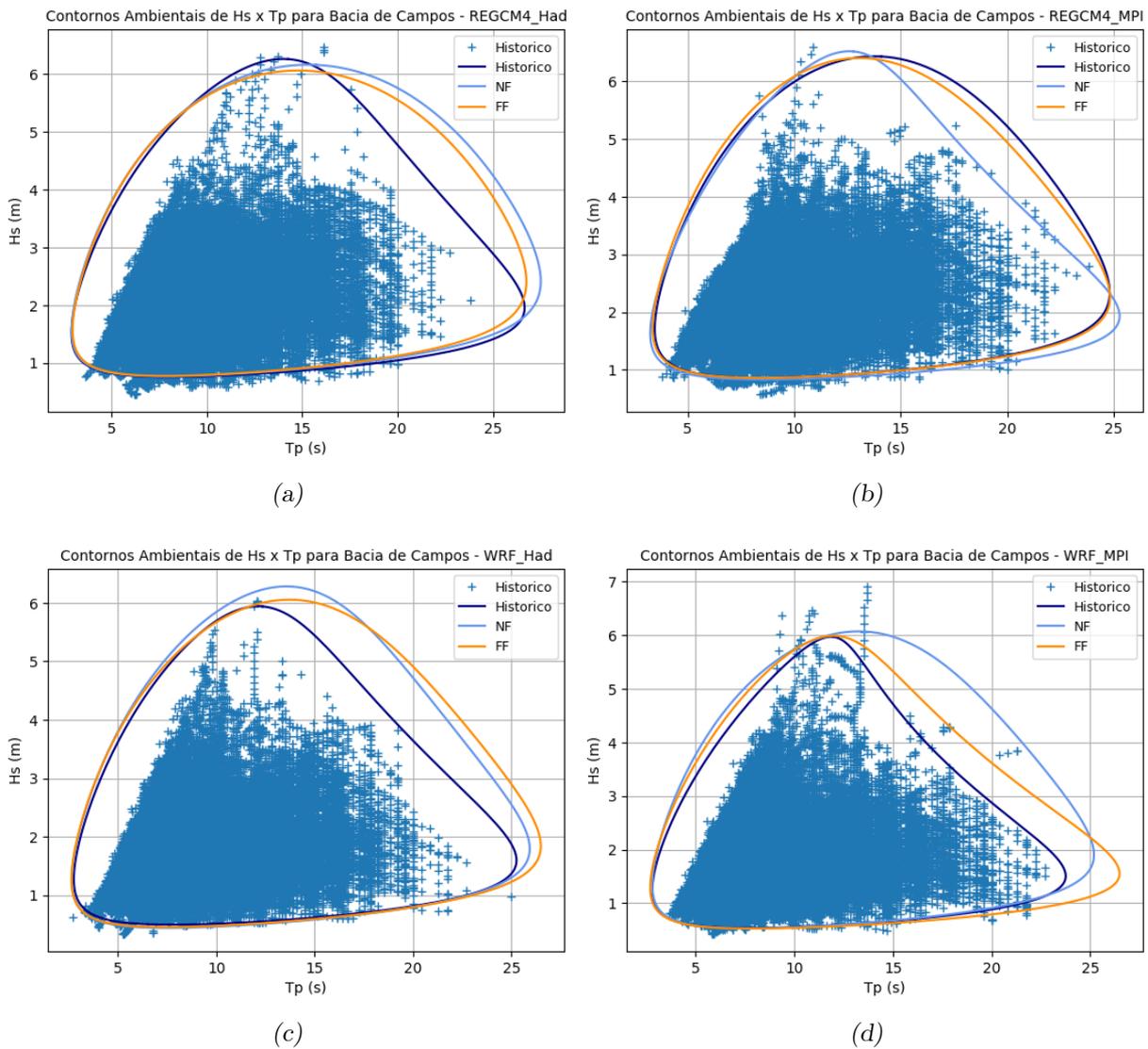


Figura C.3: Contornos ambientais (IFORM) do  $H_s$  com  $T_p$  associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Campos.

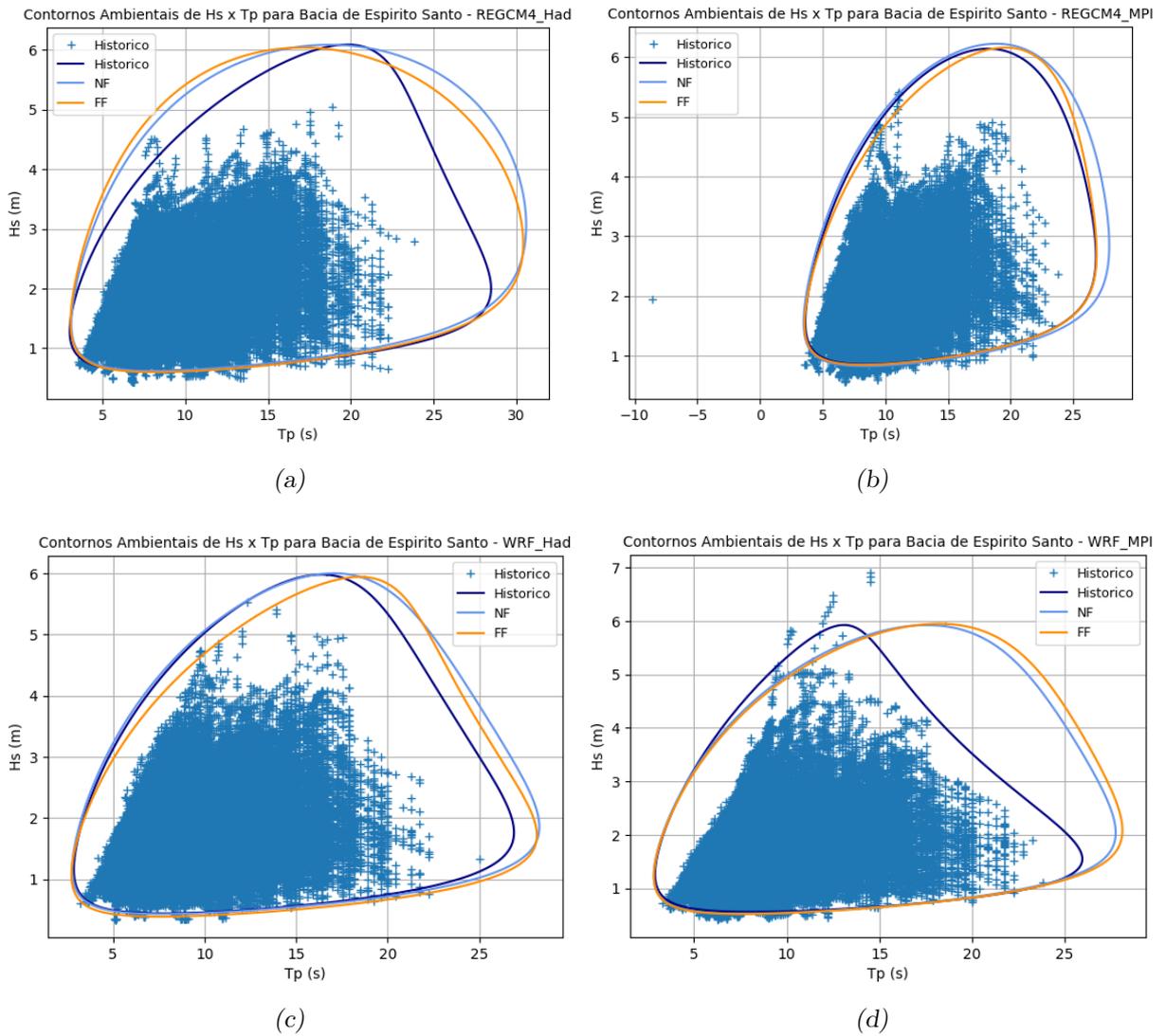


Figura C.4: Contornos ambientais (IFORM) do  $H_s$  com  $T_p$  associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia do Espírito Santo.

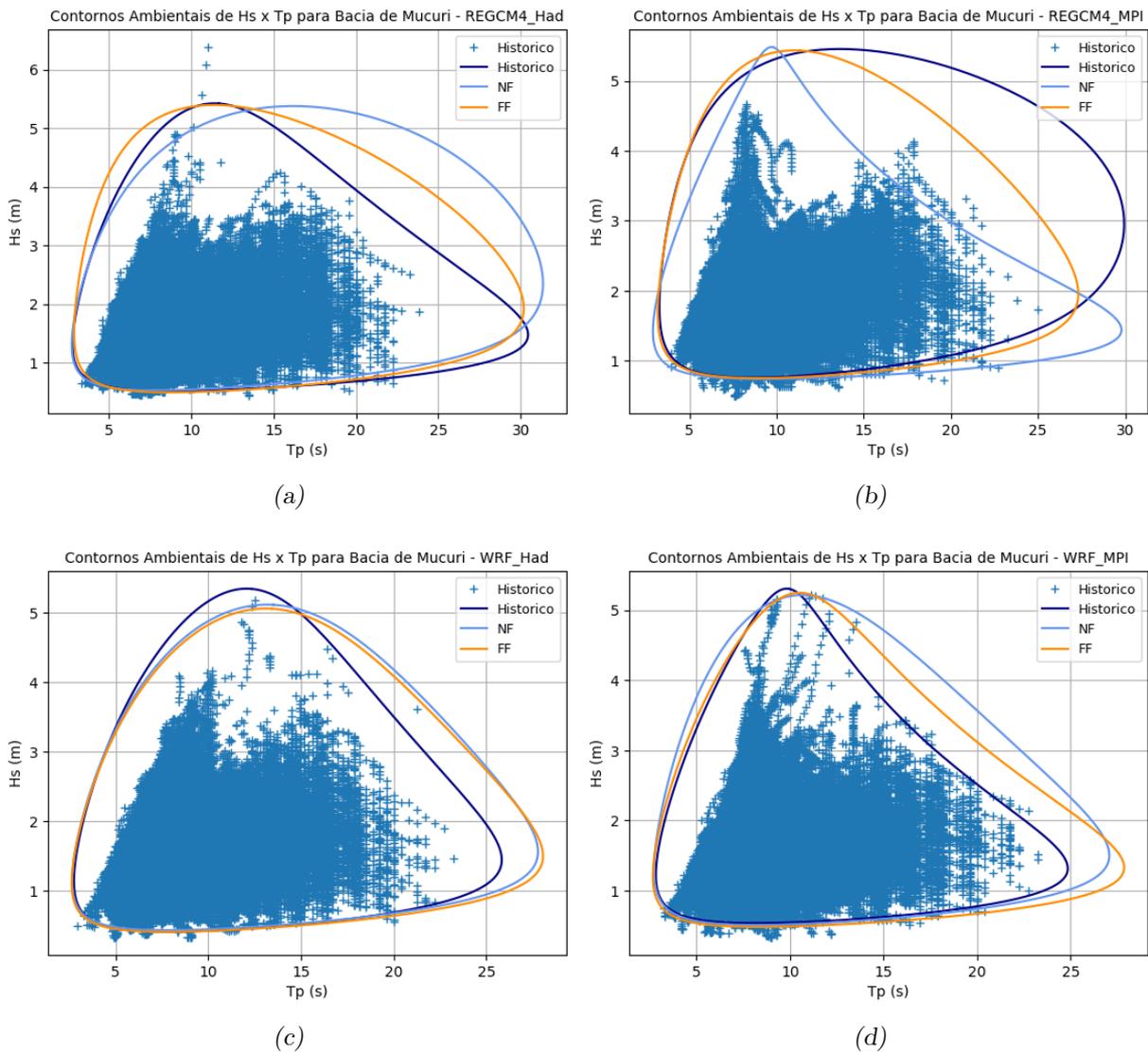


Figura C.5: Contornos ambientais (IFORM) do  $H_s$  com  $T_p$  associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Mucuri.

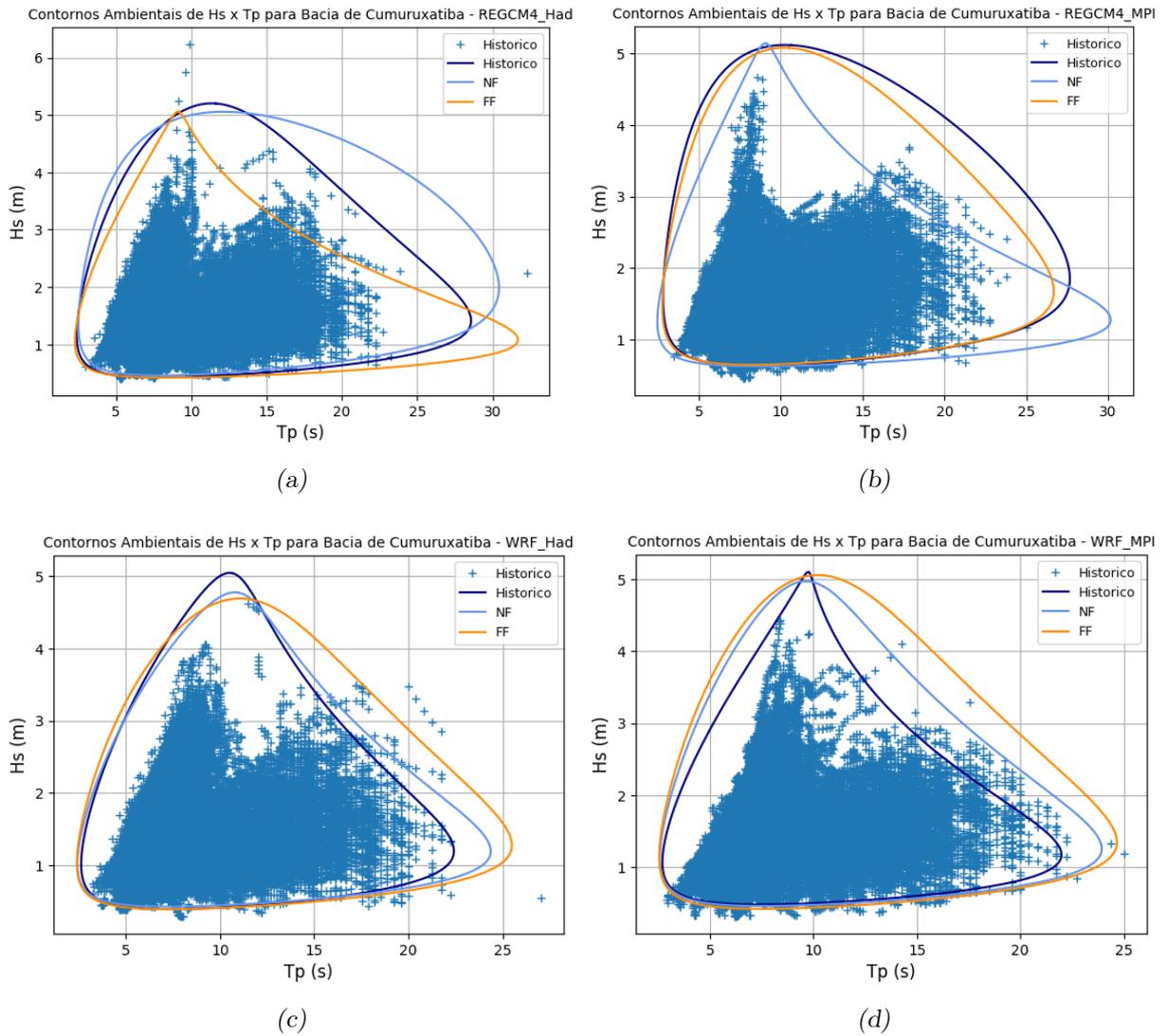


Figura C.6: Contornos ambientais (IFORM) do  $H_s$  com  $T_p$  associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Cumuruxatiba.

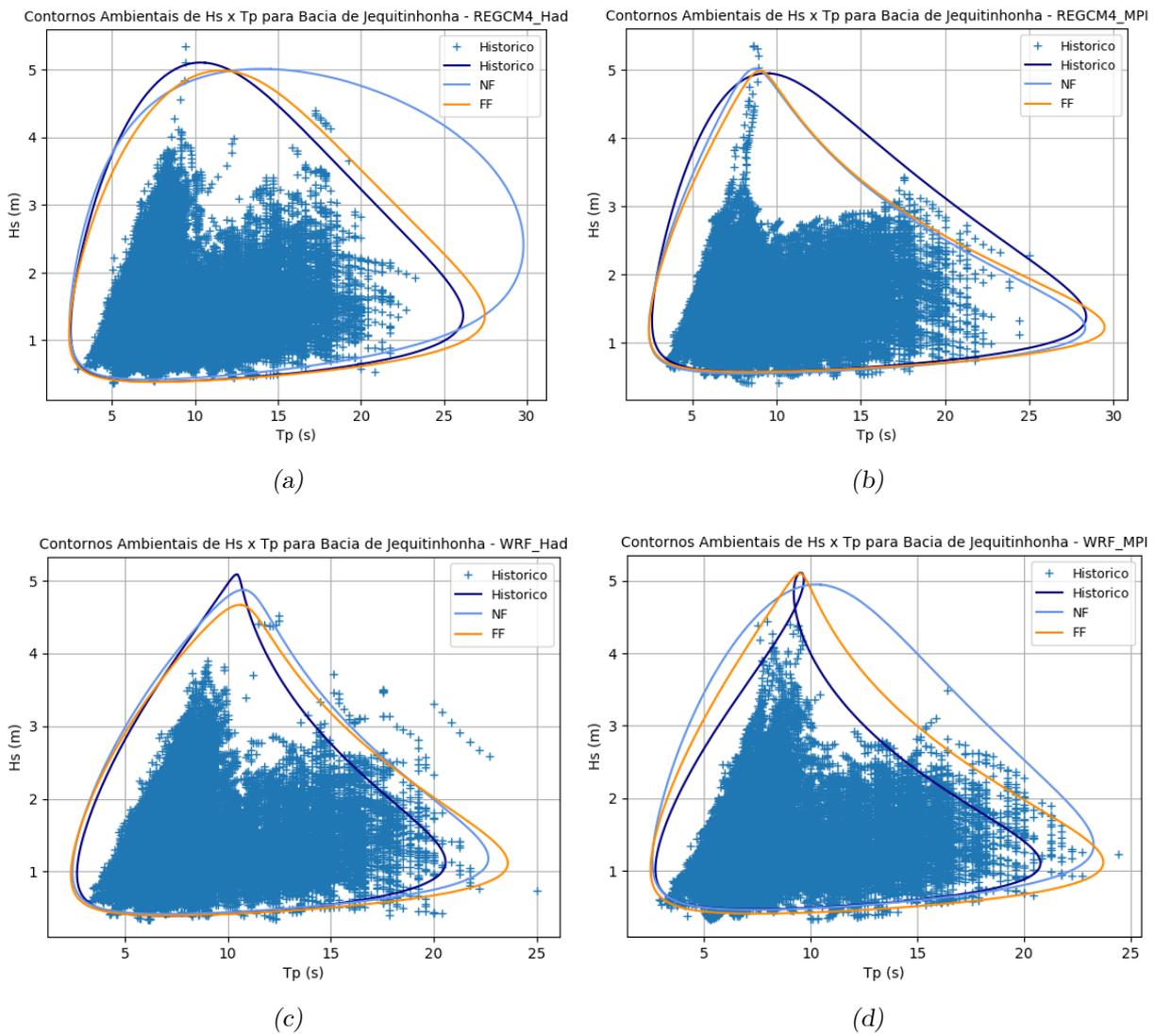


Figura C.7: Contornos ambientais (IFORM) do  $H_s$  com  $T_p$  associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Jequitinhonha.

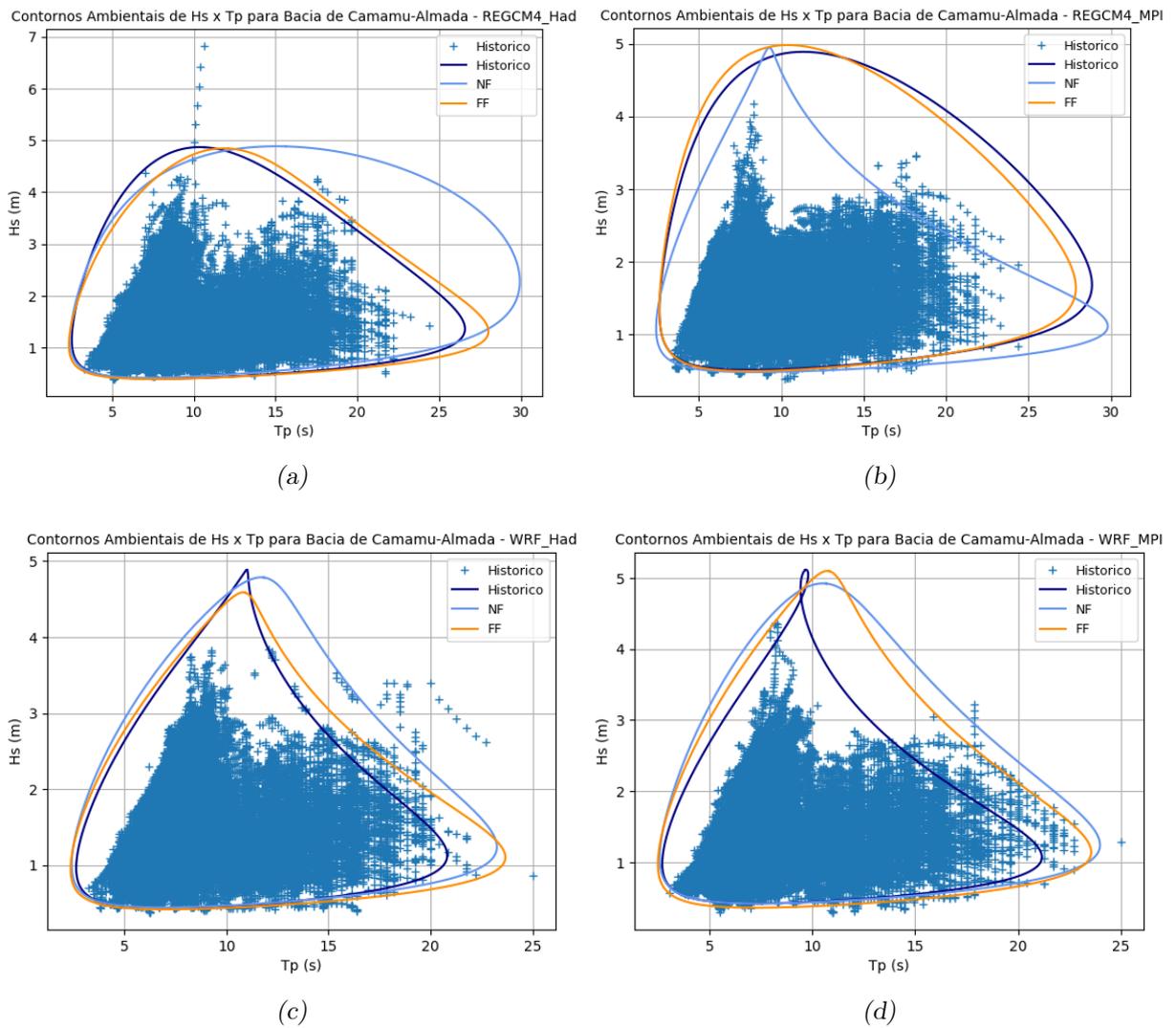


Figura C.8: Contornos ambientais (IFORM) do  $H_s$  com  $T_p$  associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Camamu-Almada.

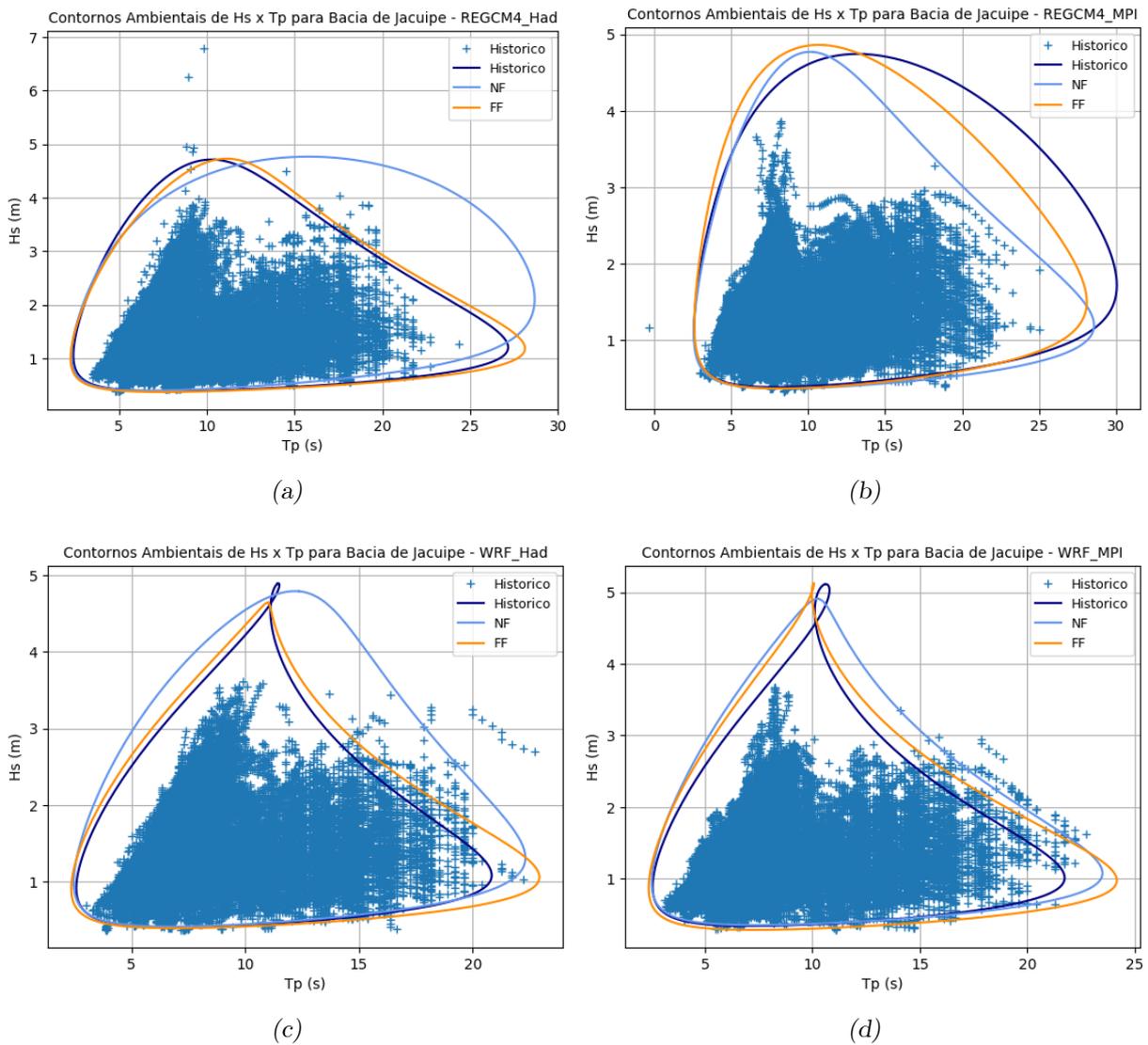


Figura C.9: Contornos ambientais (IFORM) do  $H_s$  com  $T_p$  associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Jacuipe.

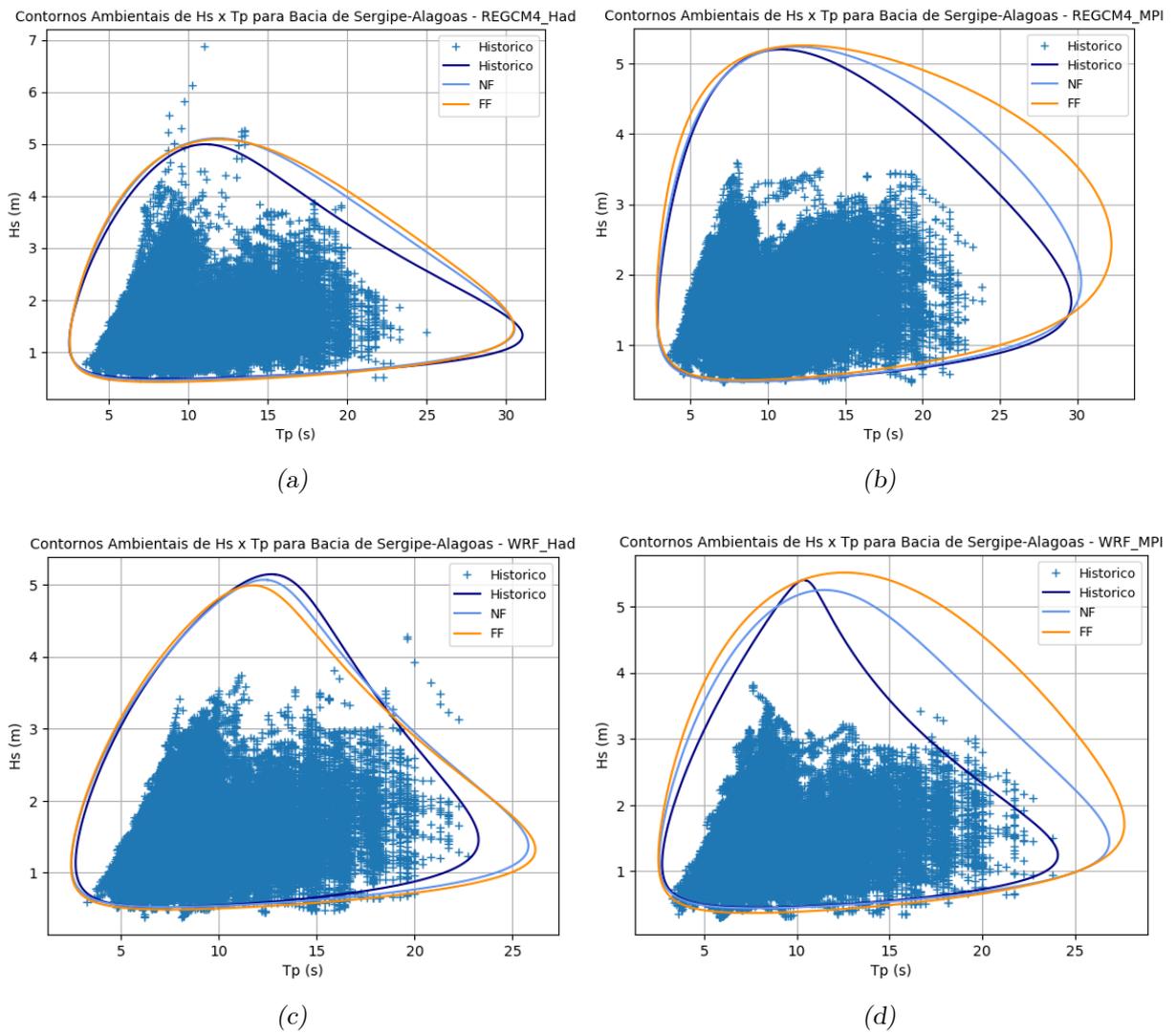


Figura C.10: Contornos ambientais (IFORM) do  $H_s$  com  $T_p$  associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Sergipe-Alagoas.

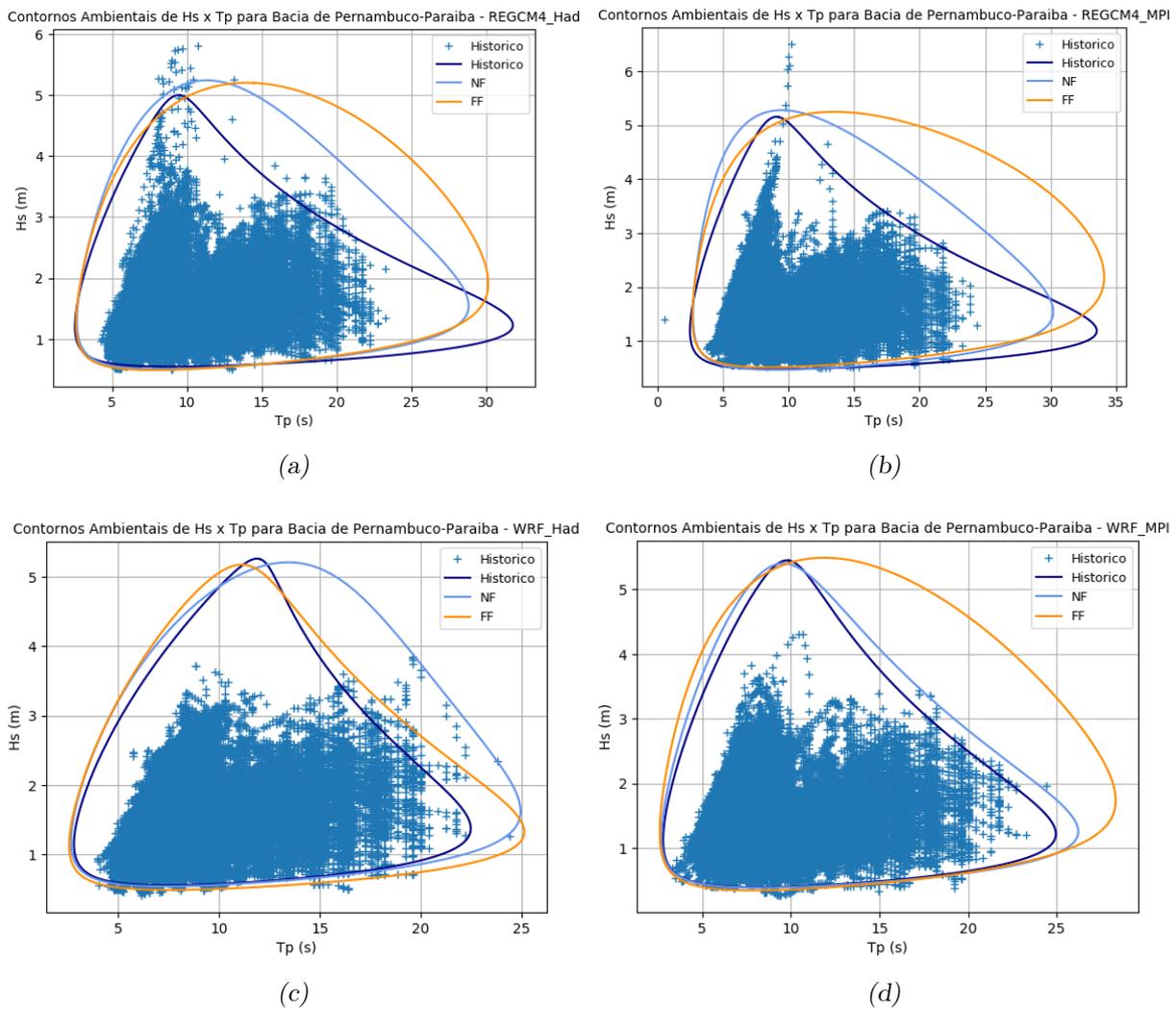


Figura C.11: Contornos ambientais (IFORM) do Hs com Tp associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Pernambuco-Paraíba.

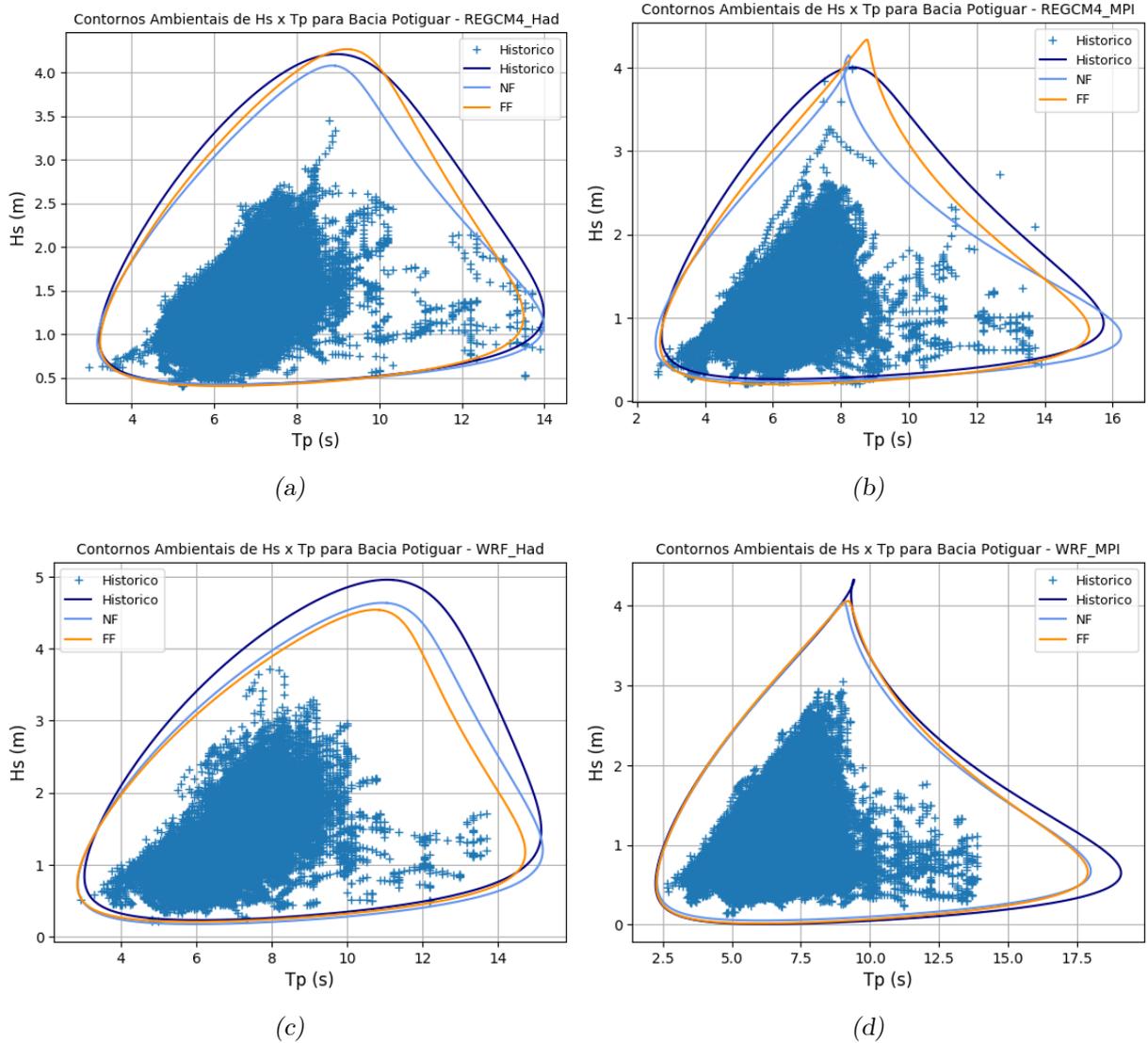


Figura C.12: Contornos ambientais (IFORM) do  $H_s$  com  $T_p$  associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia Potiguar.

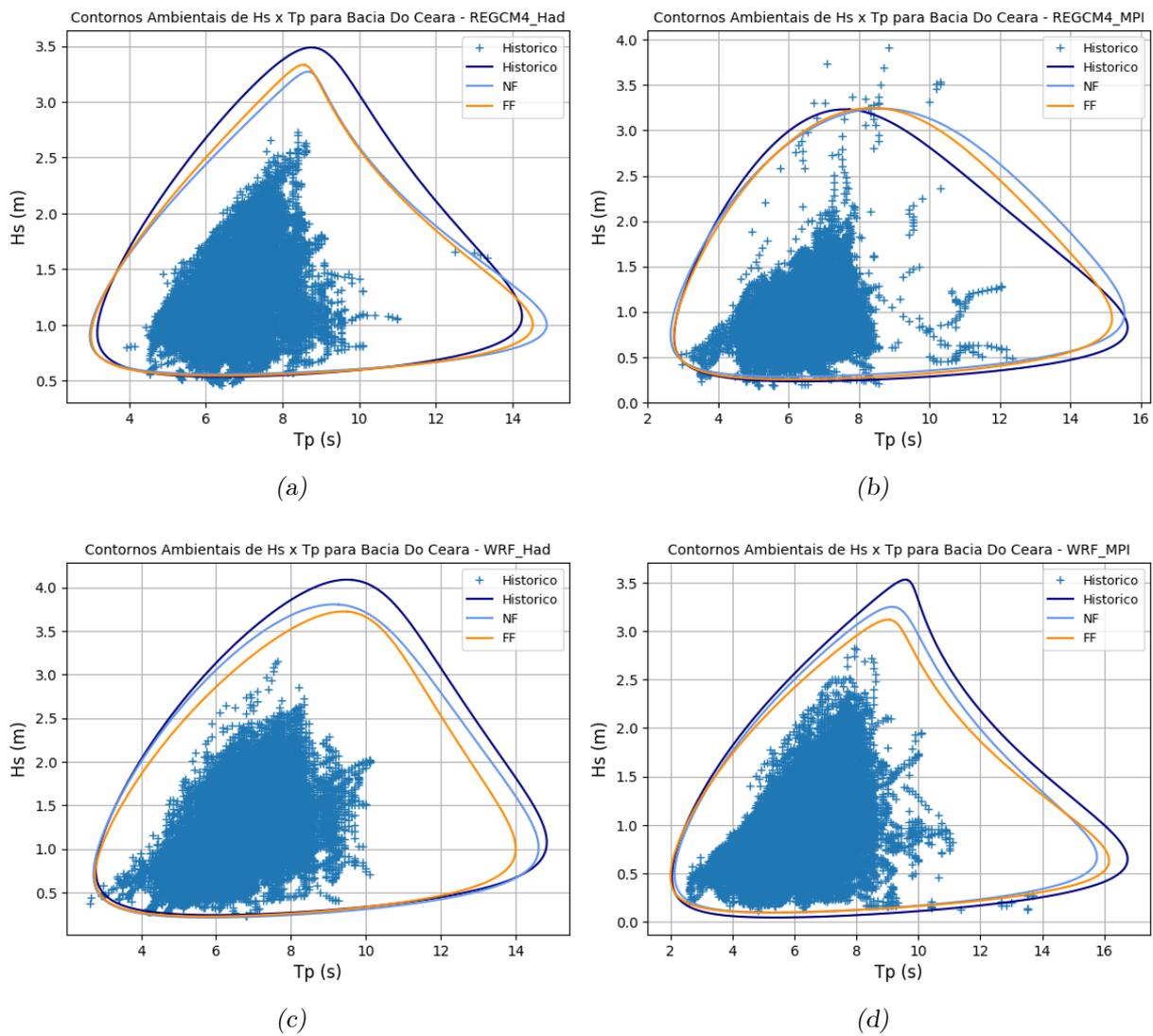


Figura C.13: Contornos ambientais (IFORM) do  $H_s$  com  $T_p$  associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia do Ceará.

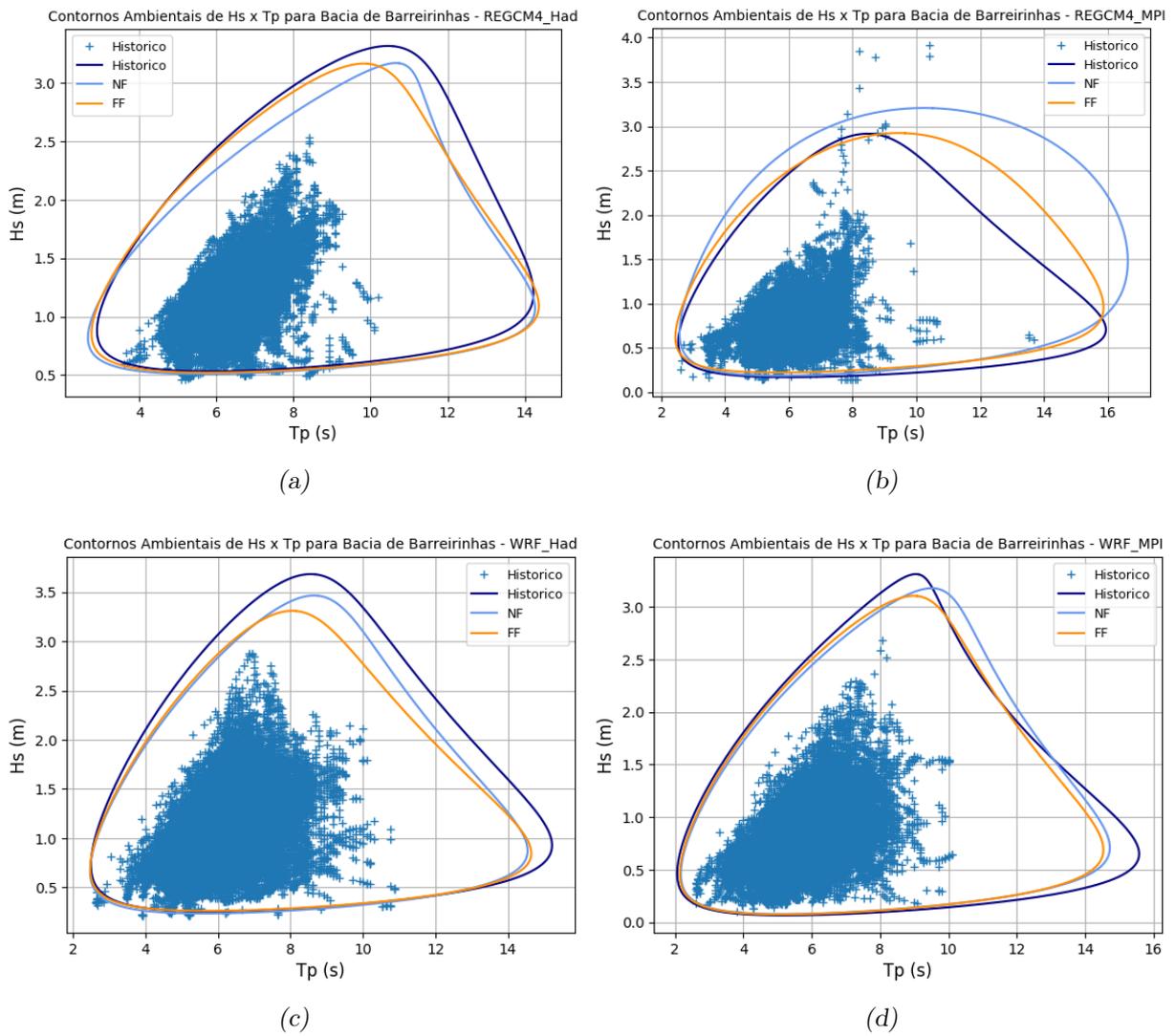


Figura C.14: Contornos ambientais (IFORM) do Hs com Tp associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Barreirinhas.

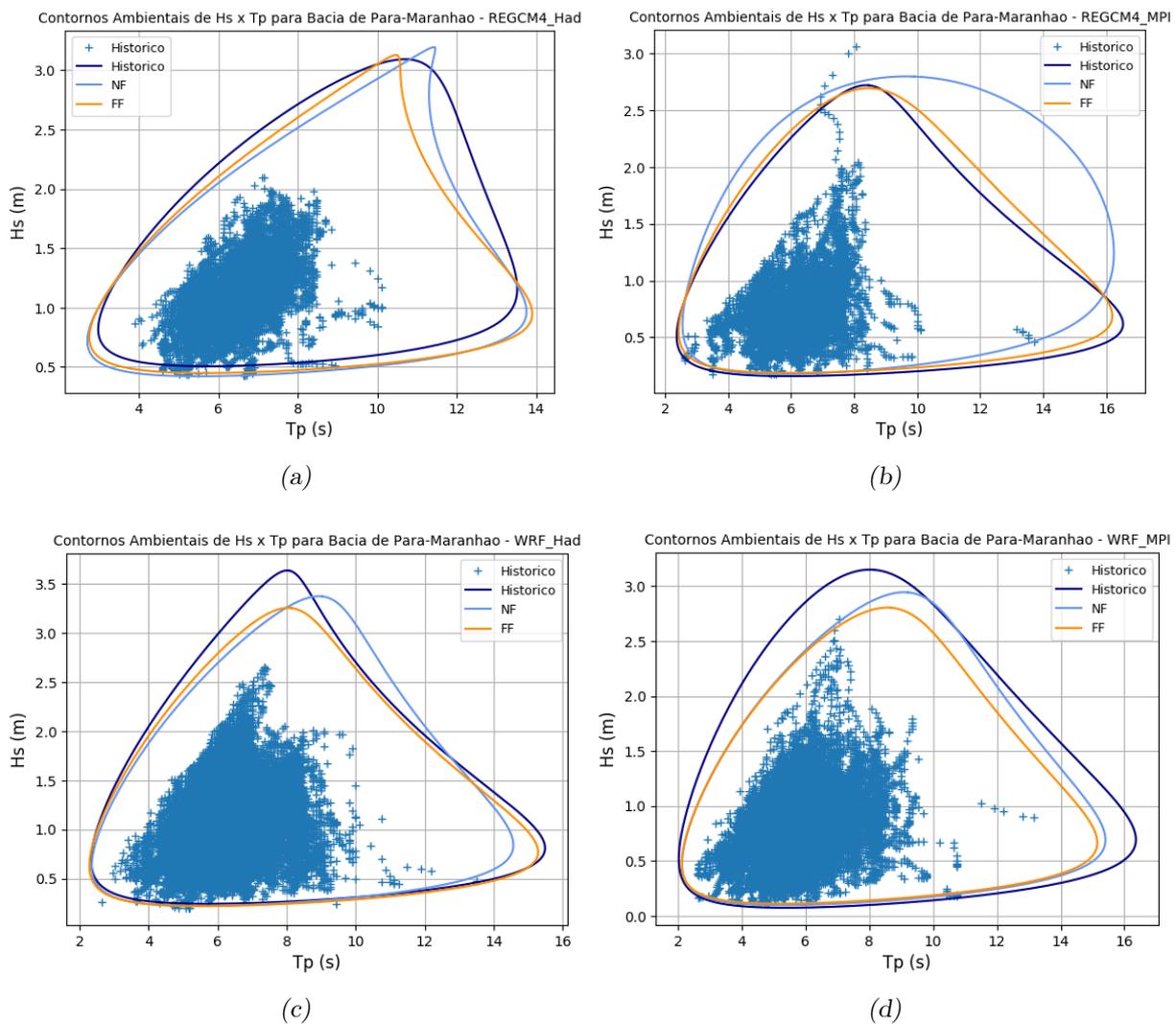


Figura C.15: Contornos ambientais (IFORM) do Hs com Tp associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia de Pará-Maranhão.

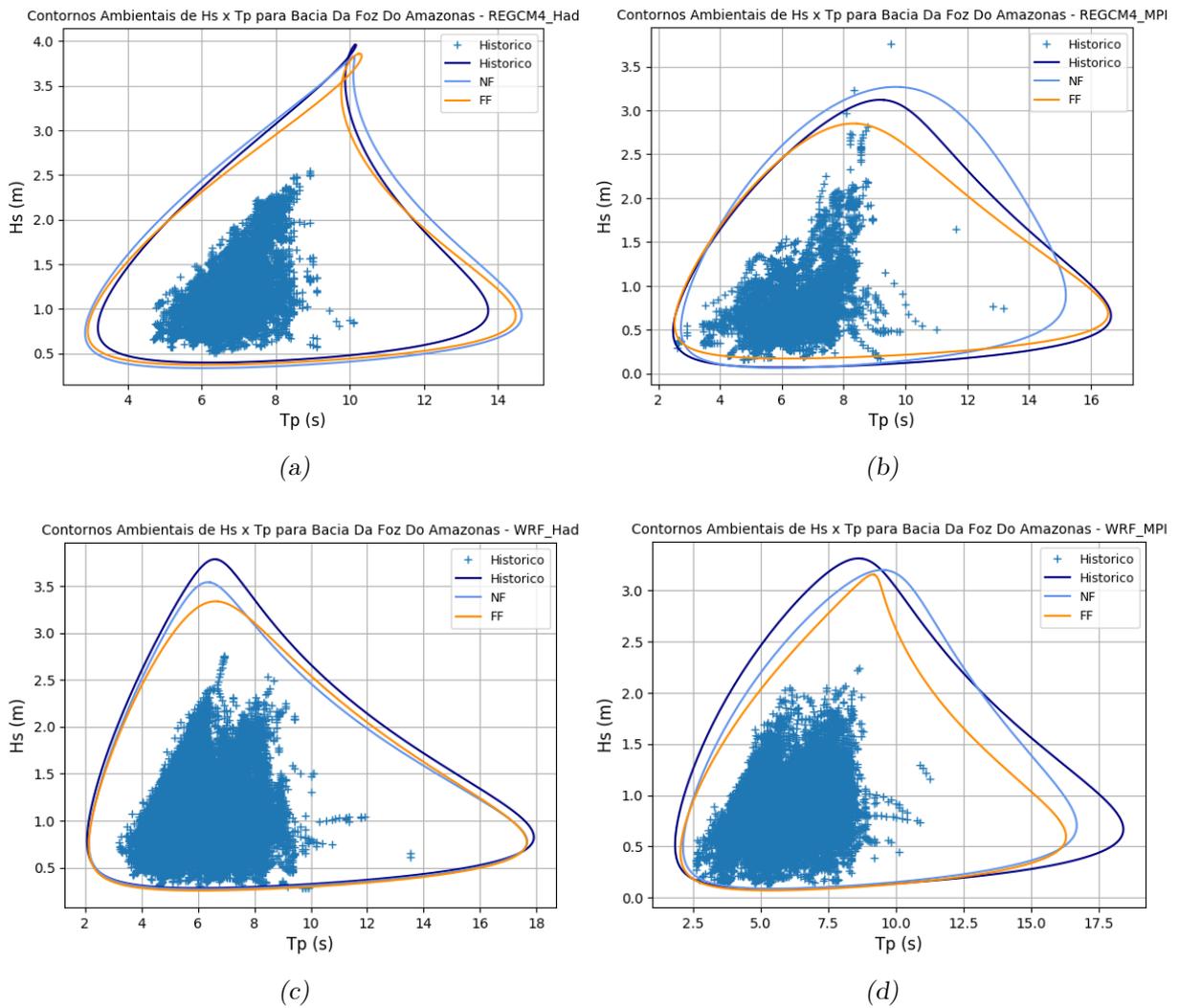


Figura C.16: Contornos ambientais (IFORM) do  $H_s$  com  $T_p$  associado para um período de retorno de 100 anos para os experimentos WW3-RegCM4/Had (a), WW3-Reg/MPI (b), WW3-WRF/Had e WW3-WRF/MPI na bacia da Foz do Amazonas.