Bruna Alves de Oliveira

VARIABILIDADE DO CLIMA DE ONDAS DE SANTA CATARINA-BRASIL UTILIZANDO O MODELO *WAVEWATCH* III

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Oceanografia.
Prof. Dr. Antonio Fernando Härter Fetter Filho

Florianópolis
2017

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

Oliveira, Bruna Alves de
Variabilidade do clima de ondas de Santa Catarina - Brasil utilizando o modelo Wavewatch III / Bruna Alves de Oliveira ; orientador, Antonio Fernando Härter Fetter Filho, 2017.
106 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Oceanografia. 2. modelagem de ondas. 3. índices climáticos. 4. clima de ondas. 5. alterações climáticas. I. Härter Fetter Filho, Antonio Fernando. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia. III. Título.

Aos meus pais...

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por chegar ao fim dessa jornada, pois em alguns momentos de dificuldade cheguei a duvidar se isso seria possível e foi a fé, em acreditar que eu conseguiria, que me manteve no caminho. Além da fé, a persistência foi minha grande aliada e quem me deu forças para continuar foi a minha família, especialmente o Homero e a Nola. Agradeço imensamente por dividir os meus dias com vocês, sejam eles ensolarados ou chuvosos, com vocês tudo tem mais alegria e sentido. Amo vocês!

Gostaria de agradecer aos meus pais, Wagner e Elaine, por todo apoio que vocês continuam me dando ao longo desses anos, sem vocês nada disso seria possível, tenho muita sorte e orgulho em tê-los na minha vida. Além disso, vocês (assim como os pais de muitos outros alunos) são os verdadeiros financiadores da ciência no Brasil. Obrigada pela confiança. Vocês são demais! E esse trabalho dedico a vocês!

Tenho dois pais e duas mães, os que me colocaram no mundo e os que colocaram o meu pai no mundo, meus avós Geraldo e Miriam, obrigada por todo o amor!

Não poderia deixar de mostrar a minha gratidão aos professores, especialmente ao Antônio Klein e ao Felipe Pimenta, que se esforçaram e continuam se esforçando diariamente para que o Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da UFSC aconteça. Desejo muito sucesso a vocês e a todos os alunos que entrarem no programa. E já que comecei a falar sobre professores não poderia deixar de fora o meu orientador, Antonio Fetter, a quem sou grata pela oportunidade de realizar esse trabalho, e a banca avaliadora dessa dissertação, o Prof. Mario Quadros do Instituto Federal de Santa Catarina e ao Prof. Rodrigo Barletta da CB&I, por todas as sugestões e aprendizado que recebi de vocês. Agradeço também ao INCT – Mar Centro de Oceanografia Integrada pela bolsa de estudo nesses vinte quatro meses.

Agradeço de coração ao Fernando Sobral por toda a paciência em me ensinar a usar o modelo *Wavewatch*, por me aguentar e me salvar em todas as vezes que o cluster travava e eu enviava mensagem pedindo socorro. E também por toda a leitura, crítica e sugestões que você fez ao artigo submetido.

Na reta final deste trabalho eu ganhei uma oportunidade de trabalhar com a equipe do SiMCosta - SC, isto foi o que me deu “o gás” para encerrar a dissertação. Então agradeço a todos da por toda companhia e conversas do dia a dia, em especial ao professor Carlos Garcia pela oportunidade e conselhos.

Por fim, mas não menos importante, queria expressar que foi uma honra fazer parte da primeira turma do PPGOceano junto com a Laís, Fernando, Marcão, Faynna, Homero, Maíra, Gabi, Letícia, Jonas e Pinho. Adorei conhece-los! Lais e Fernando muito obrigada por todas as trocas de experiências em matlab, nas disciplinas e nas conversas alheias que tivemos. Quem tem amigos nessa vida tem tudo! E por isso termino agradecendo aos amigos que fiz durante esse caminho e aos que continuam me acompanhando ao longo dos anos, Adriana, Kalina, Charline e Paula. Obrigada por tudo!

“O que sabemos é uma gota; o que ignoramos é um oceano.”
Isaac Newton

RESUMO

Evidências indicam que estão ocorrendo mudanças no clima, porém, existem incertezas em relação às taxas e padrões dessas alterações. Foi constatado que as alterações no clima de ondas possuem relação com as mudanças climáticas. Isso levanta a necessidade de uma avaliação a longo prazo do clima de ondas em regiões do mundo todo. Portanto, neste trabalho é proposto um estudo sobre as alterações no clima de ondas na região oceânica de Santa Catarina e sua relação com alguns índices climáticos. Para isso foram simulados trinta e dois anos de dados de ondas através do modelo *Wavewatch* 3 (WW3) em uma grade local, com resolução de 6 km para a região de Santa Catarina. Esta grade foi aninhada a outras duas grades (global e regional), com intuito de realizar um refinamento dinâmico das grades e maior resolução para a estimativa do clima de ondas na costa de Santa Catarina. A primeira grade a ser rodada foi a com domínio global de resolução 1/2°, depois foi a grade regional de resolução de 1/4°, e por fim a grade local. Verificou-se que o clima de ondas vem sofrendo alterações espaciais e temporais consideráveis, principalmente em relação à altura significativa da onda (Hs), que apresentou a tendência de aumentar até 0,37cm.ano-1 na porção norte do litoral e 0,15cm.ano-1 na porção sul. Além disso, identificou-se um gradiente de energia de Hs na direção de noroeste para sudeste, e que as estações energéticas são o inverno e a primavera. Para o período de pico (Tp) foi encontrado um aumento gradual na direção sudoeste para nordeste e que no outono e inverno ocorrem os maiores valores médios. Por fim, este trabalho evidenciou a influência de fenômenos climáticos na variabilidade do clima de ondas da região encontrando correlações estatisticamente significativas, especialmente com o El Niño, Índice Tropical Atlântico Norte e Modo Meridional do Atlântico.

Palavras-chave: modelagem de ondas, índices climáticos, alterações climáticas, sul do Brasil, WW3, ondas oceânicas, clima de ondas

ABSTRACT

Evidences indicate that the earth's climate is changing, however, there're many uncertainties regarding the rates and patterns of these changes. It has been found that many wave climates have changes related to climatic variations, showing the need for a long term evaluation of the wave climate in regions around the world. Therefore, this work proposed to study the changes in the offshore wave climate in the Santa Catarina and its relation with some climatic indices. For this, thirty-two years of wave fields were generated in Wavewatch 3 model (WW3) in a local grid, with a resolution of 6 km for the Santa Catarina region, nested to two other grids (global and regional grid) for a dynamic refinement of the wave climate on the coast of Santa Catarina. The first grid to be run was the global domain with resolution of 1/2°, followed by the regional grid with resolution grid of 1/4°, and finally the local grid. It was found that the wave climate presented considerable changes over time and spatially, mainly significant wave height (Hs), which showed a tendency to increase up to 0.37cm.year-1 along the northern coast of Santa Catarina and 0.15cm.year1 along the southern coast. Furthermore, an energy gradient of Hs was identified from southeast to northwest, and winter and spring are the most energetic seasons. For the peak period (Tp) a gradual increase was found in the southwest to the northeast direction and that in the autumn and winter the highest average values occur. Finally, this work evidenced the influence of climatic phenomenon on the variability of the region's wave climate, finding statistically significant correlations, especially with the El Niño, Tropical North Atlantic Index and Atlantic Meridional Mode.

Keywords: wave modeling, climate indices, climate change, southern Brazil, WW3, ocean waves

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da área de estudo pela base de dados ESRI (ARCGIS 10.1).....30

Figura 2. Fluxo de energia sazonal representado pelo método ESTELA para a região de Santa Catarina (PEREZ *et al*, 2014b). A) a estação do verão, B) outono, C) inverno e D) primavera. A área colorida representa o fluxo de energia em (kW/m/°), as linhas vermelhas representam as direções divididas em 16 setores e as pretas, o tempo de viagem em dias.....32

Figura 3. Velocidade média dos ventos sazonais da reanálise CFSR na região de Santa Catarina durante o período 1979 a 2010. A) a estação do verão, B) outono, C) inverno e D) primavera.....38

Figura 4 – Funções ortogonais empíricas da velocidade média dos ventos da reanálise CFSR na região de Santa Catarina, durante o período de 1979 a 2010. A) FOE1, B) FOE 2, C) FOE 3 e D) FOE 4.....40

Figura 5. Batimetria do ETOPO1 em metros. A) grade global, B) grade regional, C) grade local, utilizadas no modelo WW3. O retângulo preto no meio da imagem (A) representa o domínio da grade regional e o retângulo preto na imagem (B) representa o domínio da grade local.....41

Figura 6. Índices Climáticos utilizados neste trabalho. A) El Niño 3.4 (Niño 3.4); B) *Tropical Northern Atlantic Index* (TNA); C) *Tropical Southern Atlantic Index* (TSA); D) *Pacific Decadal Oscillation* (PDO), E) *Antarctic Oscillation* (AAO); *F) Atlantic Meridional Mode* (AMM)*; G) Tropical Western Hemisphere Warm Pool* (WHWP).....43

Figura 7. Fluxograma da metodologia de trabalho utilizada neste estudo.....44

Figura 1. Batimetria do ETOPO1 em metros. A) grade global, B) grade regional, C) grade local, utilizadas no modelo WW3. O retângulo preto no meio da imagem (A) representa o domínio da grade regional e o retângulo preto na imagem (B) representa o domínio da grade local.....51

Figura 2. Localização das boias PnSC, PnRG e do ondógrafo WR utilizados para validação. O retângulo dentro da figura ilustra o domínio

da grade local, o qual a localização da boia PnSC e o WR estão inclusas. Já a boia PnRG encontra-se localizada no domínio regional.....52

Figura 3. Índices Climáticos utilizados neste trabalho. A) El Niño 3.4 (Niño 3.4); B) *Tropical Northern Atlantic Index* (TNA); C) *Tropical Southern Atlantic Index* (TSA); D) *Pacific Decadal Oscillation* (PDO), E) *Antarctic Oscillation* (AAO); *F) Atlantic Meridional Mode* (AMM)*; G) Tropical Western Hemisphere Warm Pool* (WHWP)..... 55

Figura 4. Diferença média do ano de 2010 de Hs modelado menos a Hs medido por satélites disponibilizadas pela AVISO.....56

Figura 5. Valores de altura significativa (Hs). A) ponto WR de março de 2002 até agosto de 2005, B) ponto PnSC de abril de 2009 até novembro de 2009, C) ponto PnRG de abril de 2009 até dezembro de 2009. Em vermelho estão representados os produtos do modelo (WW3).....57

Figura 6. Valores de período de pico (Tp). A) ponto WR de março de 2002 até agosto de 2005, B) ponto PnSC de abril de 2009 até novembro de 2009, C) ponto PnRG de abril de 2009 até dezembro de 2009. Em vermelho estão representados os produtos do modelo (WW3).....60

Figura 7. Valores de direção de pico (θp). A) ponto WR de março de 2002 até agosto de 2005, B) ponto PnSC de abril de 2009 até novembro de 2009, C) ponto PnRG (c) de abril de 2009 até dezembro de 2009. Em vermelho estão representados os produtos do modelo (WW3).....61

Figura 8. Gráfico de dispersão entre os modelados e observados de Hs e Tp nos três pontos. A) ponto WR, B) ponto PnSC, C) ponto PnRG. A linha vermelha é a regressão linear das variáveis e a linha preta a bissetriz.....62

Figura 9. Média sazonal de Hs em metros obtidas pelo modelo WW3 no período de 1979 a 2010. A) verão, B) outono, C) inverno, D) primavera..... 64

Figura 10. Média sazonal de Tp em segundos obtidas pelo modelo WW3 no período de 1979 a 2010. A) verão, B) outono, C) inverno, D) primavera.....65

Figura 11. Diagrama de caixa mensal de Hs nos pontos 1, 2 e 3 para as décadas de 1980, 1990 e 2000.....66

Figura 12. Diagrama de caixa mensal de Tp nos pontos 1, 2 e 3 para as décadas de 1980, 1990 e 2000.....68

Figura 13. Diagrama de caixa mensal de θp nos pontos 1 (26,5°S; 47,8°W), 2 (29,2°S; 48,8°W;) e WR (27,63°S; 48,19°W) para as décadas de 1980, 1990 e 2000.....69

Figura 14. FOEs de Hs mensal obtidas do produto do modelo WW3 no período de 1979 a 2010. A) FOE1 explicando 93,66% da variabilidade, B) FOE2 explicando 4,68%.....71

Figura 15. FOEs de Tp mensal obtidas do produto do modelo WW3 no período de 1979 a 2010. A) FOE1 explicando 91,89% da variabilidade, B) FOE2 explicando 3,89%, C) FOE3 explicando 1,81%.....72

Figura 16. FOEs de Hs interanual obtidas do produto do modelo WW3 no período de 1979 a 2010. A) FOE1 explicando 93,36% da variabilidade, B) FOE2 explicando 4,21%, C) FOE3 explicando 1,18%.....74

Figura 17. FOEs de Tp interanual obtidas do produto do modelo WW3 no período de 1979 a 2010. A) FOE1 explicando 88,03% da variabilidade, B) FOE2 explicando 6,38, C) FOE3 explicando 2,51%.....75

Figura 18. Tendência linear da média anual de Hs pontos 1 (26,5°S; 47,8°W), 2 (29,2°S; 48,8°W;) e WR (27,63°S; 48,19°W). Em azul, a tendência analisada ao longo dos 32 anos e em vermelho, a tendência em cada década.....77

Figura 19. Valores da tendência de Hs, emcm.ano^{-1}, ao longo dos trinta e dois anos analisados na grade local.....78

Figura 20. Tendência linear da média anual de Tp pontos 1 (26,5°S; 47,8°W), 2 (29,2°S; 48,8°W;) e WR (27,63°S; 48,19°W). Em azul, a tendência analisada ao longo dos 32 anos e em vermelho, a tendência em cada década.....79

Figura 21. Tendência linear da média anual de θp nos pontos 1 (26,5°S; 47,8°W), 2 (29,2°S; 48,8°W;) e WR (27,63°S; 48,19°W). Em azul, a

tendência analisada ao longo dos 32 anos e em vermelho, a tendência em cada década.....81

Figura 22. Percentis de altura significativa de onda (Hs). A) Percentil 10, B) Percentil 30, C) Percentil 50, D) Percentil 70, E) Percentil 80, D) Percentil 95.....82

Figura 23. Percentis de período de pico de onda (Tp). A) Percentil 10, B) Percentil 30, C) Percentil 50, D) Percentil 70, E) Percentil 80, D) Percentil 95.....83

Figura 24. Rosa de correlação dos espectros direcionais fracionada em vinte e cinco níveis de frequência em cada direção. Em cada direção e faixa de frequência está representado a correlação com o índice climático Niño 3.4.....85

Figura 25. Rosa de correlação dos es de espectros direcionais fracionada em vinte e cinco níveis de frequência de 0 a 0,5Hz em cada direção (0 Hz localizado ao centro da rosa e 0,5Hz localizado na extermina). Em cada direção e faixa de frequência está representado a correlação com o índice climático. A) TNA, B) TSA, C) PDO, D) AAO, E) AMM, F) WHWP.....87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resultados estatísticos da média, desvio padrão (Std) e mediana (Md) medidos e do produto gerado pelo modelo (WW3) nos pontos WR, PnSC e PnRG.....59

Tabela 2. Resultados estatísticos para a correlação de Pearson (R), erro quadrático médio (RMSE) e viés dos dados medidos e do produto gerado pelo modelo (WW3) nos pontos WR, PnSC e PnRG. Todos os valores encontrados em R nesta tabela foram estatisticamente significativos (p<0,005) 60

Tabela 3. Correlações de Pearson (R) realizadas entre os índices climáticos (Niño 3.4, TNA, TSN, PDO, AAO, AMM e WHWP) com os modos de variabilidade de FOE 1 (Hs), FOE 2 (Hs), FOE 1 (Tp), FOE 2 (Tp) e FOE 3 (Tp). Os valores em vermelhos são as correlações estatisticamente significativas (p<0,05) 74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

WW3 – *Wavewacht III*

NCEP – *National Centers for Environmental Prediction*

NOAA – *National Oceanic and Atmospheric Administration*

CFSR – *Climate Forecast System Reanalysis*

CFS – *Climate Forecast System*

NGDC – *National Geophysical Data Center*

WR – *Waverider* Florianópolis

PnSC – Boia Pn-boia Santa Catarina

PnRG – Boia Pn-boia Rio Grande

R – Correlação de Pearson

RMSE – Erro quadrático médio

AAO – Oscilação Antártica (AAO),

PDO – Oscilação Decadal do Pacífico

Niño 3.4 – El Niño 3.4

AMM – Modo Meridional do Atlântico

ATN – Índice Tropical Atlântico Norte

ATS – Índice Tropical Atlântico Sul

WHPH – Piscinas de águas quentes do hemisfério ocidental

TSM – Temperatura da superfície do mar

FOE – Função ortogonal empírica

DOW – *Downscaled ocean waves*

SMC – *Support for the Brazilian Coast Management*

LISTA DE SÍMBOLOS

Hs – altura significativa de onda

Tp – período de pico da onda

θ – Direção de pico da onda

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 25
1.1 OBJETIVOS 27
1.1.1 Objetivo geral 27
1.1.2 Objetivos Específicos 27
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 27
2 MATERIAIS E MÉTODOS 29
2.1 ÁREA DE ESTUDO 29
2.2 MODELO 33
2.3 DADOS 35
2.3.1 Análise dos Campos de ventos CFSR 36
2.4 GRADES 41
2.5 METODOLOGIA 42
3 VARIABILIDADE DECADAL DO CLIMA DE ONDAS DO LITORAL DE SANTA CATARINA-BRASIL ATRAVÉS DO MODELO *WAVEWATCH* III 45
1 Introdução 47
2 Área, material e métodos 48
3 Resultados e discussão 56
4 Conclusões 88
5 Referências 89
4 TRABALHOS FUTUROS 94
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 95
6 REFERÊNCIAS 97
APÊNDICE A 102
APÊNDICE B 103

1 INTRODUÇÃO

As ondas superficiais de gravidade geradas pelo vento são a principal forma de transporte de energia nos oceanos (JEFFREYS, 1925; YOUNG, 1999). Ao serem geradas se propagam através de uma superfície por distâncias e tempo muito maior que o seu comprimento e período original (HOLTHUIJSEN, 2007). De forma que conseguem se propagar através das bacias oceânicas transportando a energia acumulada obtida pelo vento. Para o seu desenvolvimento três fatores são determinantes: a intensidade do vento, sua duração e o espaço geográfico em que esse vento se mantém com direção aproximadamente constante, conhecido como pista (CANDELLA & SOUZA, 2013). As ondas são geradas pelo vento e propagam-se até a zona costeira, onde quebram e liberam energia formando as correntes costeiras (KOMAR,1998) sendo caracterizadas como um dos fatores mais importantes para a dinâmica costeira e dos ecossistemas que utilizam essas regiões como habitat, além de ser crucial na gestão de atividade offshore e do tráfego marinho, já que alterações das suas características podem gerar consequências significativas nessas atividades.

Desta forma, os impactos nas zonas costeiras induzidos pelo aquecimento global podem ser causados tanto pela subida do nível do mar, por exemplo, como pela alteração no clima de ondas gerado pela a variação da dinâmica atmosférica das últimas décadas. Várias evidências indicam mudanças no clima terrestre, no entanto, ainda existem muitas incertezas sobre às taxas e os padrões dessas alterações. Nas últimas décadas, por exemplo, vem ocorrendo aquecimento nos oceanos das latitudes médias do hemisfério sul (GILLE, 2002), em particular no Atlântico Sul e o Oceano Índico. Estas regiões são conhecidas pela a incidência dos ventos fortes (os ventos de oeste), ventos que geram a intensificação de ondas gravitacionais (CAI, 2006), uma vez que a dinâmica climática do oceano está estreitamente correlacionada a dinâmica da atmosfera (DODET *et al.,* 2010) e, portanto, alterações na atmosfera irão acarretar mudanças na dinâmica oceânica e inerentemente ao clima de ondas.

Com o passar das décadas alguns trabalhos (WATERS *et al*., 2009; DODET *et al*.,2010; PIANCA *et al*., 2010; HEMER *et al*. 2013; REGUERO *et al*.,2013; STOPA & CHEUNG, 2014; PEREZ *et al*., 2015; entre outros) investigaram clima de ondas ao redor do mundo, principalmente no Oceano Pacífico e no Oceano Atlântico Norte, e alguns inclusive, relataram influências de alguns índices climáticos em relação a variabilidade nos climas de ondas. Em geral, examinar o clima de ondas

é incentivado pelas propriedades que as ondas possuem, pois abrangem características que predominam em um local por um período específico e suas alterações podem resultar em mudanças ambientais significativas na costa (INMAN & MASTERS, 1994) e também nas regiões offshore, impactando diretamente atividades que ocorrem nessas áreas.

Alguns estudos também têm desenvolvido projeções dos climas de ondas no futuro como, por exemplo, Mori *et al.* (2010) que realizou a projeção se baseando em um modelo de sistema atmosférico de alta resolução e verificaram que nas latitudes médias e no oceano Ártico as ondas possuem tendência de aumentar e nas baixas latitudes de diminuir, podendo ser resposta ao aumento da velocidade do vento associado com as tempestades que ocorrem nos oceanos nas latitudes médias.

A compreensão de como a energia dos ventos se transfere, propaga e dissipa nos oceanos é de grande importância para a comunidade científica, pois permite a compreensão e modelagem dos campos de ondas sendo de extrema importância para projetos de engenharia offshore e costeira. Além disso, são necessárias séries temporais longas para definir a variabilidade de longo prazo do clima das ondas em diferentes cenários, capaz de gerar informações bem fundamentadas. Por exemplo, gerar informações para o recurso de energia de ondas, a variabilidade da dinâmica oceânica e costeira, a definição de condições operacionais em rotas marítimas, estratégias de manutenção e reparação para construções offshore e também análise de ondas extremas, entre outras atividades (REGUERO *et al*. 2012).

As mudanças climáticas e o seu fortalecimento nas últimas décadas estão sendo objeto de estudo de vários cenários. Contudo as projeções futuras de eventos meteorológicos-oceanográficos foram abordadas de forma superficial no quarto relatório do IPCC (Reguero *et al.*,2013). Em algumas pesquisas realizadas sobre clima de ondas foi constatado que as mudanças observadas estão relacionadas com as alterações que vem ocorrendo na circulação atmosférica (por exemplo em REGUERO *et al.*,2013; PEREZ *et al*., 2015), retratando a necessidade de uma avaliação da variabilidade a longo prazo do clima de ondas em regiões do mundo todo e suas influências.

Santa Catarina está localizada na região sul do Brasil, sua costa é diretamente controlada pelos ciclones associados a frentes frias e anticiclones provenientes da zona Polar. Durante os últimos anos alguns estudos focaram na dinâmica das ondas na região costeira de Santa Catarina. Estes estudos tiveram como objetivo uma melhor caracterização do clima de ondas na região (ARAÚJO *et al.*, 2003; ROMEU, 2000, 2007; FRANCO & MELO, 2008; CEPAL, 2015; DALINGHAUS, 2016).

Araújo *et al.* (2003) observou características das principais condições de ondas da região através de dados de uma boia *waverider*. Enquanto que Franco & Melo (2008) demonstraram que picos secundários, quando o estado do mar é caracterizado pela co-ocorrência de dois ou três diferentes sistemas de onda ao mesmo tempo, alterem significativamente o cenário reconstruível. Já CEPAL (2015) e DALINGHAUS (2016) realizaram análises de clima de ondas na região de Santa Catarina a partir de dados de 60 anos de reanalise obtidos pelo modelo *Wavewatch* III. Portanto, este trabalho propõe-se a estudar as alterações no clima de ondas da costa de Santa Catarina e sua relação com as mudanças observadas na circulação atmosférica.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é analisar as mudanças do clima de ondas do litoral de Santa Catarina nas últimas décadas (1979-2010), através do modelo *WAVEWATCH* III

1.1.2 Objetivos específicos

•Implementação do modelo *Wavewatch* III com domínio global e resolução de 1/2°, aproximadamente 50 km, aninhado a duas grades de resoluções crescentes, para a região do Atlântico Sul, com resolução de 1/4°, aproximadamente 25km e para a região costeira de Santa Catarina com resolução espacial de 1/16°, aproximadamente 6 km.

•Validação do modelo com dados de ondas medidos.

•Determinação do clima de ondas das últimas décadas em Santa Catarina.

•Investigar as conexões entre os modos de variação do clima de ondas e os modos atmosféricos.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Essa dissertação está estruturada no formato do artigo desenvolvido e submetido pela autora durante o desenvolvimento de seu

mestrado e da realização dos objetivos que foram propostos. Está divido em seis partes:

a) Introdução
b) Materiais e métodos
c) Artigo submetido para revista Pesquisa em Geociências – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)*:* "Variabilidade decadal do clima de ondas do litoral de Santa Catarina-Brasil através do modelo *Wavewatch* III":
- Introdução
- Área, material e métodos
- Resultados e discussão
- Conclusões
- Referências
d) Trabalhos futuros
e) Considerações finais
f) Referências

2 MATERIAIS E MÉTODOS

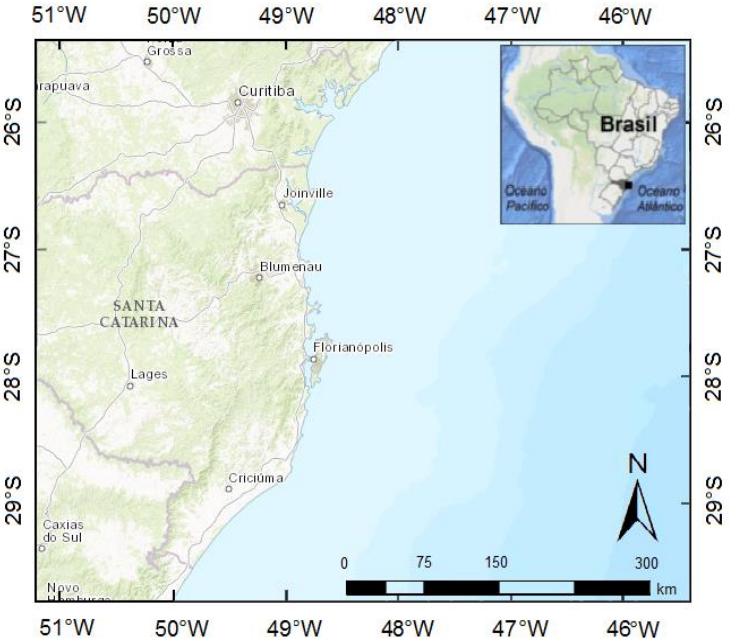
2.1 ÁREA DE ESTUDO

Estendendo-se entre as latitudes 34°S e 22°S, a plataforma continental sul-brasileira constitui um único setor que varia de um ambiente subtropical a temperado, é nela que está localizado o estado de Santa Catarina. Em termos de morfologia, a plataforma pode ser dividida em três setores: Embaiamento de São Paulo, setor Florianópolis-Mostardas e o Cone do Rio Grande, cada qual definido com base em diferenças geológicas relativas a batimetria, declividade e a presença de cânions e canais (MAHIQUES, 2010).

Por sua vez, na plataforma de Florianópolis as isóbatas e suas características estão relacionados com o arco de Ponta Grossa, que se encontra em 28°S a 31°S. Sua extensão varia de 100 a 160 km e sua quebra situa-se entre 140 a 180m (MAHIQUES, 2010). A plataforma de Florianópolis está localizada entre as bacias sedimentares de Santos, ao norte, e de Pelotas, ao sul (CARUSO JR., 1993), coincidindo com o prolongamento de uma grande zona transversal de fraturamento oceânico (sentido predominante NE - SW), relacionado a uma antiga zona de fraqueza, palco de vulcanismo intenso durante os estágios iniciais da abertura do Atlântico Sul (GONÇALVES *et al*., 1979) sendo composta por parcéis, sistemas deposicionais e ilhas, como a Ilha de Santa Catarina.

A região apresenta características meteorológicas controladas pela atuação das massas Polar Marítima e Tropical Marítima do Atlântico, estando inserida numa região de clima temperado da categoria subquente (NIMER, 1989). A dinâmica que rege essas atuações é formada pelos centros de alta pressão originários de baixas latitudes, anticiclones extratropicais e ciclones extratropicais associados a passagem de frentes frias. A situação normal da circulação atmosférica da região é o domínio de um sistema semifixo de alta pressão com ventos de norte/nordeste, juntamente com o efeito local da brisa marinha (MONTEIRO & FURTADO, 1995). Geralmente de três a quatro frentes frias atingem Santa Catarina a cada mês no sentido sudoeste/nordeste, no entanto, os ventos predominantes são de norte/nordeste, enquanto os de sul/sudoeste são mais intensos (RODRIGUES *et al*., 2004).

Figura 1. Localização da área de estudo pela base de dados ESRI (ARCGIS 10.1).



Fonte: a autora.

Os ventos provenientes da massa Tropical Marítima do Atlântico são predominantemente de Nordeste, porém de menor intensidade, mas quando a massa Polar Marítima cruza a região sul dos Andes ela transporta umidade do oceano para o litoral dando origem aos ventos frios, úmidos e fortes de Sul e Sudeste, conhecidos em Santa Catarina como os "ventos sul" que são menos frequentes, porém intensos. Caso ocorra bloqueio na migração destes ventos a massa Polar desloca-se para leste, mudando a direção dos ventos para as conhecidas "lestadas", períodos marcados por maiores índices pluviométricos na região (MONTEIRO & FURTADO, 1995).

Em relação ao regime de ondas, a costa de Santa Catarina é diretamente controlada pelos ciclones associados a frentes frias e anticiclones provenientes da zona Polar. As ondas de "*swell*" (marulhos) oriundas destas condições possuem períodos maiores e são responsáveis pelos maiores volumes de sedimentos transportados. Na zona costeira

também se encontra ondas do tipo "*sea*" (vagas) que são geradas em zonas próximas a terra por ventos locais (ALVES, 1996).

Em Santa Catarina, Melo Filho *et al*. (2006), encontrou alturas significativas (Hs) de até 7,2m. Contudo, Araújo *et al*. (2003) identificaram como características gerais ao longo do ano a alternância de ondulações de sul com período de pico (Tp) em torno de 12s e vagas de leste com Tp de 8s. Durante o outono e o inverno, quando as frentes frias são mais frequentes, as ondulações de sul prevalecem sobre as vagas de leste. No verão há um balanço entre as mesmas e na primavera prevalecem as vagas de leste.

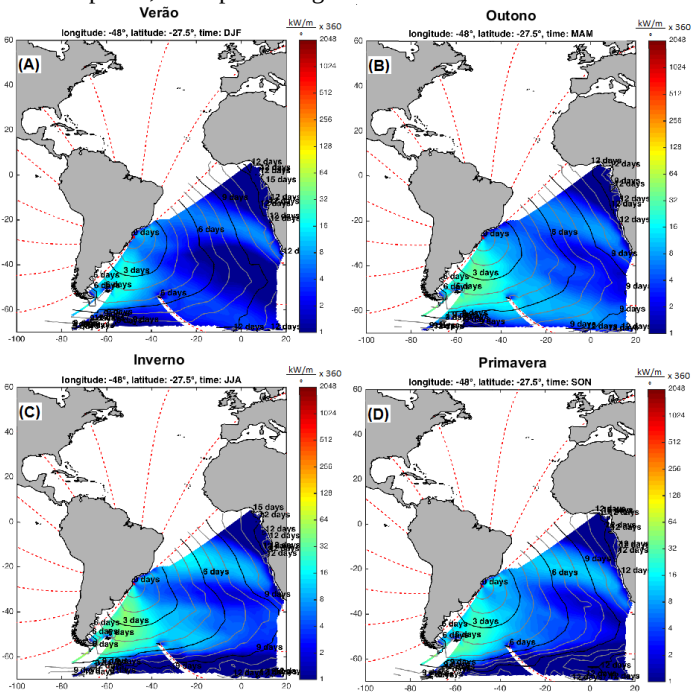
Através dos dados do ondógrafo, fundeado a 35km da Ilha de Santa Catarina em uma profundidade de 80m, foi possível identificar cinco sistemas de ondas bem definidos ao longo do ano, ondulações longínquas *("swell"*) de sul/sudeste, com Tp aproximado de 14,2s, geradas em altas latitudes do Oceano Atlântico Sul; ondulações de sul, com Tp aproximado de 11,4s; geradas no litoral uruguaio e gaúcho, associada à passagem de frentes frias; Vagas locais (*sea*) de leste, com 8,5s, devido à ação de ventos persistentes de nordeste associada à alta Tropical do Atlântico Sul; curtas vagas locais de nordeste, com 4,7s, geradas por ventos de curta duração; e por fim as vagas locais de sul, com 6,4s, associadas a ventos de sul/sudoeste, com curta pista de vento. Araújo *et al.* (2003), caracterizou as principais condições de ondas na região, considerando que dois ou mais campos de onda primários podem coexistir no mesmo estado de mar. Por meio de análises estatísticas deste mesmo ondógrafo, Miot da Silva *et al.* (2012) constaram que 23,7 % das frequências das ondas são de sul e 13,4% são de leste-nordeste.

Para a compreensão da geração das ondas e do fluxo de energia de Santa Catarina foi aplicado o método ESTELA (PÉREZ *et al.* 2014b) que possibilita a analise o tempo de origem e propagação da energia das ondas da região. A Figura 2 mostra o fluxo de energia sazonal, a área colorida representa o fluxo de energia em (kW/m/°), as linhas vermelhas representam as direções divididas em 16 setores e as pretas, o tempo de viagem em dias.

Observa-se que as regiões mais claras e amareladas são as que possuem a maior quantidade de energia transmitida para Santa Catarina, entre essas regiões destacam-se a região do sul do Brasil até o sul da Argentina, e, uma pequena região localizada a nordeste no Atlântico Sul.

Essas regiões no sul do Brasil coincidem com as áreas de ciclogêneses identificadas por Gan & Rao (1991), sendo uma localizada próxima ao Uruguai e outra na região do Golfo de São Matias na Argentina. Esses autores observaram também que a região próxima ao Uruguai é mais energética nos meses de inverno e a região do Golfo de São Matias, no verão, coincidindo com o que é observado na figura 2. Nota-se que no Outono e no Inverno a região do sul do Brasil até o sul da Argentina é mais energética contraposto com as demais estações e que a região localizada a nordeste no Atlântico Sul possui mais energia nas estações do inverno e primavera, explicando que uma boa parte do fluxo de energia durante a primavera é oriunda dessa região a nordeste no Atlântico Sul.

Figura 2. Fluxo de energia sazonal representado pelo método ESTELA para a região de Santa Catarina (PEREZ *et al*, 2014b), sendo (a) a estação do verão, (b) outono, (c) inverno e (d) a primavera. A área colorida representa o fluxo de energia em (kW/m/°), as linhas vermelhas representam as direções divididas em 16 setores e as pretas, o tempo de viagem em dias.



Fonte: Imagens desenvolvidas no âmbito de uma colaboração entre o *Surf and Surge Research Group* - Universidade da Cantábria (Espanha) e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

2.2 MODELO

Neste trabalho será utilizado o modelo *WAVEWACHT III* (WW3), desenvolvido pelo *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) da NOAA (TOLMAN *et al*., 2002). O modelo, escrito na linguagem FORTRAN 90, calcula a geração e propagação de ondas a partir de dados de ventos utilizando o método de diferenças finitas e a forma Euleriana para resolver a equação do balanço da densidade de onda (equação 5) e também considera as alterações da dinâmica da cobertura de gelo.

As equações básicas do modelo são representadas nas equações 1 e 5. No entanto, no modelo são utilizadas versões modificadas destas equações para que não ocorra a perda de resolução espectral que ocorre em águas rasas, já que uma vez que estas equações são resolvidas em uma grade numérica com o número de onda variável evita que ocorra esta perda de resolução em função de incorporar as mudanças cinemáticas do número de onda devido ao processo de empinamento (TOLMAN *et al.,* 2014). Na versão 4.18 do modelo foram incluídas opções adicionais de grades curvilíneas e grades não estruturadas enquanto que na versão anterior do WW3 (3.14) eram consideradas apenas grades regulares, onde os dois principais eixos de grade (x, y) são discretizados usando incrementos constantes. Seguem abaixo a equação governante do modelo (Equação 1 e 5) e suas respectivas variáveis (Equações 2, 3, 4, 6, 7 e 8).

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_x \cdot \dot{x}N + \frac{\partial}{\partial k}\dot{k}N + \frac{\partial}{\partial \theta}\dot{\theta}N = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

$$\dot{x} = c_g + U \quad (2)$$

$$\dot{k} = -\frac{\partial \sigma}{\partial d}\frac{\partial d}{\partial s} - k \cdot \frac{\partial U}{\partial s} \quad (3)$$

$$\dot{\theta} = -\frac{1}{k}\left[\frac{\partial \sigma}{\partial d}\frac{\partial d}{\partial m} + k \cdot \frac{\partial U}{\partial m}\right] \quad (4)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{cos\emptyset}\frac{\partial}{\partial \emptyset}\dot{\emptyset}N\, cos\theta + \frac{\partial}{\partial \lambda}\dot{\lambda}N + \frac{\partial}{\partial}\dot{k}N + \frac{\partial}{\partial \theta}\dot{\theta}_g N = \frac{S}{\sigma} \quad (5)$$

$$\dot{\emptyset} = \frac{c_g\, cos\theta + U_\emptyset}{R} \quad (6)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{c_g\, sin\theta + U_\lambda}{R\, cos\phi} \quad (7)$$

$$\dot{\theta}_g = \dot{\theta} - \frac{c_g\, tan\phi\, cos\theta}{R} \quad (8)$$

Onde *N* é o espectro de densidade de ação de onda, *t* o tempo, φ a latitude, λ a longitude, θ a direção perpendicular à crista da onda, *k* o número de onda, $\dot{k}$ o vetor de onda,s é a coordenada na direção θ, m a coordenada perpendicular as, s representa o efeito líquido de fontes e

sumidouros para o espectro F de variância, σ é a frequência relativa (a qual é observada em um referencial que se move com a corrente média e é utilizada se os efeitos das correntes médias nas ondas são considerados), R o raio da Terra, U_λ e U_σ são as componentes da corrente U, c_g a velocidade de grupo e d a profundidade média local.

A equação 5 é utilizada no modelo de forma modificada, ou seja, uma vez que ela é resolvida em uma grade numérica com número de onda variável ela possibilita que o comprimento de onda sofra alterações à medida que a onda se propaga, e, então, obstáculos como ilhas em grades menores são considerados. Se a equação 5 fosse resolvida diretamente, ocorreria uma redução efetiva da resolução espectral em águas rasas (TOLMAN & BOOIJ, 1998) e, portanto, a versão modificada dessa equação é utilizada para descrever apropriadamente o efeito de dispersão para as equações discretizadas nos esquemas numéricos selecionados para o modelo (TOLMAN, 2014).

A grade numérica com número de onda variável evita essa perda de resolução em função de incorporar as mudanças cinemáticas do número de onda devido ao processo de empinamento. A grade em questão corresponde a uma grade de frequência constante no tempo e no espaço (TOLMAN & BOOIJ, 1998).

Com relação aos termos fonte, existem diferenças na modelagem entre águas profundas e rasas. Em águas profundas, geralmente, o termo fonte líquida é composto por três termos: o termo de interação vento-onda (S_{in}), um termo de interações não lineares onda-onda (S_{nl}) e um termo de dissipação (S_{ds}).

O termo S_{in} é dominado pela função exponencial. Para que o crescimento inicial da onda seja mais realístico, um termo linear com entrada de energia (S_{ln}) também pode ser considerado no modelo (TOLMAN, 2014).

Já em águas intermediárias e rasas, outros termos também devem ser levados em consideração devido aos processos decorrentes de regiões com menores profundidades, são eles: o termo de interação onda-fundo (S_{bot}), o termo de quebra da onda induzida pela profundidade (S_{db}) e o termo de interações tríade onda-onda (S_{tr}). No modelo, também podem ser utilizados os termos fonte de espalhamento de onda devido às características do fundo (S_{sc}) e o termo adicional (S_{xx}), os quais são definidos pelo usuário (TOLMAN, 2014).

2.3 DADOS

Neste trabalho, o modelo foi forçado com a base de dados da Reanálise CFSR durante o período de 1979-2010. A reanálise CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*) foi desenvolvida pelo NCEP, interagindo um sistema de assimilação de dados com o modelo CFS (*Climate Forecast System*). Os objetivos dos projetos de reanálises são de produzir análises globais de campos atmosféricos. Para isso, o projeto vem assimilando dados de diversas fontes, tais como, estações meteorológicas em superfície, radiossondas, navios, satélites, aeronaves e outras.

Estes dados são cedidos por diferentes países e organizações de todo o mundo (KALNAY *et al.*,1996). Esta reanálise foi executada com alta resolução, acoplando dados do sistema oceano-atmosfera e gelo da superfície do mar e é disponibilizada, pela NOAA, online pelo endereço http://cfs.ncep.noaa.gov/cfsr/.

Os produtos obtidos, neste trabalho, através do modelo para cada nó das malhas do *Wavewatch* são: altura significativa (Hs), frequência de pico (possibilitando o cálculo do período de pico (Tp), direção de pico (θp) e os espectros direcionais.

Para realizar a validação foram utilizados dados *in situ* de ondas oriundos de duas boias do Programa Nacional de Boias da Marinha do Brasil (PNBOIA) e de um ondógrafo. Das boias do PNBOIA utilizadas uma está localizada em Santa Catarina (28,51°S; 47,39°W, denominada aqui como PnSC), com dados de abril a novembro de 2009, e a outra localizada no Rio Grande do Sul (31,52°S; 49,81°W, PnRG), com dados no período de abril a dezembro de 2009. Ambas as boias estão localizadas na profundidade de 200m e utilizam o sensor direcional de ondas *Triaxys* ^{TM}, equipado com três acelerômetros e três sensores angulares. A medição dos parâmetros de ondas é realizada nos primeiros 20 minutos de cada hora. Os dados são pré-processados no módulo interno das boias e enviados por satélite. Os dados estão disponíveis no site do PnBoia - GOOS/BRASIL (http://www.goosbrasil.org/pnboia/).

Enquanto que os dados do ondógrafo, neste trabalho denominado de "WR" estava fundeado a cerca de 35km da costa de Florianópolis (27,63°S; 48,19°W), na profundidade de 80m, pelo Laboratório de Hidráulica Marítima (LAHIMAR) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), no período de março de 2002 a agosto de 2005. A medição é feita durante 20 minutos a cada hora e atualmente, estes dados estão disponíveis online no site do Rede Ondas – GOOS/BRASIL (http://www.goosbrasil.org/rede_ondas/).

Também foi utilizado o produto de altímetros distribuído pela AVISO (http://www.aviso.altimetry.fr/) para o ano de 2010. Este produto é oriundo de várias fontes de satélites e são calibrados usando o satélite Jason-2 como a missão de referência.

2.3.1 Análise dos Campos de ventos CFSR

Estudos envolvendo climatologias requerem conjuntos de dados com séries temporais de longa duração e com resolução adequada, no entanto os dados medidos disponíveis ainda são limitados por possuírem séries temporais curtas e por se restringir a determinados locais, geralmente no Hemisfério Norte. Portanto, para suprir a necessidade da compreensão dos sistemas atmosféricos e oceânicos optou-se por utilizar dados de reanálises, que são produtos de modelos numéricos baseado na assimilação de dados de diversas fontes, como radiossondas, navios, satélites, aeronaves estações meteorológicas e outras.

A Reanálise CFSR foi executada com alta resolução referente ao período de 1979 a 2010, acoplando dados do sistema oceano-atmosfera e gelo da superfície do mar. Saha *et al.* (2010) demonstraram melhor desempenho da CFSR em comparação com seus antecessores, Reanálise 1 (R1) e Reanalise 2 (R2), também desenvolvido pelo NCEP/NOAA. O principal progresso da CFSR comparado a R1 e R2 está no aumento da resolução horizontal (que antes era de aproximadamente de 200km, agora é de 38km) e vertical (antes era de 28 níveis verticais, agora é de 64) do modelo atmosférico e na inclusão do acoplamento do sistema atmosférico entre o oceano (circulação) e a superfície terrestre, sendo que anteriormente era utilizado apenas a temperatura da superfície do mar (TSM) prescrita.

Chawla *et al.* (2013) apresentaram que os ventos da reanalise CFSR no Hemisfério Norte são consistentes ao longo do tempo com os bancos de dados, e que algumas altas oscilações inter-anuais presentes podem estar associadas aos ciclos de El-Niño /La Niña e às atividades de tempestades. Por sua vez, os ventos do Hemisfério Sul mostraram que existe uma transição nítida entre os anos de 1993 a 1994. Nos dados anteriores a 1993, os percentis mais altos de ventos são mais fortes do que após esse período, coincidindo com o período em que foi introduzido dados de um sensor especial *"Microwave Imager"* (SSM/I). Portanto os ventos são claramente superestimados no Hemisfério Sul no período que antecede 1993.

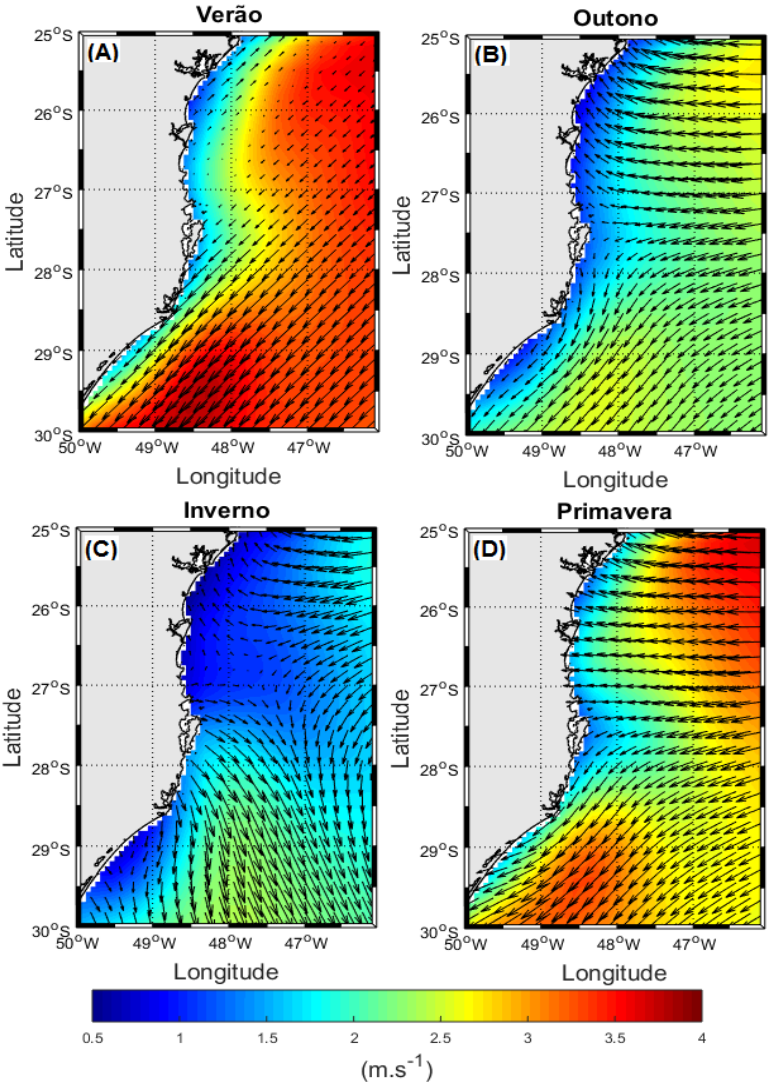
Além disso Chawla *et al.* (2013) notaram que a variabilidade sazonal da velocidade do vento é maior no Hemisfério Norte do que no Hemisfério Sul, isto porque os valores mínimos no Hemisfério Norte são menores do que os valores do Hemisfério Sul. No entanto, os valores máximos encontrados são bastante semelhantes nos dois hemisférios.

Como o vento é um componente crucial na formação e na modulação das ondas, foi calculado a velocidade média dos dados da CFSR na grade local do estudo, durante todo o intervalo de tempo da reanálise para realizar a análise dos ventos incidentes na região. Posteriormente calculou-se as médias sazonais e as funções ortogonais empíricas (FOE) dos mesmos.

Na Figura 3 observa-se a sazonalidade média da velocidade dos ventos na grade local do estudo, região de Santa Catarina, durante o período de 1979 a 2010. Observa-se que no verão (Figura 3A) os ventos são claramente mais intensos comparado as outras estações, apresentando valores iguais e superiores a $4 m.s^{-1}$ na área offshore, enquanto que nas proximidades da margem continental a média da velocidade do vento é relativamente menor, por volta de $2 m.s^{-1}$. Ainda no verão nota-se que as direções do vento são predominantes no sentido de noroeste. Por sua vez, no outono (Figura 3B), a intensidade dos ventos diminui contraposto com a estação do verão, as maiores médias se aproximam de $3 m.s^{-1}$ nas regiões offshore, enquanto que na área adjacente à zona costeira a média é de aproximadamente de $1 m.s^{-1}$. Na porção norte da grade, as direções médias do vento são de oeste e na parte sul são de noroeste. Já no inverno (figura 3C) percebe-se que a intensidade média dos ventos é menor no inverno, principalmente ao norte da grade e próximo à costa, sendo que os ventos mais intensos não ultrapassam a média de $2,5 m.s^{-1}$. As direções nessa estação, são de sudeste na parte sul do estado de Santa Catarina e na porção norte são de oeste. Durante a primavera (Figura 3D) os valores médios da intensidade do vento começam a aumentar, os maiores acréscimos ocorrem nas médias representadas nas extremidades da grade, até $3,5 m.s^{-1}$, enquanto que nas regiões próximas à costa os ventos apresentam velocidade média menor, aproximadamente de $1,5 m.s^{-1}$ a $2 m.s^{-1}$. Já as direções médias nessas estações são de noroeste na porção sul do estado de Santa Catarina e de oeste na porção norte.

.

Figura 3. Velocidade média dos ventos sazonais da reanálise CFSR na região de Santa Catarina durante o período 1979 a 2010. Sendo (a) a estação do verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera.



Fonte: a autora.

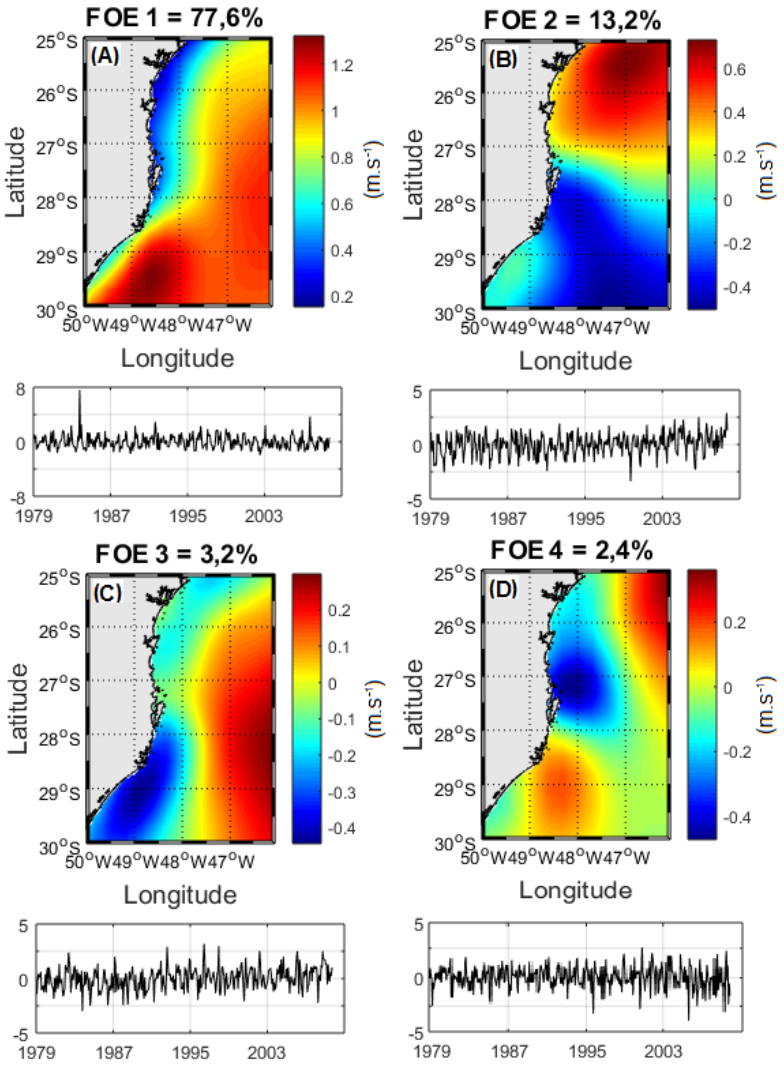
Na Figura 4 tem-se representado as funções ortogonais empíricas (FOEs) encontradas da velocidade do vento. As funções ortogonais empíricas decompõe as variações espaciais e temporais de um campo geofísico em combinação com os padrões espaciais ortogonais e componetes principais correspondente de forma linear (LORENZ, 1956). Na Figura 4 elas são representadas de forma decrescente, a FOE1 representando 77,6% da variância da velocidade do vento na região do estudo, enquanto que, as FOE2, FOE3 e FOE4 representam 13,2%, 3,2% e 2,4%, respectivamente. Também são representadas na Figura 4 as amplitudes de cada FOE ao longo do tempo. Essas amplitudes associadas aos valores encontrados em cada FOE representam a variabilidade que ocorreu ao longo do período.

Observa-se que a FOE 1, comparada as demais, apresenta uma magnitude na intensidade dos ventos superior, apresentando médias de até 1,2m.s^{-1}, enquanto que os demais não ultrapassa 0,6m.s^{-1}. Além disso a FOE1 apresenta um pico positivo na amplitude da componente principal entre os anos de 1983 e 1984, divergindo dos demais. Além disso é possível verificar que as maiores médias são encontradas na região oceânica da grade de estudo, principalmente ao Sul.

A FOE2, FOE3 apresentam fases negativas e positivas bem determinadas e um padrão de sinais opostos nas componentes principais. Na FOE2, por exemplo, a fase possitiva encontra-se na região norte e enquanto que na FOE3 a fase positiva esta localizada na região oceânica entre 48°W e 46°W. A fase negativa, da FOE2 e FOE3, estão situadas na região sul, na região oceânica e próximo a costa, respectivamente. Nota-se também que enquanto o a variância da componente principal da FOE 2 começa com sinal negativo, em FOE 3 o sinal é se inicia positivo.

A FOE 4 apresentou uma fase negativa próximo a margem continental ao norte da Ilha de Florianópolis e fase positiva na região oceânica a nordeste da grade e região interna da plataforma, a sudoeste da grade de estudo. Além disso esta FOE exibiu um aumento na amplitude da variância na última década, comparado a amplitude encontrada no início da série.

Figura 4. Funções ortogonais empíricas da velocidade média dos ventos da reanálise CFSR na região de Santa Catarina, durante o período de 1979 a 2010. Em (a) temos representada a FOE 1, (b) FOE 2, (c) FOE 3 e (d) FOE 4.

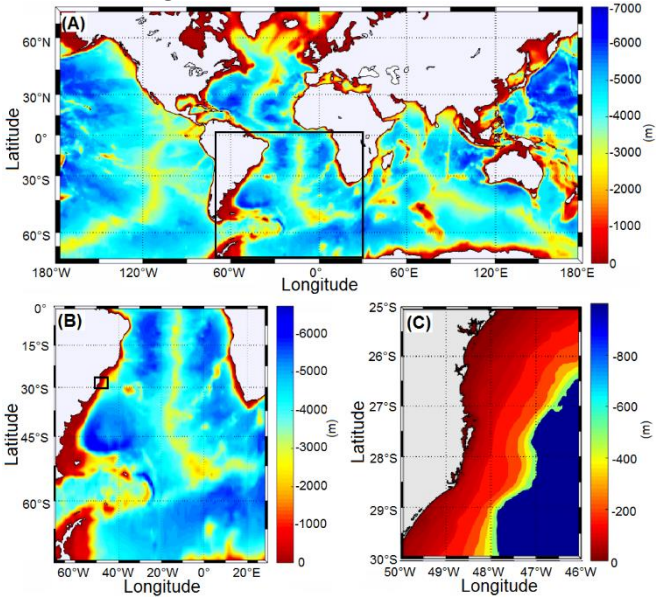


Fonte: a autora.

2.4 GRADES

O Modelo foi rodado em três grades aninhadas (Figura 5), a primeira a ser rodada é a grade de domínio global com a resolução de meio grau (1/2°); aproximadamente 50 km. Em seguida ocorre um *downscalling* para uma grade de regional com abrangência no Atlântico Sul e resolução de um quarto de grau (1/4°), aproximadamente 25 km. Por fim, outro downscalling ocorre da grade regional para uma grade local com domínio no litoral de Santa Catarina e resolução de 1/16°; aproximadamente 6 km. O propósito de realizar esses dois downscalling de grades com menores resoluções para grades com maiores resoluções é para que no final a grade local possua dados de ondas com uma melhor precisão possibilitando que a caracterização do clima de ondas da região seja o mais próximo possível da realidade. As três grades, assim como todas as análises feitas nesse trabalho foram realizadas através da ferramenta *Matlab*, desenvolvida por *The MathWorks, Inc.*

Figura 5. Batimetria do ETOPO1 em metros. A) grade global, B) grade regional, C) grade local, utilizadas no modelo WW3. O retângulo preto no meio da imagem (A) representa o domínio da grade regional e o retângulo preto na imagem (B) representa o domínio da grade local.



Fonte: a autora.

Para a implementação do modelo de geração de ondas WW3 é necessário a construção de uma grade batimétrica devido à possibilidade das ondas serem refratadas pelo relevo do fundo oceânico. Por isso serão construídas duas grades, uma do Atlântico Sul para a primeira etapa deste trabalho e a outra do litoral de Santa Catarina para a segunda etapa através do modelo de relevo global ETOPO1, que foi criado em 2008 pelo *National Geophysical Data Center* (NGDC/NOAA) a partir do aperfeiçoamento da resolução e acurácia da sua versão anterior, o ETOPO2v2. Ambas as versões foram produzidas a partir de diversos conjuntos de dados digitais regionais e globais cedidos por instituições acadêmicas e agências governamentais americanas e internacionais. Antes de tais versões serem geradas, o conjunto de dados é colocado no mesmo sistema de coordenadas, editado e manipulado a fim de prover os resultados com maior eficácia (AMANTE *et al.*, 2009). Após a geração dos resultados, estes passam por um processo de controle de qualidade antes de serem disponibilizados online no site: https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html.

2.5 METODOLOGIA

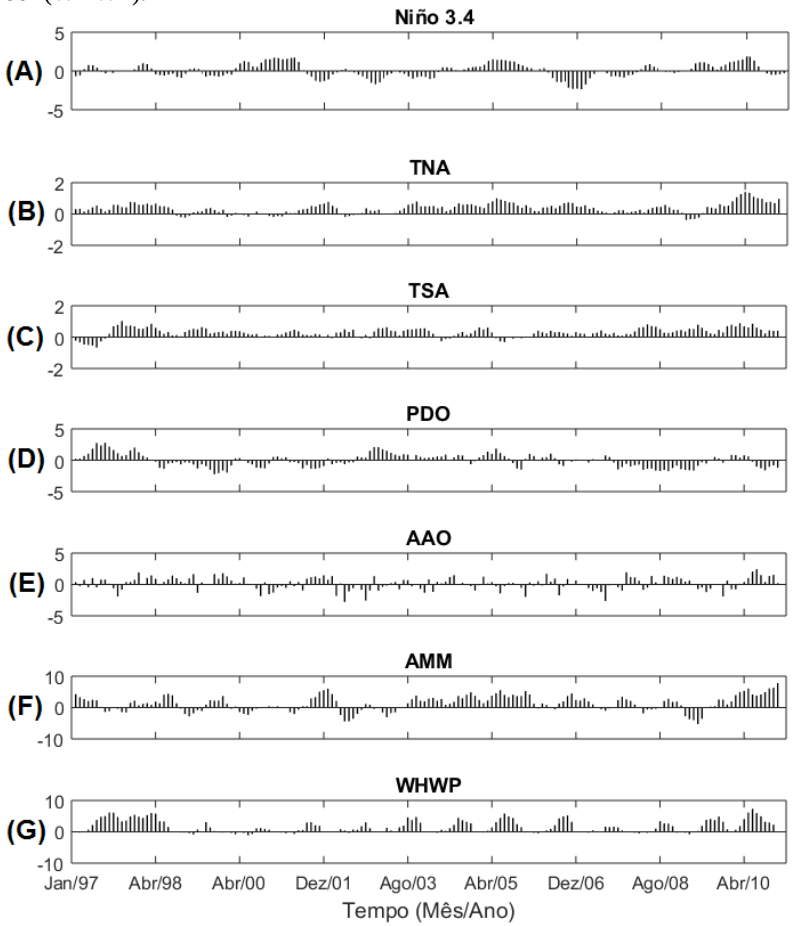
Neste trabalho também tem como produto espectros direcionais de ondas, gerados pelo modelo no ponto WR, que são divididos em vinte e quatro direções de 0 a 359° e em vinte e cinco faixas de frequências entre 0 a 0,5Hz para correlacioná-los com índices climáticos no período de 1997 a 2010.

Os índices climáticos são criados a partir de anomalias na circulação atmosférica e oceânicas geradas pelas variações climáticas em várias escalas de tempo. Os índices utilizados foram o Niño 3.4, Índice Tropical Atlântico Norte (TNA), Índice Tropical Atlântico Sul (TSA), Oscilação Decadal do Pacífico (PDO), Oscilação Antártica (AAO), Modo Meridional do Atlântico (AMM) e por fim Piscinas de águas quentes do hemisfério ocidental (WHPH), todos eles são oriundos da NOAA e disponibilizados online (Figura 6).

O Niño3.4 é o fenômeno El Niño que ocorre no Pacífico equatorial na região 3.4 Niño. Atualmente esta região é o foco principal para a monitorização e previsão do evento pela NOAA, isto porque fornece informações importantes para as mudanças no padrão da circulação atmosférica e da convecção tropical profunda. O El Niño então trata-se de uma oscilação do sistema acoplado oceano-atmosfera que altera a Temperatura da Superfície do Mar (TSM), a pressão, o vento e a convecção tropical (TRENBERTH & STEPANIAK, 2001).

Os índices TNA e TSA foi definido por Enfield *et al.*, (1999) como sendo a anomalia média da TSM sobre uma região retangular entre as latitudes de 5°N a 25°N e longitude de 55°W a 15°W para TNA e entre as latitudes de 20°S a 0° e longitudes de 30°W e 10°E para TSA. Estes índices são bastante utilizados para estimar o dipolo no Atlântico tropical.

Figura 6. Índices Climáticos utilizados neste trabalho. A) El Niño 3.4 (Niño 3.4); B) *Tropical Northern Atlantic Index* (TNA); C) *Tropical Southern Atlantic Index* (TSA); D) *Pacific Decadal Oscillation* (PDO), E) *Antarctic Oscillation* (AAO); *F) Atlantic Meridional Mode* (AMM)*; G) Tropical Western Hemisphere Warm Pool* (WHWP).

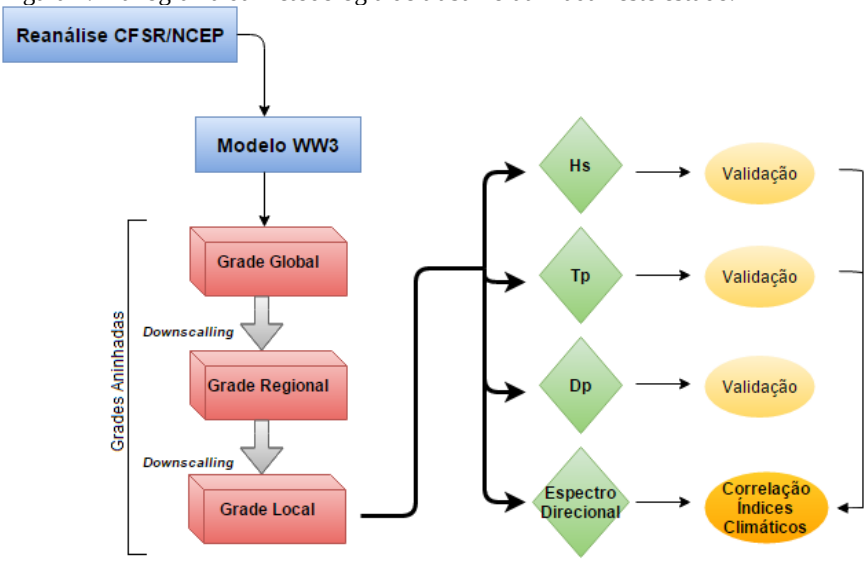


Fonte: a autora.

Por sua vez, a PDO está relacionada as anomalias mensais de temperatura da superfície do mar (TSM) no Pacífico Norte, frequentemente descrito como padrão de variabilidade de longo período do evento El Niño que interferem no padrão de ventos da região (MANTUA & HARE, 2002). Enquanto que a AAO, também chamada de Modo Anular (SAM) e Modo de Altas Latitudes (HLM), é conhecida por influenciar a intensidade e a localidade dos jatos subtropicais e, por conseguinte, dos ciclones e anticiclones, devido à sua variabilidade de pressão em larga escala das massas atmosféricas nas médias e altas latitudes (Gong & Wang, 1999). Segundo Thompson & Wallace (2000) este índice é definido pelo primeiro modo de variabilidade da função empírica ortogonal das anomalias de altura do geopotencial em 850hPa ao sul de 20°S.

O AMM é definido pela análise de máxima covariância na TSM no Atlântico tropical considerando a componente zonal e meridional, do campo de vento a 10 metros (CHIANG & VIMONT, 2004), e por fim, o índice WHPH trata-se da anomalia mensal da TSM superior a 28,5°C que se desenvolve no atlântico tropical, a oeste da américa central e se estende até o leste do Pacífico Norte (WANG & ENFIELD, 2001). A metodologia utilizada é representada de forma simplificada no fluxograma (Figura 7).

Figura 7. Fluxograma da metodologia de trabalho utilizada neste estudo.



Fonte: a autora.

3 ARTIGO

VARIABILIDADE DO CLIMA DE ONDAS DE SANTA CATARINA-BRASIL UTILIZANDO O MODELO *WAVEWATCH III*

Bruna A. OLIVEIRA [1], Fernando SOBRAL [2] & Antonio FETTER [1,3]

(1) Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário, Bloco D, Departamento de Geociências, CEP 88.040-900, Florianópolis, SC. Email: bruna.ao90@gmail.com

(2) Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário, Bloco D, Departamento de Geociências, CEP 88.040-900, Florianópolis, SC. Email: fcalmon.sobral@gmail.com

(3) Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário, Bloco D, Departamento de Geociências, CEP 88.040-900, Florianópolis, SC. Email: antonio.fetter@ufsc.br

Resumo

Evidências indicam que estão ocorrendo mudanças no clima, porém, existem incertezas em relação às taxas e padrões dessas alterações. Foi constatado que as alterações no clima de ondas possuem relação com as mudanças climáticas. Isso levanta a necessidade de uma avaliação a longo prazo do clima de ondas em regiões do mundo todo. Portanto, neste trabalho é proposto um estudo sobre as alterações no clima de ondas na região oceânica de Santa Catarina e sua relação com alguns índices climáticos. Para isso foram simulados trinta e dois anos de dados de ondas através do modelo *Wavewatch* 3 (WW3) em uma grade local, com resolução de 6 km para a região de Santa Catarina. Esta grade foi aninhada a outras duas grades (global e regional), com intuito de realizar um refinamento dinâmico das grades e maior resolução para a estimativa do clima de ondas na costa de Santa Catarina. A primeira grade a ser rodada foi a com domínio global de resolução 1/2°, depois foi a grade regional de resolução de 1/4°, e por fim a grade local. Verificou-se que o clima de

ondas vem sofrendo alterações espaciais e temporais consideráveis, principalmente em relação à altura significativa da onda (Hs), que apresentou a tendência de aumentar até 0,37cm.ano-1 na porção norte do litoral e 0,15cm.ano-1 na porção sul. Além disso, identificou-se um gradiente de energia de Hs na direção de noroeste para sudeste, e que as estações energéticas são o inverno e a primavera. Para o período de pico (Tp) foi encontrado um aumento gradual na direção sudoeste para nordeste e que no outono e inverno ocorrem os maiores valores médios. Por fim, este trabalho evidenciou a influência de fenômenos climáticos na variabilidade do clima de ondas da região encontrando correlações estatisticamente significativas, especialmente com o El Niño, Índice Tropical Atlântico Norte e Modo Meridional do Atlântico.

Palavras-chave: modelagem de ondas, índices climáticos, alterações climáticas, sul do Brasil, WW3, ondas oceânicas, clima de ondas

Abstract

Evidences indicate that the earth's climate is changing, however, there're many uncertainties regarding the rates and patterns of these changes. It has been found that many wave climates have changes related to climatic variations, showing the need for a long term evaluation of the wave climate in regions around the world. Therefore, this work proposed to study the changes in the offshore wave climate in the Santa Catarina and its relation with some climatic indices. For this, thirty-two years of wave fields were generated in Wavewatch 3 model (WW3) in a local grid, with a resolution of 6 km for the Santa Catarina region, nested to two other grids (global and regional grid) for a dynamic refinement of the wave climate on the coast of Santa Catarina. The first grid to be run was the global domain with resolution of 1/2°, followed by the regional grid with resolution grid of 1/4°, and finally the local grid. It was found that the wave climate presented considerable changes over time and spatially, mainly significant wave height (Hs), which showed a tendency to increase up to 0.37cm.year^{-1} along the northern coast of Santa Catarina and 0.15cm.year^{1} along the southern coast. Furthermore, an energy gradient of Hs was identified from southeast to northwest, and winter and spring are the most energetic seasons. For the peak period (Tp) a gradual increase was found in the southwest to the northeast direction and that in the autumn and winter the highest average values occur. Finally, this work evidenced the influence of climatic phenomenon on the variability of the region's wave climate, finding statistically significant correlations,

especially with the El Niño, Tropical North Atlantic Index and Atlantic Meridional Mode.

Keywords: wave modeling, climate indices, climate change, southern Brazil, WW3, ocean waves

1 Introdução

Importantes trocas energéticas, como trocas de calor, precipitação, evaporação, as ondas geradas por ventos, entre outras, ocorrem na interface oceano-atmosfera estabelecendo uma forte conexão entre esses dois sistemas. Sendo assim, alterações na atmosfera, como mudanças no padrão de ventos irão acarretar em alterações no clima de ondas. Várias evidências indicam mudanças no clima terrestre, no entanto, ainda existem incertezas em relação às taxas e aos padrões de variabilidade dessas alterações. Nas últimas décadas, vem ocorrendo um aquecimento dos oceanos nas latitudes médias do hemisfério sul, em particular no Oceano Atlântico Sul e no Oceano Índico (Gille, 2002). Estas regiões do globo coincidem com zonas de convergência atmosférica, onde ocorrem fortes ventos conhecidos como ventos de oeste *(westerlies*) que intensificam as ondas gravitacionais devido às suas altas velocidades (Cai, 2006).

Em geral, as análises dos climas de ondas são estimuladas pela capacidade das ondas em armazenar informações que predominam em seu local de geração por um período de tempo específico. Essas características adquiridas podem resultar em mudanças ambientais significativas na costa (Inman & Masters, 1994) e também nas regiões de oceano aberto, impactando diretamente as atividades que ocorrem nessas áreas, tais como a exploração de petróleo. Muitos trabalhos (Waters *et al.*, 2009; Dodet *et al.*,2010; Pianca *et al.,* 2010; Hemer *et al.* 2013; Reguero *et al.*,2013; Stopa & Cheung, 2014; Perez *et al.*, 2015; entre outros) investigaram o clima de ondas em diferentes regiões geográficas e alguns desses autores relataram correlações existentes entre a variabilidade do clima de ondas e a variabilidade de índices climáticos. Contudo, a maioria dos estudos foi realizado em locais do Oceano Pacífico e do Oceano Atlântico Norte, havendo pouca informação para o Oceano Atlântico Sul.

A influência de um mesmo fenômeno climático em diversas regiões do mundo está associada ao transporte atmosférico de temperatura, pressão, umidade, entre outros fatores. O fenômeno El Niño por exemplo, que geralmente é considerado uma das causas mais relevantes da variabilidade climática interanual, é relacionado com

estudos de eventos extremos de precipitação na América do Sul (Grimm & Tedeschi, 2009) e também em estudos sobre a precipitação na Austrália (Chiew *et al.*1998).

Este trabalho se propôs a estudar as alterações no clima de ondas oceânicas de Santa Catarina e verificar sua relação com índices climáticos. Para tanto, o modelo Wavewatch III foi rodado com campos de vento provenientes do projeto *Climate Forcast System Reanalysis* (CFSR), de 1979 a 2010. Foram utilizadas 3 grades de diferentes resoluções, com o objetivo de fazer um refinamento dinâmico do clima de ondas na costa de Santa Catarina, Brasil. A primeira grade foi rodada em um domínio global com 1/2° de resolução horizontal. A segunda grade, aninhada a primeira, abrangeu todo o Oceano Atlântico Sul, com 1/4° de resolução horizontal. A grade local, de alta resolução (1/16° de resolução horizontal), abrangeu grande parte da costa da região sul do Brasil, com foco na costa de Santa Catarina.

2 Área, material e métodos

Santa Catarina está localizada na região sul do Brasil. Sua costa é diretamente controlada pelos ciclones associados às frentes frias e anticiclones provenientes da zona Polar. A circulação atmosférica na região é dominada por um sistema semifixo de alta pressão com ventos de norte/nordeste, juntamente com o efeito local da brisa marinha (Monteiro & Furtado, 1995). Geralmente, de três a quatro frentes frias atingem Santa Catarina a cada mês no sentido sudoeste/nordeste, no entanto, os ventos predominantes são de norte/nordeste, enquanto os de sul/sudoeste são mais intensos (Rodrigues *et al.*, 2004).

Araújo *et al* (2003), utilizando dados de um ondógrafo fundeado a 35km da Ilha de Santa Catarina em uma profundidade de 80m, identificaram cinco sistemas de ondas bem definidos ao longo do ano. Ondulações longínquas *("swell"*) de sul/sudeste, com período de pico (Tp) aproximado de 14,2s, geradas em altas latitudes do Oceano Atlântico Sul; ondulações de sul, com Tp aproximado de 11,4s geradas no litoral uruguaio e ao sul do Brasil, associada à passagem de frentes frias; vagas locais ("*sea*") de leste, com 8,5s, em resposta à ação de ventos persistentes de nordeste associados à alta tropical do Atlântico Sul; ondulações curtas de nordeste, com 4,7s, geradas por ventos de pouca duração; e por fim, as vagas locais de sul, com 6,4s, associadas à ventos de sul/sudoeste, com curta pista de vento. De maneira geral, o clima de ondas para a região varia entre ondulações de sul com período de pico (Tp) em torno de 12s, durante o outono e o inverno quando as frentes frias são mais frequentes,

e vagas de leste com Tp de 8s na primavera, sendo que no verão, há um balanço entre as ondulações de sul e leste.

As ondulações provenientes de leste, segundo Araújo *et al.* (2003), possuem uma média de altura significativa (Hs) de 1,25m; enquanto que as provenientes de sul são crescentes entre o verão e o inverno, variando de 1,25m a 2m. Alturas de ondas significativas superiores a 4m podem ocorrer em todas as estações, porém, não ocorrem com frequência. Melo Filho *et al.* (2006), por exemplo, encontraram valores de Hs de até 7,2m na costa.

2.1 Descrição do modelo

O modelo numérico de ondas oceânicas *WAVEWATCH III* (Tolman 1997, 1999a, 2009), sendo referido daqui para frente como WW3, é a terceira geração do modelo de ondas desenvolvido pelos órgãos norte-americanos NOAA/NCEP (*National Oceanic and Atmospheric Administration/ National Centers for Environmental Prediction*) inspirado no modelo WAM (Wamdig 1988, Komen *et al*. 1994). É resultado do desenvolvimento contínuo do modelo *WAVEWATCH*, originado na *Delft University of Technology* (Tolman 1989, 1991a) e do *WAVEWATCH II*, desenvolvido na NASA (Tolman, 1992). O modelo de onda de terceira geração resolve a equação de equilibro de densidade de ação espectral de fase aleatória para espectros de direção de número de onda. A versão aqui utilizada é a 4.18, produzindo saídas como: altura significativa de onda (Hs), frequência de pico (Fp), porém sendo aplicada seu inverso, o período de pico (Tp), direção de pico (θp) e espectros direcionais para pontos específicos pré-determinados. Uma descrição detalhada, incluindo suas equações e o método numérico utilizado, pode ser encontrada em Tolman *et al.,* (2014).

2.2 Batimetria e campos de entrada (vento e gelo)

A batimetria utilizada na implementação do modelo foi a ETOPO1 (Fig. 1) criada em 2008 pelo *National Geophysical Data Center* (NGDC/NOAA) a partir do aperfeiçoamento da resolução e acurácia da sua versão anterior, o ETOPO2v2.

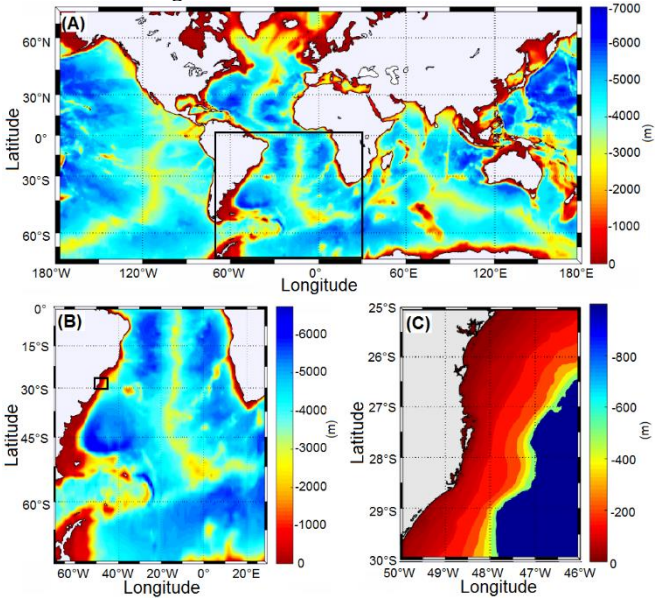
Foram utilizados 32 anos de saídas de vento e gelo da base de dados de reanálise *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) durante o período de 1979-2010 para forçar o modelo em seu estado estático inicial. A reanálise CFSR também foi desenvolvida pelo NCEP, interagindo um sistema de assimilação de dados com o modelo CFS (*Climate Forecast System*) e executada com alta resolução, acoplando dados do sistema oceano-atmosfera e gelo da superfície do mar de

diversas fontes com o objetivo de produzir análises globais de campos atmosféricos com maior precisão. Saha *et al.* (2010) demonstraram que a reanálise CFSR possui melhor desempenho em comparação com seus antecessores, Reanálise 1 (R1) e Reanalise 2 (R2), também desenvolvido pelo NCEP/NOAA.

2.3 Simulação

O modelo foi rodado utilizando três grades regulares aninhadas. A grade de domínio global (Fig. 1A), com resolução de meio grau (1/2°), (aproximadamente 50km); uma grade regional (Fig. 1B), aninhada à global cobrindo todo o Atlântico Sul, entre as latitudes de 0° a 65°S e entre as longitudes de 70°W a 30°E, e resolução de um quarto de grau (1/4°) (aproximadamente 25km); e por fim, à grade regional, ocorre outro aninhamento, com *downscalling* para uma grade local (Fig. 1C), com domínio abrangendo o litoral de Santa Catarina e um pouco das áreas adjacentes, entre as latitudes de 25°S a 30°S e longitude de 50°W a 46°W, e resolução de 1/16° (aproximadamente 6km). Desta forma, atinge-se uma alta resolução de grade para a região de estudo, aprimorando resultados e otimizando o tempo de simulação. As três grades, assim como todas as análises feitas nesse trabalho foram realizadas através da ferramenta *Matlab*, desenvolvida por *The MathWorks, Inc.*

Figura 1. Batimetria do ETOPO1 em metros. A) grade global, B) grade regional, C) grade local, utilizadas no modelo WW3. O retângulo preto no meio da imagem (A) representa o domínio da grade regional e o retângulo preto na imagem (B) representa o domínio da grade local.



Fonte: a autora.

Os espectros direcionais de ondas utilizados foram gerados pelo modelo no ponto WR (Fig. 2) no período de 1997 a 2010 para correlacionar com índices climáticos. Estes espectros são divididos em vinte e quatro direções de 0 a 359° e em vinte e cinco faixas de frequências entre 0 a 10Hz.

2.4 Conjunto dos dados de onda

2.4.1In situ: Boias

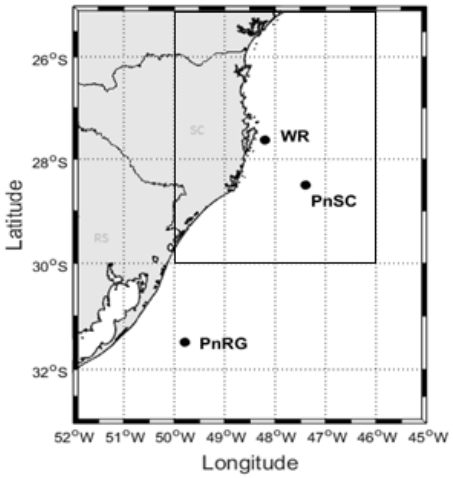
Foram utilizados dados de ondas de duas boias do Programa Nacional de Boias da Marinha do Brasil (PNBOIA, Fig. 2), sendo uma delas situada na grade local, em Santa Catarina (28,51°S; 47,39°W, denominada aqui como PnSC), com dados de abril a novembro de 2009, e a outra localizada na grade regional, no Rio Grande do Sul (31,52°S; 49,81°W, PnRG), com dados no período de abril a dezembro de 2009. Ambas as boias estão localizadas na profundidade de 200m e utilizam o

sensor direcional de ondas *Triaxys* ^{TM}, equipado com três acelerômetros e três sensores angulares. A medição dos parâmetros de ondas é realizada nos primeiros 20 minutos de cada hora. Os dados são pré-processados no módulo interno das boias e enviados por satélite. Os dados estão disponíveis no site do PnBoia - GOOS/BRASIL (http://www.goosbrasil.org/pnboia/).

2.4.2 In situ: Waverider

Foram utilizados dados de um ondógrafo direcional "*waverider*" (WR) Mark II da companhia *Datawell*. Este estava fundeado a cerca de 35km da costa de Florianópolis (27,63°S; 48,19°W, Fig. 2), na profundidade de 80m, pelo Laboratório de Hidráulica Marítima (LAHIMAR) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), no período de março de 2002 a agosto de 2005. A medição é feita durante 20 minutos a cada hora e atualmente, estes dados estão disponíveis online no site do Rede Ondas – GOOS/BRASIL (http://www.goosbrasil.org/rede_ondas/).

Figura 2. Localização das boias PnSC, PnRG e do ondógrafo WR utilizados para validação. O retângulo dentro da figura ilustra o domínio da grade local, o qual a localização da boia PnSC e o WR estão inclusas. Já a boia PnRG encontra-se localizada no domínio regional.



Fonte: a autora

2.4.3 Produto de satélite

Também foi utilizado o produto de altímetros distribuído pela AVISO (http://www.aviso.altimetry.fr/) para o ano de 2010. Este produto é oriundo de várias fontes de satélites e são calibrados usando o satélite Jason-2 como a missão de referência.

2.5 Análise estatística - validação

A análise estatística realizada abrange os parâmetros de correlação de Pearson (R), erro quadrático médio (RMSE) e o viés. A equação 1 representa o cálculo de R, que mede a intensidade da relação entre duas variáveis, com valores que variam de -1 a 1, sendo que em 0 as variáveis não apresentam correlação e em -1 ou 1, a correlação é perfeita, negativamente ou positivamente, respectivamente. O RMSE é representado pela equação 2 e seu valor determina a diferença média entre um valor simulado (x) e o valor observado (y), onde N é o tamanho da amostra em questão. Por fim, o viés é descrito na equação 3, tratando-se da diferença entre as médias das séries temporais simulada (xm) e observada (ym).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - xm)(y_i - ym)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - xm)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \mathrm{ym})^2}} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - y_i)^2} \quad (2)$$

$$vi\acute{e}s = \mathrm{xm} - ym \quad (3)$$

2.6 Índices climáticos

Os índices climáticos são valores mensais que levam em conta fatores ambientais de modo a simplificar o estudo das mudanças climáticas e seus fenômenos. Os índices aqui utilizados foram os seguintes:

El Niño 3.4 (Niño 3.4)

O Niño 3.4 é o fenômeno El Niño que ocorre no Pacífico equatorial na região 3.4. Atualmente, esta região é o foco principal para o monitoramento e previsão do evento pela NOAA e fornece informações

importantes para as mudanças no padrão da circulação atmosférica e da convecção tropical profunda. O El Niño, então, trata-se de uma oscilação do sistema acoplado oceano-atmosfera que altera a Temperatura da Superfície do Mar (TSM), a pressão, o vento e a convecção tropical (TRENBERTH & STEPANIAK, 2001).

Índice Tropical Atlântico Norte (Tropical Northern Atlantic Index - TNA) e Índice Tropical Atlântico Sul (Tropical Southern Atlantic Index - TSA)

Os índices ATN e ATS (Fig. 3B e 3C) foram definidos por Enfield *et al.*, (1999), como sendo a anomalia média da TSM sobre uma região retangular entre as latitudes de 5°N a 25°N e longitude de 55°W a 15°W, para ATN, e entre as latitudes de 20°S a 0° e longitudes de 30°W e 10°E, para ATS. Estes índices são bastante utilizados para estimar o dipolo no Atlântico tropical.

Oscilação Decadal do Pacífico (Pacific Decadal Oscillation - PDO)

A PDO (Fig. 3D) está relacionada às anomalias mensais de temperatura da superfície do mar (TSM) no Pacífico Norte, frequentemente descrito como padrão de variabilidade de longo período do evento El Niño que interferem no padrão de ventos da região (Mantua & Hare, 2002).

Oscilação Antártica (Antarctic Oscillation - AAO)

A AAO (Fig. 3E), também chamada de Modo Anular (SAM) e Modo de Altas Latitudes (HLM), é conhecida por influenciar a intensidade e a localidade dos jatos subtropicais e, por conseguinte, dos ciclones e anticiclones, devido à sua variabilidade de pressão em larga escala das massas atmosféricas nas médias e altas latitudes (Gong & Wang, 1999). Segundo Thompson & Wallace (2000) este índice é definido pelo primeiro modo de variabilidade da função empírica ortogonal das anomalias de altura do geopotencial em 850hPa ao sul de 20°S.

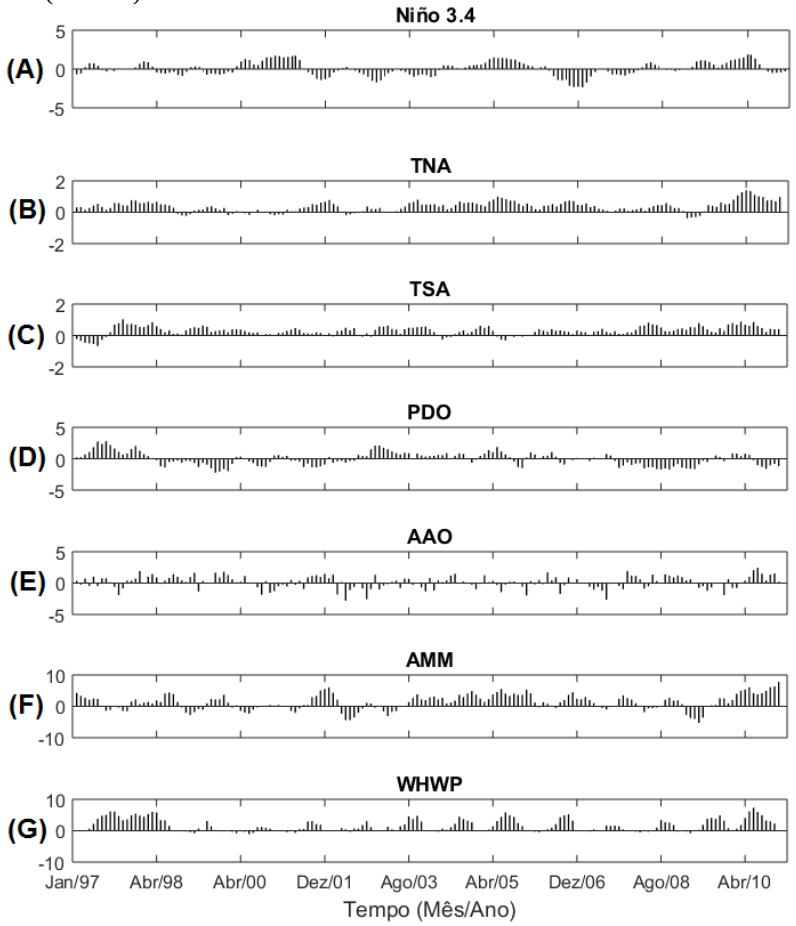
Modo Meridional do Atlântico (Atlantic Meridional Mode - AMM)

O AMM (Fig. 3F) é definido pela análise de máxima covariância na TSM no Atlântico tropical considerando os componentes zonal e meridional, do campo de vento a 10m (Chiang & Vimont, 2004).

Águas Quentes do Hemisfério Ocidental Tropical (Tropical Western Hemisphere Warm Pool - WHWP)

E por fim, o índice WHWP (Fig. 3G) trata-se da anomalia mensal da TSM superior a 28,5°C que se desenvolve no Atlântico Tropical, a oeste da América Central e se estende até o leste do Pacífico Norte (Wang & Enfield, 2001).

Figura 3. Índices Climáticos utilizados neste trabalho. A) El Niño 3.4 (Niño 3.4); B) *Tropical Northern Atlantic Index* (TNA); C) *Tropical Southern Atlantic Index* (TSA); D) *Pacific Decadal Oscillation* (PDO), E) *Antarctic Oscillation* (AAO); *F) Atlantic Meridional Mode* (AMM)*; G) Tropical Western Hemisphere Warm Pool* (WHWP).



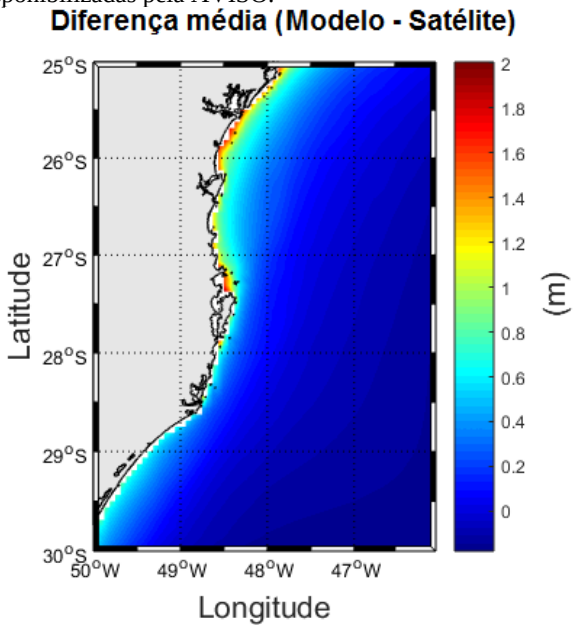
Fonte: a autora

3. Resultados e discussões

3.1 Validação

Foi realizada a diferença entre a média de Hs do ano de 2010 gerado pelo modelo e a média do produto de Hs observado por satélites disponibilizadas pela AVISO (Fig. 4) na grade de domínio local. Para isso a média de Hs da AVISO foi interpolada com o produto do modelo WW3, pois a sua resolução é de 1° enquanto que a resolução do WW3 é de 1/16°. Verificou-se que o modelo superestima em quase todas as partes do domínio, com exceção da porção sudoeste da região (águas profundas), onde seus valores foram inferiores aos obtidos pelo satélite. Na maior parte do domínio as diferenças ficam abaixo dos 80cm, atingindo um máximo de 2m próximo à costa da região localizada ao norte, provavelmente associado a extensão da plataforma interna, que nesta região é maior do que o litoral sul de Santa Catarina, e também as limitações que o modelo possui em representar ondas em águas mais rasas. Já nos locais onde foram obtidas as séries temporais de espectros direcionais de onda (Fig. 2) a diferença é menor que 50cm.

Figura 4. Diferença média do ano de 2010 de Hs modelado menos a Hs medido por satélites disponibilizadas pela AVISO.

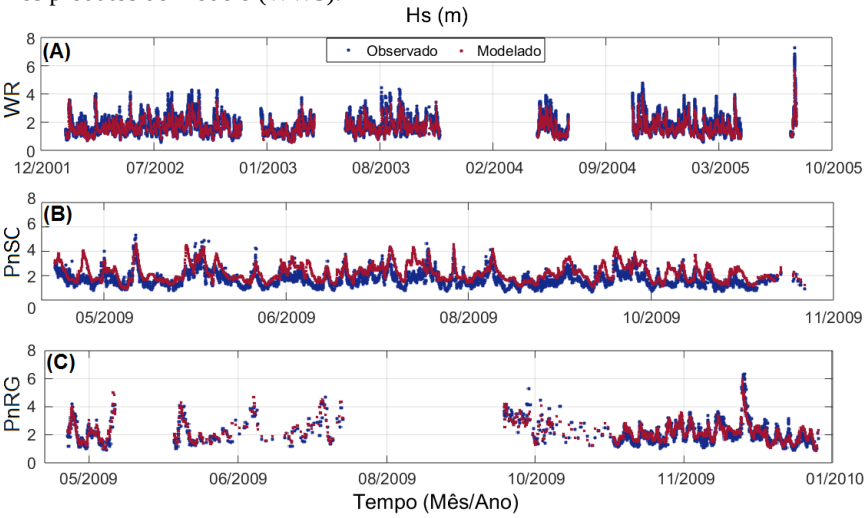


Fonte: a autora.

Foram realizadas, também, análises estatísticas entre o produto da simulação localizado exatamente nos pontos onde estavam as boias PnSC, PnRG e o WR durante o mesmo período dos dados medidos, para os parâmetros de Hs, Tp e θp.

Analisando a altura significativa (Hs), temos a comparação das séries temporais dos dados das boias e das saídas do modelo, para os três pontos em questão (Fig. 5). É possível observar que os resultados da simulação conseguiram representar, de maneira geral, o comportamento das ondas nos diferentes pontos, porém, há uma marcada subestimativa dos picos mais energéticos de Hs, sendo esta maior em WR (Fig. 5A) do que em PnSC (Fig. 5B) e PnRG (Fig. 5C). Nota-se também a presença de lacunas com a ausência de dados, isso ocorre devido à falta dados medidos. De forma que o produto de WW3 foi interpolado para os períodos e resolução que os dados medidos se apresentavam para que fosse possível realizar a validação.

Figura 5. Valores de altura significativa (Hs). A) ponto WR de março de 2002 até agosto de 2005, B) ponto PnSC de abril de 2009 até novembro de 2009, C) ponto PnRG de abril de 2009 até dezembro de 2009. Em vermelho estão representados os produtos do modelo (WW3).



Fonte: a autora.

Foram obtidos resultados estatísticos similares entre o modelo e as boias WR e PnRG (Tab. 1), onde a média, desvio-padrão e mediana no ponto WR foi de 1,7m 0,6m e 1,6m e para o modelo de 1,6m, 0,5m e 1,5m, respectivamente. Enquanto que no ponto PnRG os resultados foram 2,0m, 0,8m e 1,9m para a boia e 2,1m, 0,7m e 2,0m (Tab. 1) no modelo, respectivamente para as mesmas três análises estatísticas previamente citadas. Como é de se esperar, no ponto PnRG (Fig. 5C) existe uma maior energia de onda por estar mais próximo dos locais de geração de ondas, resultantes das frentes frias e anticiclones subtropicais, produzindo alturas maiores e uma maior variabilidade no tempo. Ainda se tratando de Hs, a comparação mais discrepante foi encontrada entre a boia PnSC e o WW3, com resultados 1,7m, 0,6m e 1,7m para o primeiro e de 2,2m, 0,7m e 2,1m (Tab. 1) para o segundo, para média, desvio-padrão e mediana, respectivamente. As simulações neste último ponto produziram valores mais elevados do que os dados *in situ* e esse comportamento é verificado na figura 5B, na qual se pode observar um distanciamento dos resultados simulados ao longo de toda a série temporal, estimando ainda, picos que não tiveram relação com os dados reais, como por exemplo, no mês de maio (Fig. 5B).

Tabela 1. Resultados estatísticos da média, desvio padrão (Std) e mediana (Md) medidos e do produto gerado pelo modelo (WW3) nos pontos WR, PnSC e PnRG.

	WR|WW3			PnSC|WW3			PnRG|WW3		
	Média	Std	Md	Média	Std	Md	Média	Std	Md
Hs (m)	1,7|1,6	0,6|0,5	1,6|1,5	1,7|2,2	0,6|0,7	1,6|2,1	2,0|2,1	0,8|0,7	1,9|2,0
Tp (s)	10,6|9,4	1,9|1,9	10,3|9,0	10,4|10,8	2,3|2,2	10,0|10,5	9,2|9,3	2,5|2,1	8,7|8,8

Fonte: a autora.

A tabela 2 corrobora essa análise, onde WR e PnRG apresentam correlações altas com o WW3 de 0,91 e 0,86 e RMSE e viés baixos, de 0,22m e 0,1m e 0,34m e -0,08m, respectivamente. Enquanto que entre PnSC e WW3 os resultados encontrados foram 0,67, 0,52m e -0,5m, para R, RMSE e viés, respectivamente (Tab. 2)

Tabela 2. Resultados estatísticos para a correlação de Pearson (R), erro quadrático médio (RMSE) e viés dos dados medidos e do produto gerado pelo modelo (WW3) nos pontos WR, PnSC e PnRG. Todos os valores encontrados em R nesta tabela foram estatisticamente significativos ($p<0,005$).

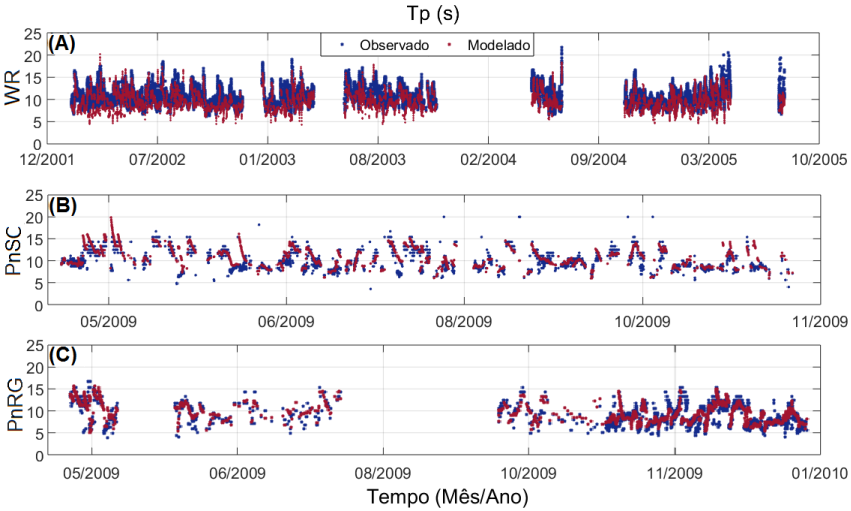
	WR|WW3			PnSC|WW3			PnRG|WW3		
	R	RMSE	Vies	R	RMSE	Vies	R	RMSE	Vies
Hs	0,91	0,22 m	0,1 m	0,67	0,52 m	-0,5	0,86	0,34 m	-0,08
Tp	0,7	1,36 s	1,17 s	0,69	1,55 s	-0,4	0,69	1,4s	-0,09
θ	0,64	29,5°	---	0,6	37°	---	0,69	38°	---

Fonte: a autora.

A comparação das séries temporais de Tp entre o modelo e as boias está representada na figura 6. Analisando no ponto WR, verifica-se uma tendência do modelo em subestimar os valores, com média, desvio-padrão e mediana para o Tp simulado de 9,4s, 1,9s e 9s, respectivamente, enquanto que os valores observados foram 10,6s, 1,9s e 10,3s, respectivamente (Tab. 1). Ocorre então uma subestimativa, porém, os valores iguais de desvio-padrão, nos indicam que as oscilações ao longo do tempo estão sendo bem representadas pelo modelo. Já para os pontos PnSC e PnRG (Fig. 6B e 6C, respectivamente) a tendência foi inversa, ocorrendo uma superestimativa. Além dos valores médios de Tp do modelo de 10,8s e 9,3s, serem superiores quando comparados com os dados das boias PnSC de 10,4s e PnRG com 9,2s (respectivamente, Tab. 1), a mediana também se encontra acima, com valores de 10,5s e 8,8s, enquanto que para as boias os valores obtidos foram 10s e 8,7s, para PnSC e PnRG, respectivamente, de modo que o modelo teve um desvio-padrão inferior. Esses resultados indicam que o modelo superestima os resultados de Tp.

Observa-se que a melhor correlação estatisticamente significativa encontrada em Tp foi em WR de 0,7, enquanto que em PnSC e PnRG foi de 0,69 para ambos (Tab. 2), estando todas muito próximas. Confirmando o que foi observado na figura 5 e tabela 1, o maior viés encontrado foi em WR de 1,17s, enquanto que em PnSC foi de -0,4s e o menor foi no ponto PnRG de -0,09s. O RMSE encontrado para os pontos de WR, PnSC e PnRG entre os dados observados e os modelados foi de 1,36s, 1,55s e 1,4s, respectivamente.

Figura 6. Valores de período de pico (Tp). A) ponto WR de março de 2002 até agosto de 2005, B) ponto PnSC de abril de 2009 até novembro de 2009, C) ponto PnRG de abril de 2009 até dezembro de 2009. Em vermelho estão representados os produtos do modelo (WW3).

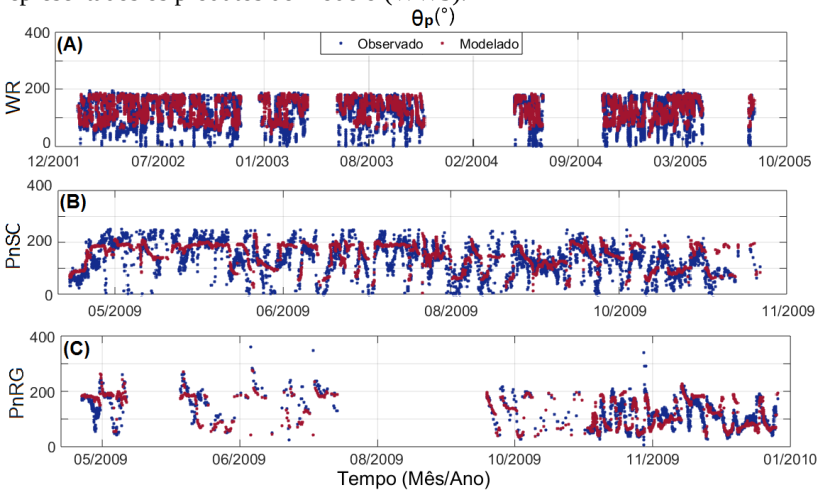


Fonte: a autora.

Por fim, temos a comparação da direção de pico (θp) na figura 7. O comportamento já observado por Silva *et al.*, (2015), ao analisar o desempenho da base de dados DOW do SMC na costa catarinense, de que as direções que variam de 0° a 90° não são representadas pelo modelo, também foi encontrado utilizando o WW3, no ponto WR (Fig. 7A). A hipótese levantada pelos autores é a de que, devido às características da região, de possuir um mar bimodal, as ondas provenientes de nordeste no litoral de Santa Catarina não estariam sendo bem reproduzidas na base de dados por eles utilizada, provavelmente pelo espalhamento do vento utilizado não reproduzir o espalhamento real que ocorre na região. O mar bimodal em Santa Catarina possui uma variação sazonal significativa, ocorrendo mais no verão e menos no inverno (Araújo *et al.*, 2003). Esta condição acaba não sendo bem reproduzida pelo modelo devido à baixa resolução espacial e temporal dos dados de ventos usados para gerar as ondas no modelo que acabam não representando as características dos ventos locais e consequentemente as ondas influenciadas por eles. Entretanto, θp no ponto do WR apresentou correlação de 0,64, sendo razoavelmente boa.

A pior correlação de θp ficou para ponto de PnSC (Fig. 7B), com o valor de 0,6 (Tab. 2), ponto localizado próximo a quebra da plataforma, enquanto que o ponto que apresentou a melhor correlação de θp foi o de PnRG (Fig. 7C) com correlação de 0,69 localizado na grade regional.

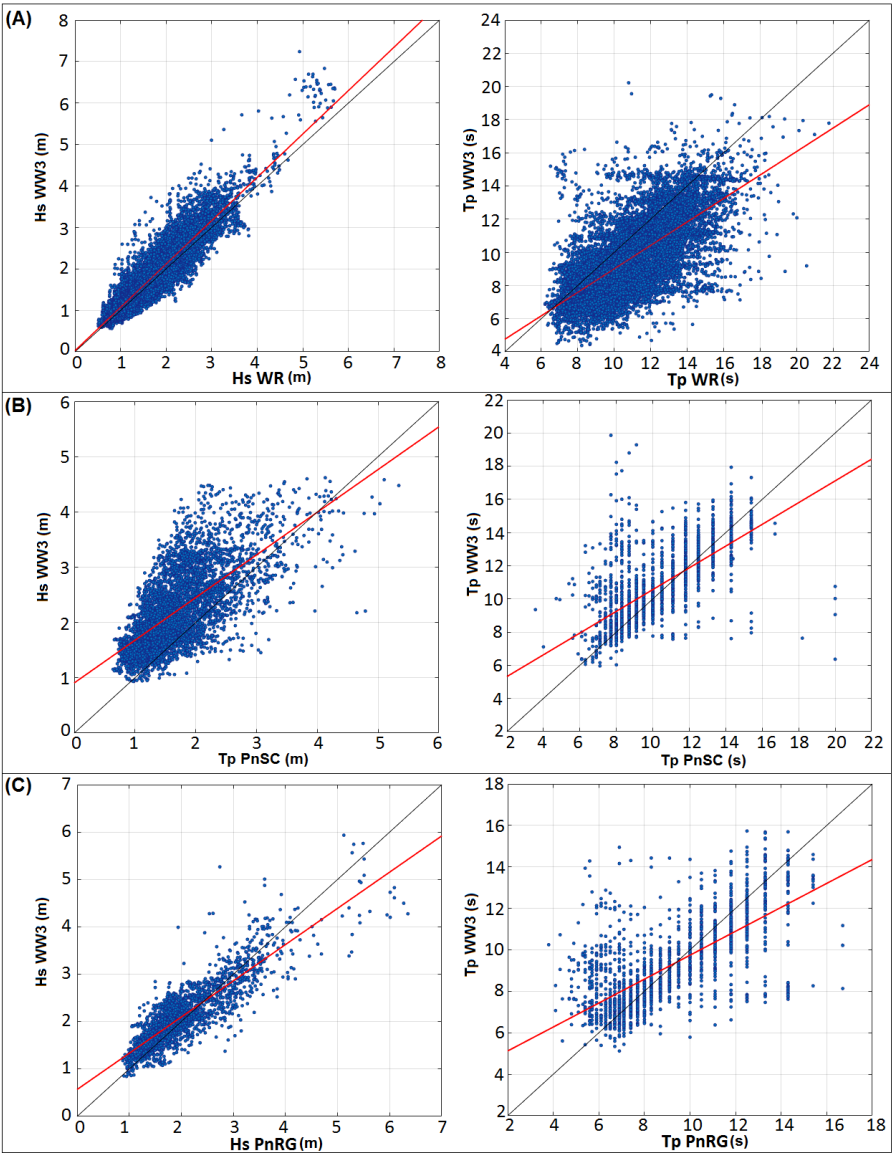
Figura 7. Valores de direção de pico (θp). A) ponto WR de março de 2002 até agosto de 2005, B) ponto PnSC de abril de 2009 até novembro de 2009, C) ponto PnRG (c) de abril de 2009 até dezembro de 2009. Em vermelho estão representados os produtos do modelo (WW3).



Fonte: a autora.

Na figura 8 é representado o diagrama de dispersão do produto modelado e os dados medidos para cada ponto. A regressão linear das variáveis está representada em vermelho e em preto, tem-se o que seria o ajuste “perfeito”, o qual ocorreria caso o produto do modelo representasse com exatidão os dados medidos. No diagrama de dispersão são claras as situações em que o modelo está subestimando ou superestimando os dados observados. Em Tp, por exemplo, a correlação dos dados em todos os pontos apresentou valores similares, próximos de 0,7. Ficou evidente que existe uma tendência dos menores valores de Tp serem superestimados pelo modelo e os valores mais altos são subestimados, principalmente em PnSC e PnRG. Este comportamento é visualizado em quase todos os diagramas, com exceção do ponto WR em Hs.

Figura 8. Gráfico de dispersão entre os modelados e observados de Hs e Tp nos três pontos. A) ponto WR, B) ponto PnSC, C) ponto PnRG. A linha vermelha é a regressão linear das variáveis e a linha preta a bissetriz.



Fonte: a autora.

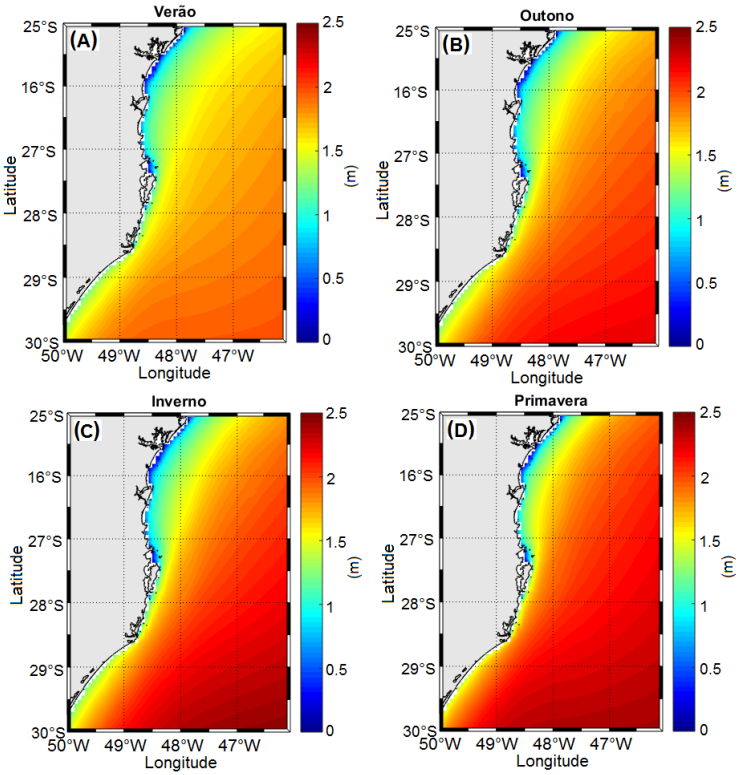
Por fim, constatou-se que as variáveis de Tp e θp modelados não conseguiram representar os dados observados tão bem como a variável de Hs. Isto pode ser justificado pela resolução dos ventos utilizados para forçar o modelo WW3 que podem não representar com precisão a condição do mar bimodal na região. Melo Filho *et al.* (2008) mostraram que existe uma dificuldade relevante em estimar ondas através de modelos devido a qualidade dos campos de ventos fornecidos, e particularmente em Santa Catarina, o aperfeiçoamento da qualidade dos campos de ventos é imprescindível devido a existência de áreas onde mais de 32% dos estados do mar na região são representados por uma condição bimodal e 3% representado pela ocorrência de três sistemas (Franco & Melo, 2008).

3.2 CLIMA DE ONDAS

3.2.1 Sazonal

As médias sazonais de Hs e Tp no período modelado para a grade local são encontradas nas figuras 9 e 10, respectivamente. Observou-se que o verão é a estação menos energética (menores Hs, Fig. 9A). A região oceânica ao sul da grade de estudo é onde estão concentradas as maiores médias de Hs nesta estação, porém elas não ultrapassam 2m. No outono (Fig. 9B), por sua vez, a média de Hs aumenta comparado ao verão, mas é no inverno (Fig. 9C) que são encontradas as maiores médias de Hs principalmente na região offshore em que os valores são superiores a 2,5m. Nesta estação a condição de "*swell*" prevalece na região provavelmente associada a maior frequência de ciclogênese que ocorre nessa estação (GAN & RAO, 1991). Por sua vez, na primavera (Fig. 10D) ocorre uma aproximação de ondas na costa com Hs por volta de 1,5m e superiores, como por exemplo, no litoral sul de Santa Catarina e também é a estação que apresentou grande energia de onda assim como o inverno, provavelmente associado aos meses da primavera que apresentam um número de ocorrência de frentes frias na região ligeiramente maior comparado aos demais meses e também possui menor variabilidade da frequência destes sistemas frontais comparados aos demais meses segundo Rodrigues *et al.* (2004).

Figura 9. Média sazonal de Hs em metros obtidas pelo modelo WW3 no período de 1979 a 2010. A) verão, B) outono, C) inverno, D) primavera.



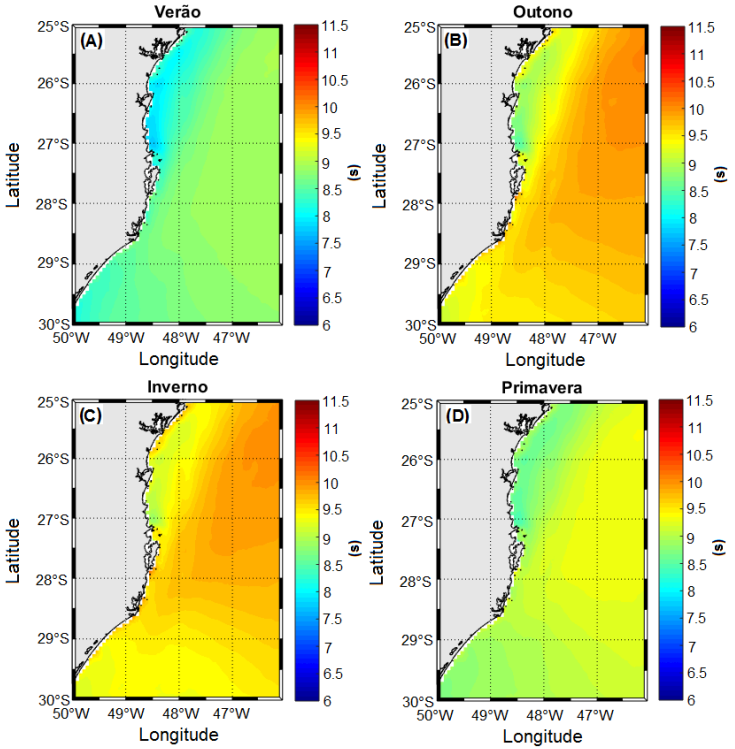
Fonte: a autora.

Em relação ao período de pico (Tp) constatou-se, segundo o modelo, que o verão (Fig. 10A) é a estação que possui ondas com os menores períodos, não alcançando 9,5s; coincidindo com a estação que apresenta os menores valores de Hs (Fig. 9A). No outono (Fig. 10B) e inverno (Fig. 11C) as médias são maiores, provavelmente associado ao fluxo dos ventos de sul que são predominantes nessas estações (Rodrigues *et al.*, 2004). A região oceânica ao norte apresenta valores que excedem a 10s nestas estações, enquanto que na região próxima à costa os valores de Tp ficam próximos de 9,5s. Já na primavera (Fig. 10D) verificou-se que os valores de Tp começam a diminuir comparado ao inverno.

Observou-se um padrão nas quatro estações, no qual o litoral norte catarinense apresenta Tp menores do que a região sul, padrão também verificado nas médias sazonais de Hs (Fig. 10D). Isso

possivelmente ocorre, devido ao fato desta porção da costa, possuir uma plataforma continental mais larga, dissipando a energia de onda (diminuição de Hs) e aumentando o Tp.

Figura 10. Média sazonal de Tp em segundos obtidas pelo modelo WW3 no período de 1979 a 2010. A) verão, B) outono, C) inverno, D) primavera



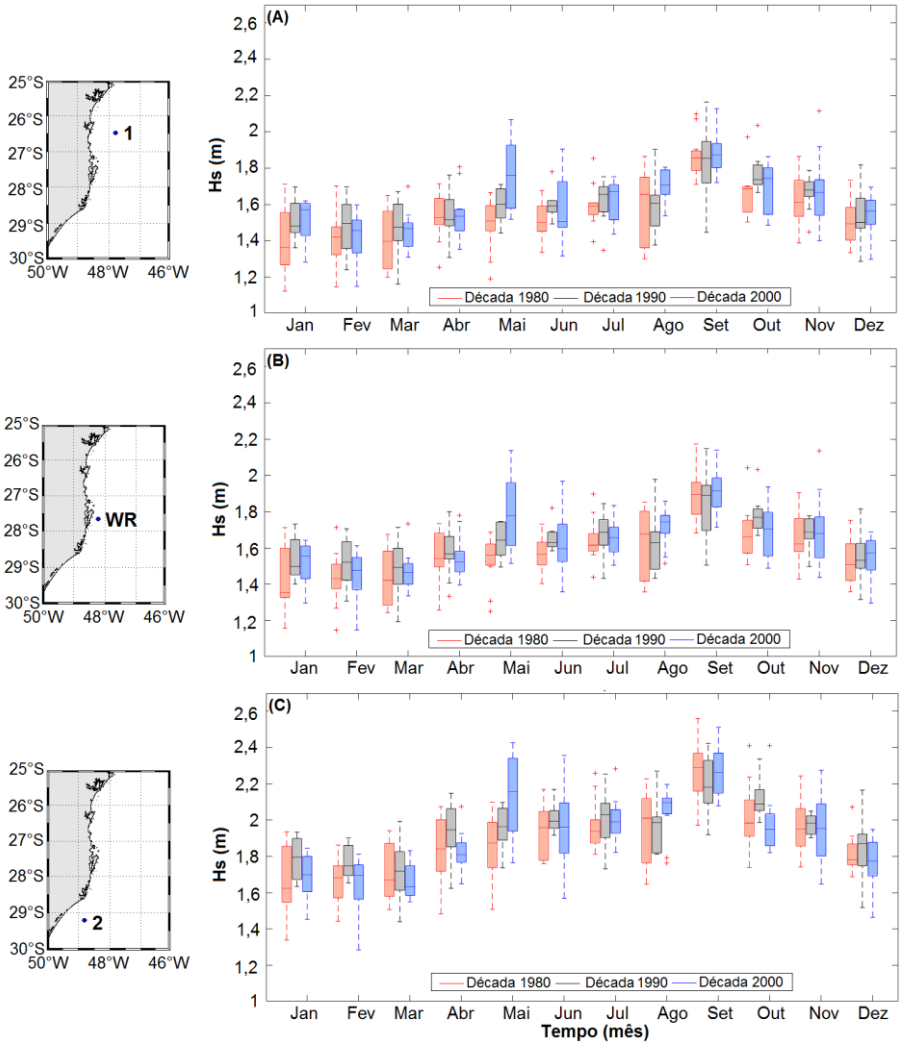
Fonte: a autora.

3.2.2 Mensal

A fim de se verificar a variabilidade mensal entre as décadas a série temporal foi dividida em três: a primeira é a década 1980 (de 1979 a 1989), a segunda é a década 1990 (de 1990 a 1999) e a terceira é a década 2000 (de 2000 a 2010). As figuras 11 e 12 representam a variabilidade mensal de Hs e Tp, respectivamente, em cada década para os pontos WR, 1 e 2 escolhidos. O ponto WR (27,63°S; 48,19°W) foi selecionado por estar localizado próximo ao centro do litoral do estado de Santa Catarina e por ter sido utilizado na análise de validação. O ponto 1

(26,5°S; 47,8°W) foi selecionado por estar localizado ao norte do litoral de Santa Catarina e por fim, o ponto 2 (29,2°S; 48,8°W) selecionado por estar localizado ao sul do litoral do estado.

Figura 11. Diagrama de caixa mensal de Hs nos pontos 1 (26,5°S; 47,8°W), 2 (29,2°S; 48,8°W;) e WR (27,63°S; 48,19°W) para as décadas de 1980, 1990 e 2000.



Fonte: a autora.

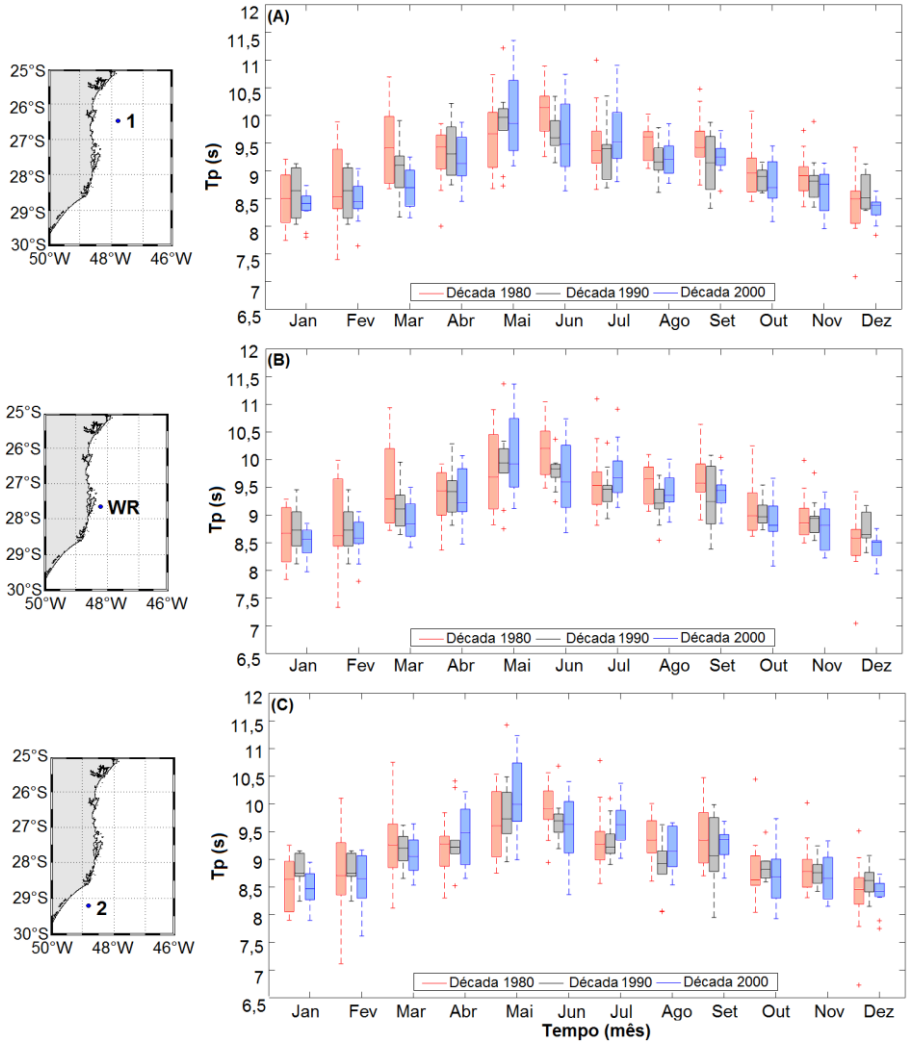
Observou-se que Hs apresenta os maiores valores nos meses de maio e setembro e os menores entre janeiro a março. Coincidindo com o período que Gan & Rao (1991) encontraram ao estudarem a frequência de ciclogêneses sobre a América do Sul, no qual a estação do inverno, principalmente o mês de maio, apresenta uma maior frequência de ciclogênese, enquanto que a menor frequência foi encontrada no mês de dezembro.

Nota-se que no ponto 1 (Fig. 11) as medianas encontradas são menores do que as encontradas em WR e ponto 2, sendo que a maior se encontra próxima a 1,8m. Por sua vez no ponto 2 foram encontrados os maiores valores de medianas de Hs, próximo a 2,2m. Isto é, na região sul do litoral catarinense ocorre uma maior incidência de ondas com Hs superior a 2m do que em todas as outras regiões do estado, sendo nele também encontrado o maior valor de Hs de 2,6m em setembro na década de 1980.

Quanto a Tp (Fig. 12), essa diferença na magnitude entre os pontos não ocorreu. Apurou-se que os meses que possuem ondas com os maiores valores de Tp são os de maio e junho, na transição da estação do outono para o inverno, e coincide com o período em que a Hs também é maior (Fig. 11). Já os menores valores são encontrados nos meses de dezembro a fevereiro (verão). Nos meses de março e junho foi observado uma diminuição das medianas com o passar das décadas nos três pontos. Esse comportamento, de diminuição das medianas entre as décadas, não ocorreu em Hs em nenhum dos meses, mas ocorreu o aumento das medianas ao longo das décadas no mês de maio.

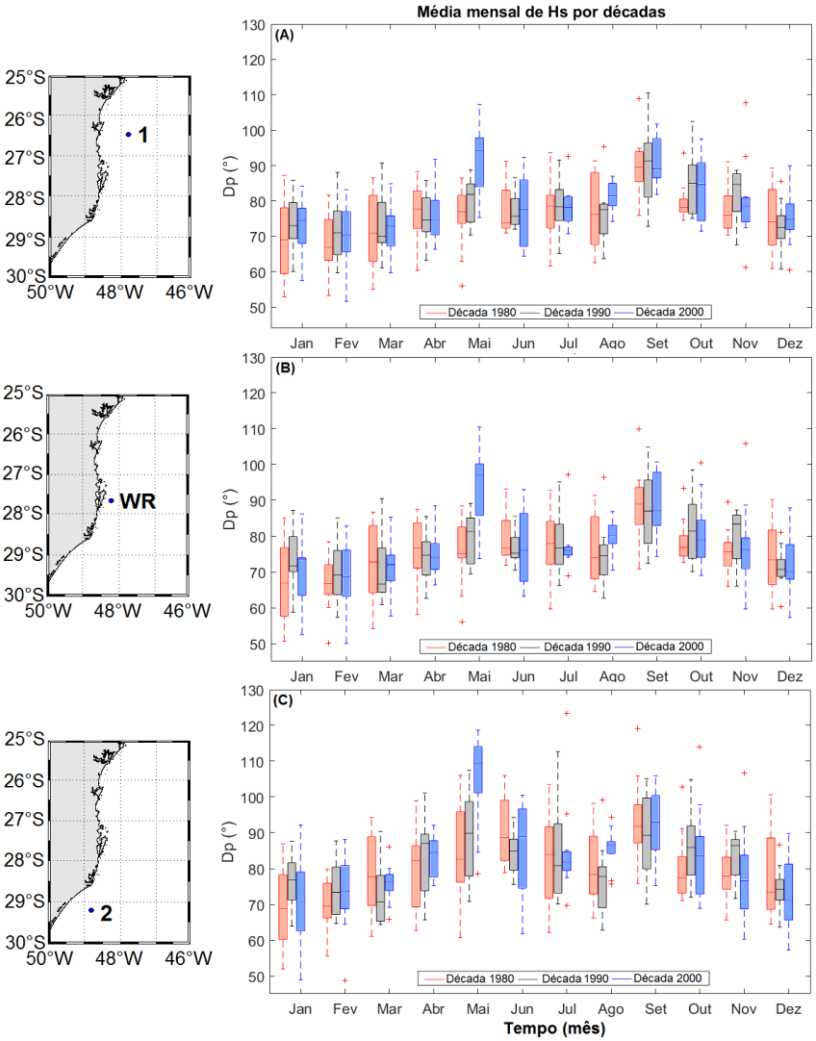
Na figura 13 observa o diagrama de caixas para θp. É possível verificar que as medianas nos três pontos variam entre 70° e 90°, sentido nordeste e leste. Nos meses de janeiro, fevereiro e março as direções são mais para nordeste. É nítido também, que nos meses de maio e setembro as medianas possuem direções médias de pico no sentido de sudeste, sendo que esses meses coincidem com os meses onde a Hs apresentou os maiores valores.

Figura 12. Diagrama de caixa mensal de Tp nos pontos 1 (26,5°S; 47,8°W), 2 (29,2°S; 48,8°W;) e WR (27,63°S; 48,19°W) para as décadas de 1980, 1990 e 2000.



Fonte: a autora.

Figura 13. Diagrama de caixa mensal de θp nos pontos 1 (26,5°S; 47,8°W), 2 (29,2°S; 48,8°W;) e WR (27,63°S; 48,19°W) para as décadas de 1980, 1990 e 2000.



Fonte: a autora.

3.2.2.1 Análise das Funções Ortogonais Empíricas

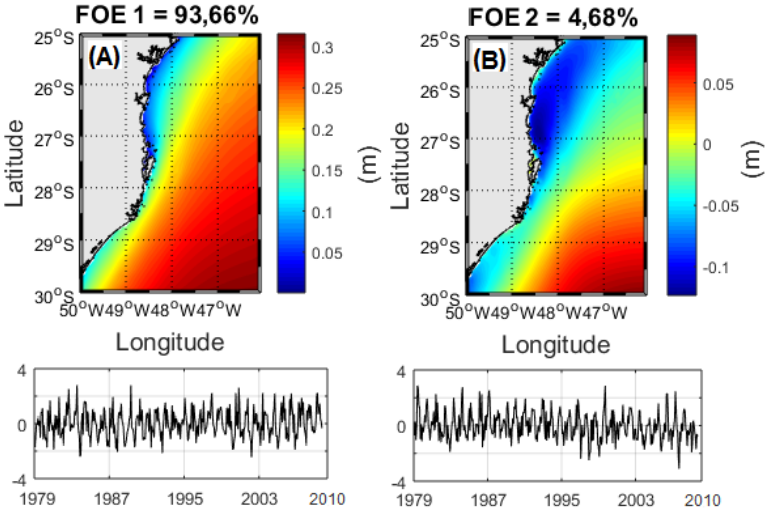
Para descrever a variabilidade espaço-temporal da área de estudo foi utilizado o método de funções ortogonais empíricas (FOE), técnica utilizada para analisar os modos dominantes da variabilidade espacial de um determinado parâmetro ao longo de um período de tempo, sendo uma poderosa ferramenta para identificar os principais modos de variabilidade climática (Weare, 1982). As FOEs decompõem as variações espaciais e temporais de um campo geofísico em combinação com os padrões espaciais ortogonais e componetes principais correspondente de forma linear (LORENZ, 1956). Nas figuras 14 e 15 têm-se os resultados das FOEs aplicadas sobre as médias mensais de Hs e Tp para todo o período estudado (1979-2010), respectivamente. Portanto, nessas figuras encontram-se representadas os campos espaciais encontrados em e também as amplitudes de cada FOE ao longo do tempo. Essas amplitudes associadas aos valores encontrados nos campos representam a variabilidade que ocorreu ao longo do período.

A análise da FOE para a altura significativa (Hs) demonstrou uma ampla dominância do modo FOE1, explicando em 93,66% a variabilidade de Hs para o conjunto de dados utilizado (Fig. 13A). Neste modo, é possível verificar um gradiente da energia de onda de noroeste para sudeste, onde as maiores alturas se encontram em oceano aberto e podem ser resultado das ondas geradas por ventos oriundos de ciclones e os anticiclones subtropicais. É evidente também, o efeito de atenuação da energia de onda quando esta se adentra na plataforma continental, reduzindo gradualmente Hs em direção ao continente. A série de tempo de amplitude (também conhecida como autovetor da FOE) deste modo (Fig. 13A, painel inferior) apresenta uma variabilidade temporal bem demarcada.

O segundo modo da FOE (Fig. 13B), representa apenas 4,68% da variabilidade e apresenta uma situação bimodal, alternando o padrão de ondas, ou seja, as vezes as maiores ondas estão localizadas na região sul, onde está situada a fase positiva da FOE 2 e as vezes ocorre o contrário. Isto porque o autovetor associado ao modo de variabilidade espacial representam a evolução do tempo. No caso da situação bimodal encontrada na FOE 2, quando o pixel e a amplitude do autovetor apresentarem o mesmo sinal, significa que o desvio da altura significativa é positivo naquele momento, em relação ao valor médio encontrado. Por outro lado, quando os pixels e a amplitude apresentam sinais opostos, significa um desvio médio negativo da média, alternando o padrão de ondas ao longo do tempo. A partir desse resultado, com apenas dois

modos de variabilidade, explica-se 98,34% de toda a variabilidade obtida para o período estudado.

Figura 14. FOEs de Hs mensal obtidas do produto do modelo WW3 no período de 1979 a 2010. A) FOE1 explicando 93,66% da variabilidade, B) FOE2 explicando 4,68%.

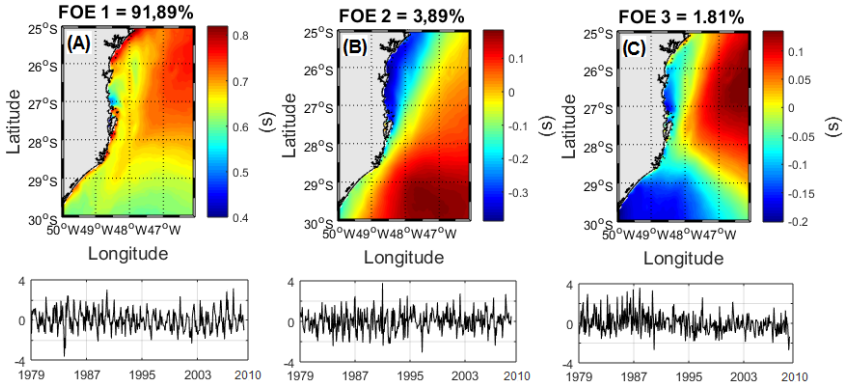


Fonte: a autora.

Na Fig. 15 temos representadas as funções ortogonais empíricas para o Tp mensal. No primeiro modo de variabilidade de FOE (Fig. 15A), que representa 91,89% da variância, observa-se um gradiente, havendo um aumento no período de onda de sudoeste para nordeste, sendo esta a direção da trajetória típica do deslocamento de sistemas frontais ao longo do litoral sul e sudeste do Brasil (Rodrigues *et al.*, 2004), indicando um aumento próximo a 0,75s. Portanto, na região oceânica localizada a nordeste, estão as ondas com os maiores períodos, enquanto que ao sul, as ondas com Tp menor. Já no segundo modo de variabilidade (Fig. 15B), que explica 3,89% da variância das médias mensais de Tp, nota-se que a fase positiva se encontra na região oceânica ao sul do domínio, enquanto que a fase negativa está localizada na região interna da plataforma continental ao norte da grade. Por fim o terceiro modo de variabilidade explica 1,81% da variância, apresentando a fase positiva na região oceânica ao norte do domínio e fase negativa compreendendo toda a região ao sul do domínio e as proximidades da costa. Ao todo com estes

três modos de variabilidade explica-se 97,59% de toda a variabilidade de Tp obtida no período estudado.

Figura 15. FOEs de Tp mensal obtidas do produto do modelo WW3 no período de 1979 a 2010. A) FOE1 explicando 91,89% da variabilidade, B) FOE2 explicando 3,89%, C) FOE3 explicando 1,81%.



Fonte: a autora.

3.2.2.2 Correlações entre as Componentes Principais e os Índices Climáticos

As amplitudes encontradas nas FOEs de Hs (Fig. 13), foram correlacionadas com os índices climáticos usados neste trabalho (AAO, PDO, ATN, ATS, Niño 3.4, WHWP e AMM). Nem todas as correlações encontradas foram estatisticamente significativas ($p < 0{,}005$). Na tabela 3 estão apresentados os resultados de todas estas correlações, sendo que os valores em vermelho são as correlações significativas e em preto, as não significativas. Nota-se que nenhuma das correlações significativas encontradas indicou uma forte correspondência entre as séries temporais comparadas, sendo a correlação mais forte entre a amplitude da FOE 1 (que está em fase e possui a presença do gradiente da energia de onda de noroeste para sudeste) com WHWP de 0,22 e para a FOE 2 (que apresenta a condição bimodal) de Hs, com o índice Niño 3.4 de 0,27. No entanto, deve ser considerado que os modos de variabilidade são apenas parcelas que explicam de forma abrangente a variância do campo analisado, ou seja, nem todos os processos que ocorrem no local de estudo estão sendo representados na análise. Além de que, mesmo que esses valores sejam

significativos estatisticamente, nos deixam dúvidas sobre a dimensão da interferência dos os índices climáticos no padrão de variabilidade de Hs. Também foram encontradas as correlações estatisticamente significativas entre a amplitude da FOE 1 de Hs e o Niño 3.4 de 0,1 e com TNA de 0,15, ao mesmo tempo que na amplitude da FOE 2 foram encontradas correlações de -0,14 com TNA, de 0,24 com PDO e de 0,22 com AMM.

O mesmo tipo de análise foi realizado com as amplitudes encontradas para os modos de variabilidade de Tp (Tab. 3). Verificou-se que a correlação mais forte encontrada foi com a amplitude da FOE 1 e o índice Niño 3.4, de 0,28. Nas correlações com a FOE 2, foi possível verificar correlações estatisticamente significativas com dois índices climáticos, TSA e PDO, de 0,12 e -0,14, respectivamente, enquanto que com a PC3 foram encontradas quatro correlações estatisticamente significativas de 0,1 com Niño 3.4, - 0,14 com TNA, 0,2 com PDO e -0,13 com AMM. Contudo, como já observado em Hs, as correlações encontradas com Tp também foram baixas, sendo consideradas não suficientes para explicar influência dos índices climáticos com a variabilidade de Tp em Santa Catarina.

É valido ressaltar que esta análise de correlação reflete a possível influência de determinados índices climáticos, mas não explica de que modo e as razões de como esta influência ocorre.

Tabela 3. Correlações de Pearson (R) realizadas entre os índices climáticos (Niño 3.4, TNA, TSN, PDO, AAO, AMM e WHWP) com os modos de variabilidade de FOE 1 (Hs), FOE 2 (Hs), FOE 1 (Tp), FOE 2 (Tp) e FOE 3 (Tp). Os valores em vermelhos são as correlações estatisticamente significativas ($p<0,05$).

Índices Climáticos	FOE 1 (Hs)	FOE 2 (Hs)	FOE 1 (Tp)	FOE 2 (Tp)	FOE 3 (Tp)
Niño 3.4	**0,1**	**0,27**	**0,28**	-0,09	**0,1**
TNA	**0,15**	**-0,14**	-0,06	0,01	**-0,14**
TSA	0,02	-0,05	0,02	**0,12**	-0,05
PDO	-0,06	**0,24**	0,08	**-0,14**	**0,2**
AAO	0,04	-0,13	-0,06	-0,002	0,01
AMM	0,05	**-0,2**	**-0,17**	-0,008	**-0,13**
WHWP	**0,23**	-0,07	0,004	-0,03	-0,09

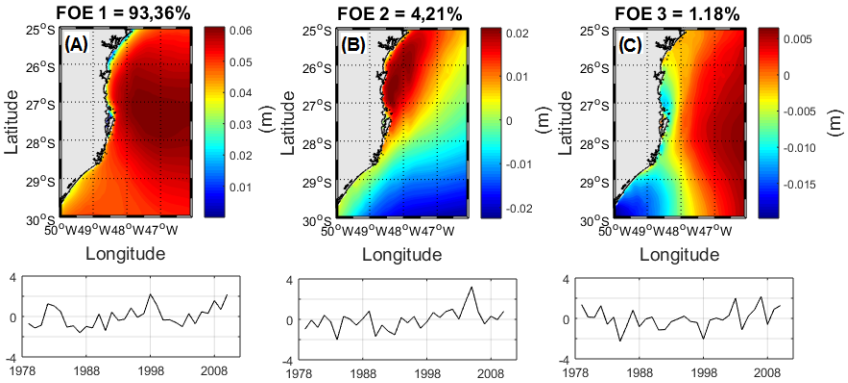
Fonte: a autora.

3.2.3 Interanual

Para analisar a variabilidade interanual da área de estudo também foi utilizado o método de funções ortogonais empíricas (FOEs) para as médias anuais de Hs e Tp. Na figura 16A, FOE 1 explicando 93,36% da variância, na figura 16B a FOE 2 explicando 4,21% e na figura 16C a FOE 3 explicando 1,18%, ao todo, os três modos de variabilidade explicam 98,75% da variância dos dados anuais de Hs durante o período estudado.

Na FOE 1 nota-se que todo o domínio apresenta valores positivos, assim como foi encontrado no principal modo de variabilidade com os dados de Hs mensal. Na região central oceânica se estendendo na direção noroeste até a área interna da plataforma continental encontram-se os maiores valores positivos de variância de 0,08m. Já na FOE 2 observa-se a condição bimodal, como foi encontrado na análise mensal, no entanto as fases positivas e negativas estão em regiões diferentes. A sua fase positiva encontrada na FOE 2 de Hs anual está localizada na região próxima à costa norte do domínio e a fase negativa localizada fora da costa ao sul do domínio. Na FOE 3 também é encontrada esta condição, porém em localidades divergentes. A fase positiva está localizada em toda a região oceânica e a fase negativa compreende a área interna da plataforma bem ao sul do domínio estudado.

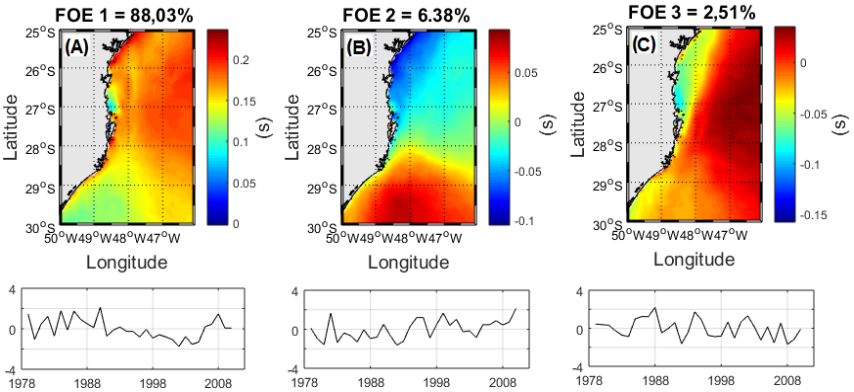
Figura 16. FOEs de Hs interanual obtidas do produto do modelo WW3 no período de 1979 a 2010. A) FOE1 explicando 93,36% da variabilidade, B) FOE2 explicando 4,21%, C) FOE3 explicando 1,18%.



Fonte: a autora.

Por sua vez, na figura 17 estão representados os modos de variabilidade das médias anuais de Tp. O principal modo de variabilidade (FOE 1) na figura 17A explica 88,03% da variância, observa-se que todo o domínio está compreendido com valores positivos e que existe um gradiente de período que vai de sudoeste para nordeste, este gradiente também foi encontrado ao analisar o modo de variabilidade de Tp com as médias mensais (Fig. 15A). O segundo e o terceiro modo de variabilidade explicam 6,38% (Fig. 17B) e 2,51 (Fig. 17C), respectivamente. Nestes modos são encontradas fases positivas e negativas. Em FOE 2, a fase positiva está localizada em toda a região sul e a negativa na região norte. Por sua vez, em FOE 3, a fase negativa abrange uma área menor localizada dentro da plataforma interna, ao norte da zona costeira de Santa Catarina.

Figura 17. FOEs de Tp interanual obtidas do produto do modelo WW3 no período de 1979 a 2010. A) FOE1 explicando 88,03% da variabilidade, B) FOE2 explicando 6,38, C) FOE3 explicando 2,51%.



Fonte: a autora.

3.2.3.1 Análise de Tendências

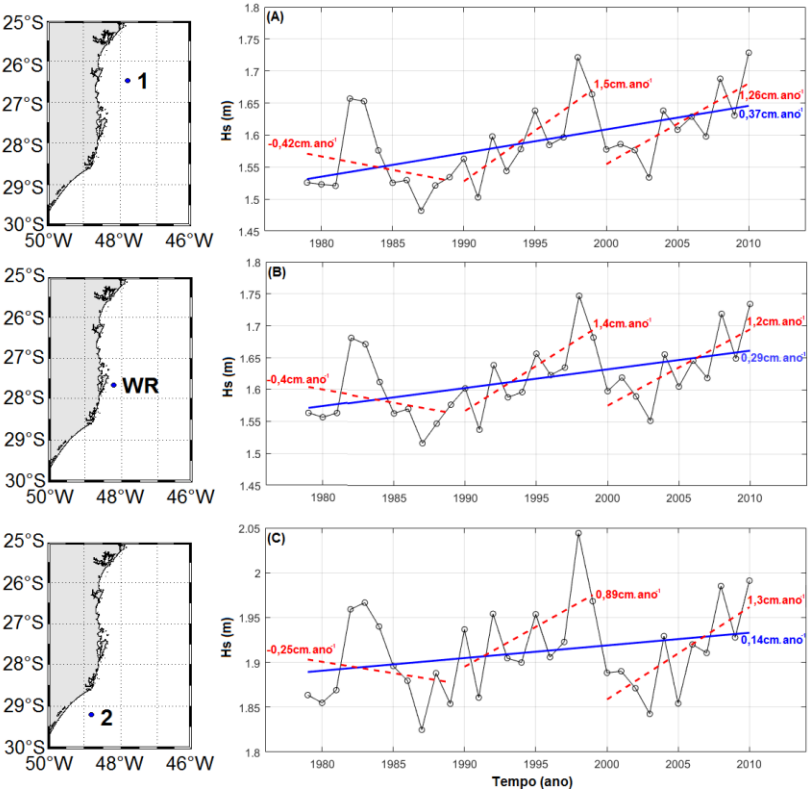
A fim de encontrar a propensão de Hs em aumentar ou diminuir ao longo dos anos temos a figura 18 representando a tendência linear da variação média anual durante os trinta e dois anos analisados para os pontos 1, 2 e WR escolhidos anteriormente, e, a tendência linear para cada década.

Notou-se que a Hs, nos três pontos selecionados possui a tendência de aumentar, o que coincide com o que foi encontrado por

Reguero *et al.*, (2013) onde a Hs na região do Atlântico Sul está crescendo ao longo dos anos. Outros estudos em regiões do Atlântico Norte também relataram aumentos de Hs nas últimas décadas (Bacon & Carter, 1991; Wang & Swail, 2002, Dodet *et al.*, 2010; Bertin *et al.*, 2013).

O maior acréscimo (0,37cm.ano^{-1}) é encontrado no ponto 1, localizado na região norte do estado (Fig. 18, painel superior) e o menor no ponto 2 (0,14cm.ano^{-1}), ao sul (Fig. 18, painel inferior). No ponto WR a tendência encontrada foi de 0,29cm.ano^{-1} (Fig. 18, painel central). Na primeira década analisada, a tendência de Hs é negativa para os três pontos, enquanto que nas outras duas décadas seguintes elas são positivas, tendo o maior valor de incremento, 1,5cm.ano^{-1} e 1,4cm.ano^{-1}, a segunda década nos pontos 1 e WR, respectivamente. Outra característica encontrada foi que, em 1998, a média de Hs foi a maior nos trinta e dois anos nos três pontos, podendo estar correlacionado ao evento de El Niño de forte intensidade registrado. Como foi verificado por Camilloni & Barros (2000), toda a Bacia do Paraná apresentou neste período grandes anomalias de precipitação. Segundo Grimm *et al.* (1998) a região do sul do Brasil está suscetível a apresentar anomalias de precipitação em períodos de evento de El Niño, com magnitude maior na Argentina e Uruguai. No entanto, não foi realizada nenhuma análise com enfoque nas de anomalias de Hs modeladas durante o período de eventos de El Niño.

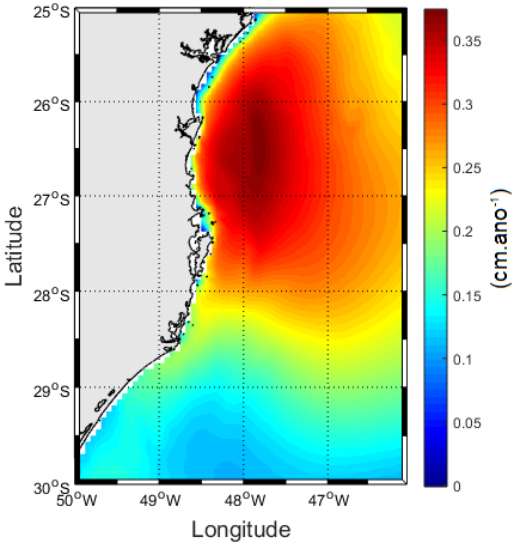
Figura 18. Tendência linear da média anual de Hs nos pontos 1 (26,5°S; 47,8°W), 2 (29,2°S; 48,8°W;) e WR (27,63°S; 48,19°W). Em azul, a tendência analisada ao longo dos 32 anos e em vermelho, a tendência em cada década.



Fonte: a autora.

Foi realizada uma análise de tendência espacial para a região (Fig. 19). Percebe-se, confirmando o que foi analisado na figura anterior, que a porção norte do litoral é a área que está sofrendo os maiores acréscimos na média anual ao longo desses 32 anos analisados, em torno de 0,35cm.ano^{-1}, enquanto que a região sul do estado esse acréscimo é menor ficando próximo a 0,15cm. Esses valores coincidem com a tendência linear que Dalinghaus (2016) encontrou ao analisar 60 anos da saída de um ponto no litoral de Santa Catarina, utilizando a base de dados de ondas da reanálise DOW (*Downscaled Ocean Waves*), construída pelo Sistema de modelagem costeira (SMC) através de simulações executadas com o modelo numérico SWAN (Booij & Hothuijsen, 1999).

Figura 19. Valores da tendência de Hs, emcm.ano^{-1}, ao longo dos trinta e dois anos analisados na grade local.



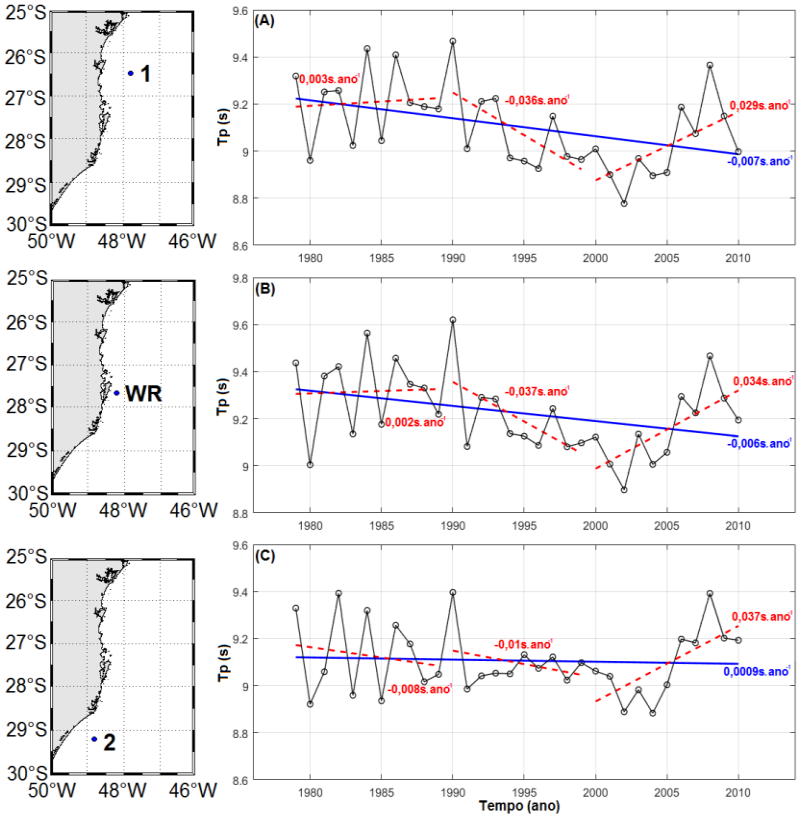
Fonte: a autora.

A figura 20 apresenta a tendência linear da média anual de Tp nos pontos selecionados. Contrastando com Hs, a tendência de Tp gerado pelo modelo está diminuindo cerca de 0,009s.ano^{-1} no sul do estado e 0,007s.ano^{-1} ao norte (Fig. 20, painel superior e inferior, respectivamente). Foram analisadas as tendências de cada década e verificou-se que na década de 1990, em todos os pontos, a propensão de Tp foi de diminuir, ao contrário da década de 2000, que apresentou tendências de crescimento de Tp, sendo a maior delas de 0,037s.ano^{-1} no ponto 2 (Fig. 20, painel inferior) localizado na região sul do estado onde encontramos as maiores ondas da região. Dalinghaus (2016) encontrou uma tendência positiva de Tp, ao analisar um ponto da reanálise DOW no litoral catarinense.

A tendência encontrada em seu trabalho foi de 0,0076s.ano^{-1}, no período de 1948 a 2008. Porém, deve-se ressaltar que tendências para períodos de tempo mais curtos podem ser diferentes das tendências para períodos de tempo maiores. Sendo assim, uma comparação direta entre os diferentes resultados encontrados pode não ser a melhor forma de análise, uma vez que a série temporal de Dalinghaus (2016) apresenta 40 anos a mais do que a utilizada aqui neste trabalho. Acredita-se que este resultado

encontrado, de tendência negativa, está correlacionado com o tamanho da série temporal, de apenas 32 anos. Outro motivo pode estar relacionado com o fato de que a reanálise CFSR, a partir do ano de 1993 foram incluiu dados de um sensor especial "*Microwave Imager*" (SSM/I) (Saha et al., 2010) melhorando os dados de observações de ventos superficiais. No trabalho de Chawla et al., 2013) encontrou-se que a reanálise CFSR no tempo que antecede 1993 superestima os ventos mais intensos no Hemisfério Sul, podendo interferir no padrão de ondas gerados pelo WW3.

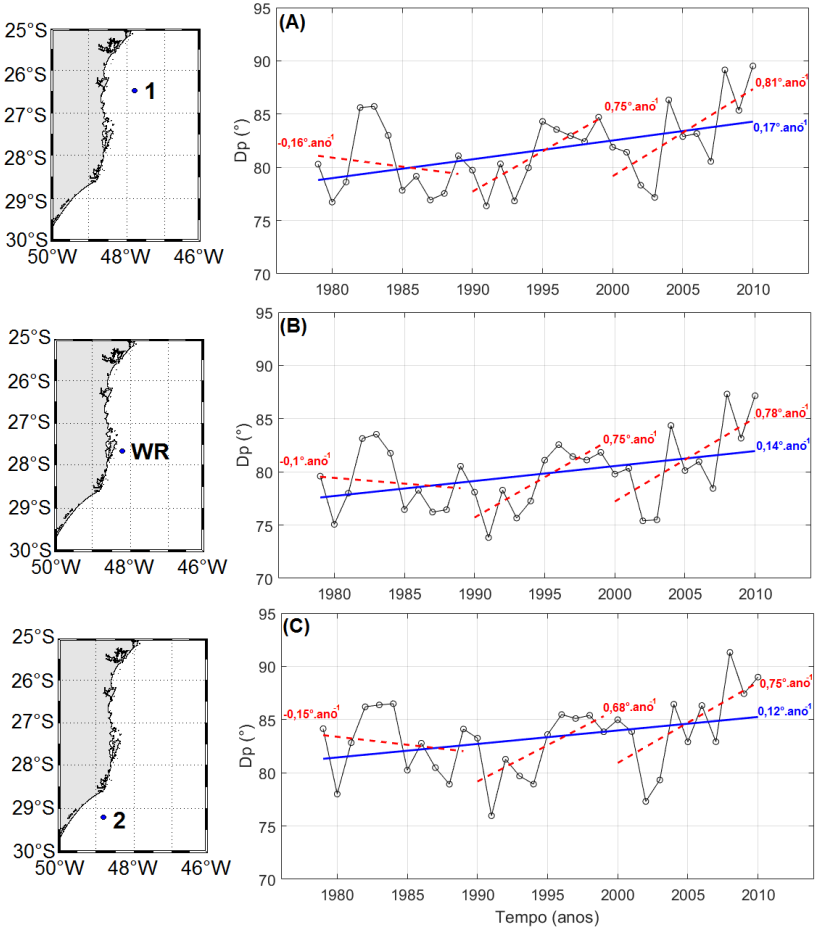
Figura 20. Tendência linear da média anual de Tp nos pontos 1 (26,5°S; 47,8°W), 2 (29,2°S; 48,8°W;) e WR (27,63°S; 48,19°W). Em azul, a tendência analisada ao longo dos 32 anos e em vermelho, a tendência em cada década.



Fonte: a autora.

Na figura 21 observa-se a tendência linear de θp encontrada para os três pontos analisados (ponto 1, WR e 2). Observa-se que nos três pontos a tendência anual (em azul) encontrada é positiva, indicando que θp está variando no sentido horário, ou seja, para sudeste, ao longo dos anos no litoral de Santa Catarina. Corroborando com os resultados encontrados em Reguero *et al.* (2013) que mostram 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 (CEPAL, 2015). Já as tendências encontradas em cada década (em vermelho) indica que na primeira década é a única que o período que apresenta uma tendência de θp no sentido anti-horário, ou seja, negativa, as outras duas (década de 1990 e década de 2000) apresentam tendências positivas.

Figura 21. Tendência linear da média anual de θp nos pontos 1 (26,5°S; 47,8°W), 2 (29,2°S; 48,8°W;) e WR (27,63°S; 48,19°W). Em azul, a tendência analisada ao longo dos 32 anos e em vermelho, a tendência em cada década.



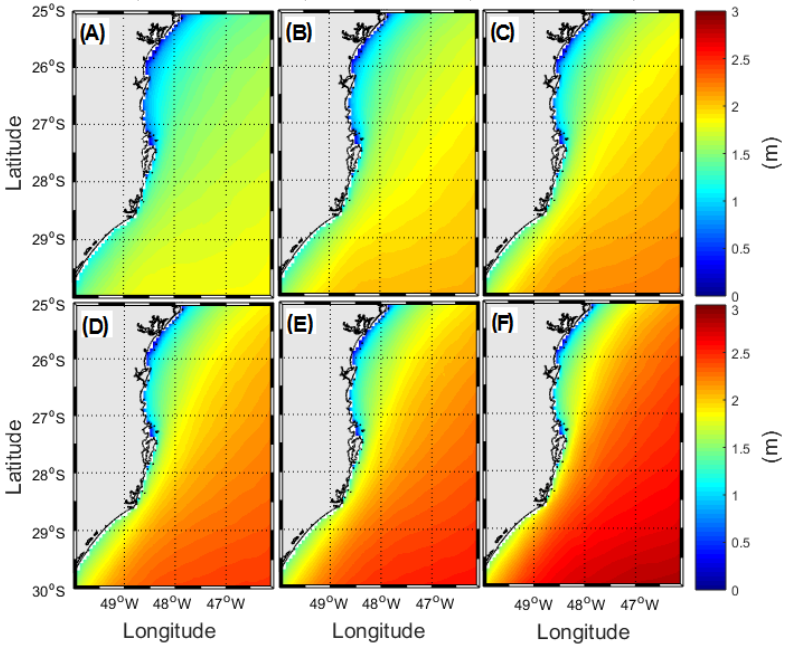
Fonte: a autora.

3.2.4 Percentis do clima de ondas

Na figura 22, temos representados os percentis para Hs gerado pelo modelo WW3. Os percentis organizam o conjunto de dados de forma crescente e o divide em cem partes iguais. A região da plataforma interna ao noroeste da grade é uma região que apresenta os menores valores de Hs, sendo que próximo à costa os valores não ultrapassam de 1,5m em

todas as parcelas (Fig. 22 A até a Fig. 22F). No percentil 10 (Fig. 22A) verifica-se que cerca de 10% do tempo as médias de Hs em todo o domínio são menores ou iguais aos valores encontrados, sendo que não foi encontrado nenhum valor superior à 2m, ou seja, em 10% do tempo s médias de Hs não ultrapassam a 2m no domínio estudado. A área mais energética está localizada na região oceânica à sudeste. Na figura 22D observa-se que a região sudoeste da plataforma interna apresenta valores iguais ou superiores 30% do tempo. Existe um aumento gradual ao longo das parcelas dos percentis, do menor ao maior, chegando a uma situação em que 5% do tempo valores de Hs são superiores ou iguais a 3m na porção sudeste em águas profundas (Fig. 22F).

Figura 22. Percentis de altura significativa de onda (Hs). A) Percentil 10, B) Percentil 30, C) Percentil 50, D) Percentil 70, E) Percentil 80, F) Percentil 95.

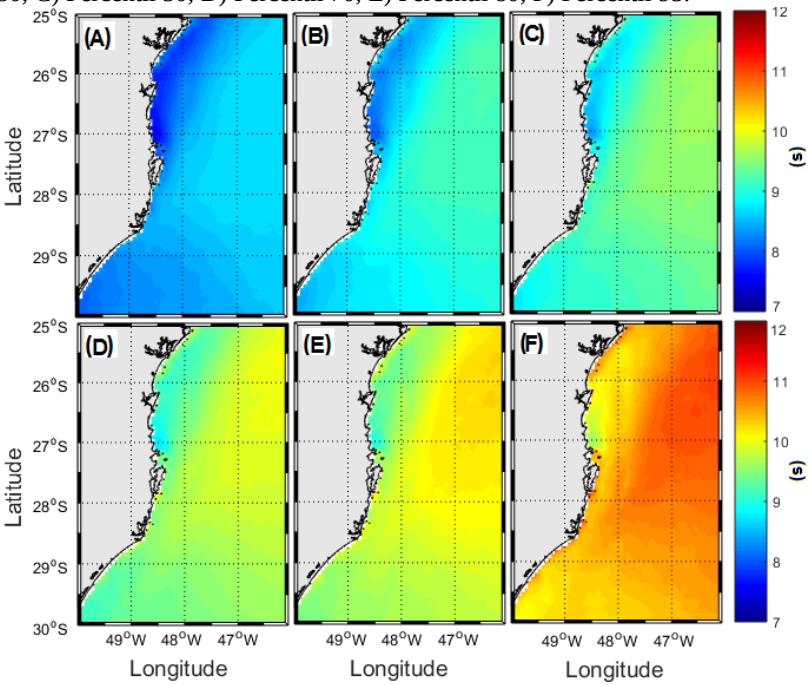


Fonte: a autora.

Já para os percentis do período de pico (Tp), se observa que no percentil 10 (Fig. 23A) observa-se que em toda a região apresenta valores próximos a 8s, indicando que em 90% do tempo Tp são iguais ou superiores a esses valores. Na plataforma interna, a noroeste do domínio, Tp permanece próximo a 8s em 50% do tempo (Fig. 23C). Os valores de

Tp vão aumentando gradualmente nas parcelas, do percentil 10 ao percentil 95, na direção de nordeste para sudoeste. A partir da figura 23D, no percentil 70, encontramos valores iguais e superiores a 10s cerca de 30% do tempo enquanto que na figura 23F encontra-se e valores entre 11s e 12s em 5% do tempo na região oceânica localizada a nordeste da grade de estudo.

Figura 23. Percentis de período de pico de onda (Tp). A) Percentil 10, B) Percentil 30, C) Percentil 50, D) Percentil 70, E) Percentil 80, F) Percentil 95.



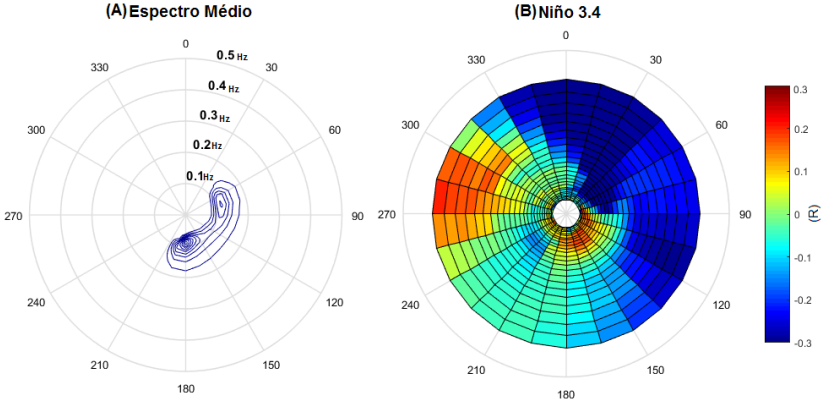
Fonte: a autora.

3.2.5 Índices climático e espectro direcional

Na busca de se comprovar que os índices climáticos possuem influência no clima de ondas da região, foi realizada a correlação da variabilidade do espectro direcional no ponto escolhido (WR) e os índices climáticos no período de 1997 a 2010. Na figura 24 temos representado o valor médio dos espectros direcionais e a correlação dos espectros modelados com o índice Nino 3.4. Nesta figura, nota-se que o espectro foi divido em vinte e quatro direções e vinte e cinco frequências, de 0 a 0,5Hz. No centro da figura são representadas as menores frequências e nas extremidades as altas frequências. Nota-se que o espectro médio (Fig. 24A) se encontra entre as direções nordeste e sul, não ultrapassando a 0,2Hz. Ao analisar esta correlação observou-se que existe uma relação negativa de acima de -0,3 (Fig. 24B) nos espectros de alta frequência que variam nas direções de 345° a 45° (direção norte), sendo que no processamento desta análise foi encontrado nessas direções o valor máximo de correlação de -0,55 indicando uma relação entre o índice Nino 3.4 e o Atlântico sul, principalmente em ondas com espectros direcionais na direção norte.

Reguero *et al.*, (2013) não encontraram relação aparente no clima de ondas do Atlântico Sul com os índices de Niño 3 e SOI analisando Hs e θ gerados pelo modelo WW3 a partir da reanalise NCEP-NCAR da NOAA. Dalinghaus (2016) também não obteve esta relação realizando a correlação linear entre Hs, Tp e Fluxo de energia das ondas da base de dados DOW-SMC, encontrando valores estatisticamente não significativos. No entanto, ao analisar a variabilidade do fluxo de energia e o fluxo de energia direcional das ondas durante os períodos mais fortes de El Niño e La Niña, a autora encontrou boas correlações, como observado durante o evento de La Niña em 1999 e 2000, com correlação de 0,8, utilizando o fluxo de energia direcional.

Figura 24. A) Espectro direcional médio no período de 1997 a 2010 e B) rosa de correlação dos espectros direcionais fracionada em vinte e cinco níveis de frequência em cada direção. Em cada direção e faixa de frequência está representado a correlação com o índice climático Nino 3.4.

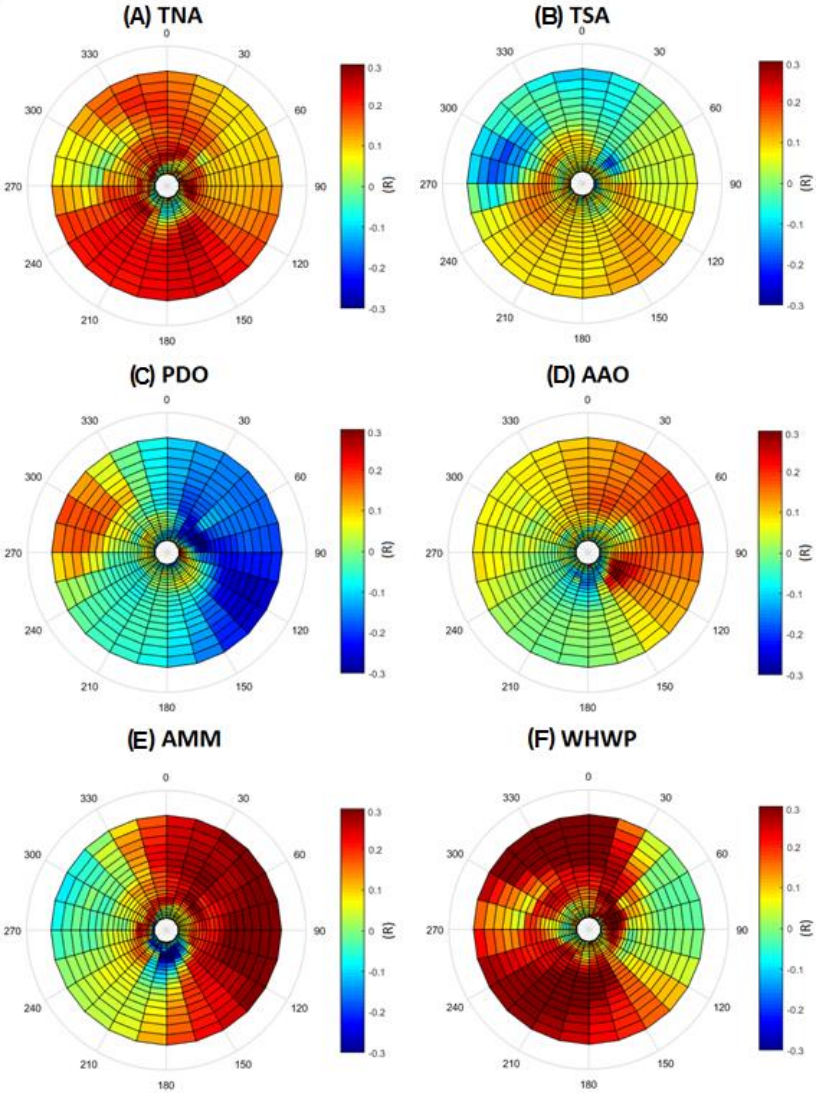


Fonte: a autora.

Na figura 25 tem-se a correlação dos espectros direcionais com os demais índices climáticos utilizados neste trabalho (TNA, TSA, PDO, AAO, AMM e WHWP). Notou-se que embora TNA e TSA (Fig. 24A e 24B, respectivamente) possuam características importantes na variabilidade do Atlântico Sul, TSA não apresentou valores maiores de 0,2 das frequências dos espectros direcionais, enquanto TNA apresentou correlação de 0,26 nos espectros entre as direções de 150° e 180°, indicando que no período analisado esses índices não tiveram tanta influência nos espectros direcionais. Por sua vez no índice PDO (Fig. 25C) foi encontrado relações negativas variando entre valores próximos a -0,3 com os espectros de maiores frequências na direção sudeste e com os espectros na direção nordeste, porém em uma frequência menor, enquanto que AAO (Fig. 25D) apresentou uma correlação baixa, sendo a maior de 0,23 em algumas faixas de baixa frequência entre as direções de 105° e 135°. Campos (2009) encontrou correlação dos índices PDO e AAO com os eventos extremos de altura significativa máxima na Bacia de Campos, apontando que principalmente AAO possui grande correlação com esses eventos e que os valores positivos de AAO tendem a aumentar os casos de ondas geradas por ciclones. O mesmo foi encontrado para PDO, mas com menor intensidade.

Por fim, as maiores correlações positivas encontradas foram nos índices AMM e WHWP (Fig. 25E e 25F, respectivamente) de 0,34 e 0,44, respectivamente, associando uma relação entre o clima de ondas do Atlântico Sul com as anomalias de TSM na região tropical (Pacífico Tropical Leste e Atlântico Tropical), isto pode ser explicado pelo transporte atmosférico de temperatura que pode alterar a posição da formação de anticiclones e ciclones na atmosfera. Em WHPH observou-se que os espectros de frequência média e alta, na direção noroeste e sudoeste, apresentam as maiores correlações, no entanto verifica-se que na direção nordeste os espectros de baixa frequência apresentaram correlações de 0,30. Ao analisar a correlação com o índice AMM verificou-se que as maiores correlações ocorrem entre as direções nordeste e sudeste, sendo que AMM também apresentou correlação negativa de -0,35 nos espectros de direção sul de baixa frequência.

Figura 25. Rosa de correlação dos es de espectros direcionais fracionada em vinte e cinco níveis de frequência de 0 a 0,5Hz em cada direção (0 Hz localizado ao centro da rosa e 0,5Hz localizado na extermina). Em cada direção e faixa de frequência está representado a correlação com o índice climático. A) TNA, B) TSA, C) PDO, D) AAO, E) AMM, F) WHWP.



4 Conclusões

Este estudo analisou ao longo de três décadas o clima de ondas na região oceânica do estado de Santa Catarina e verificou que no sul catarinense as ondas possuem Hs superiores à região norte do estado, possivelmente devido à região ser controlada pelos ciclones associados às frentes frias e anticiclones provenientes da zona Polar.

No verão as ondas apresentam valores médios de Hs e Tp menores do que nas outras estações, não ultrapassando de 2m e 9,5s, respectivamente, sendo fevereiro o mês que apresenta as menores médias de Hs e Tp. Já para o inverno constatou-se médias de Hs superiores a 2,5m entrando na região sul na porção oceânica e as maiores médias de Tp, excedendo os 10s, na região oceânica norte. Enquanto isso, na costa os valores ficam em 9,5s, e as maiores médias são encontradas no mês de maio. Já na primavera Hs na região próxima à costa encontrou médias superiores as outras estações, na região sul por exemplo, há médias de 1,5m. Essa variabilidade está diretamente associada a frequência sazonal de ciclogênese no Atlântico Sudoeste, segundo a literatura, é maior na estação do inverno e menor no verão. Além disso, no mês de maio que foi o mais energético nos resultados possui maior frequência de ciclogênese comparado com os demais meses.

Observou-se que o clima de ondas vem sofrendo alterações temporais e espaciais consideráveis, principalmente Hs, que apresentou a tendência de aumentar até 0,37cm.ano^{-1} na porção norte do litoral e 0,15cm.ano^{-1} na porção sul, de forma que, neste contexto, o litoral de Santa Catarina está mais suscetível a sofrer as maiores alterações na região costeira norte. Foi encontrado uma propensão de θp estar se alterando no sentido horário, sendo essa tendência maior também na porção norte do estado de Santa Catarina. Porém, embora tenha-se verificado a tendência de acréscimo nos valores de Hs no período analisado, é válido ressaltar que a propagação que ocorre em águas rasas não foi considerada neste estudo. Portanto, processos como reflexão, refração, difração e empinamento das ondas não entraram nesta análise. Desta maneira as ondas chegam às praias com características diferentes das encontradas em ondas de águas profundas, que neste trabalho, são melhores representadas.

Foi utilizado o método de FOEs para analisar a variabilidade anual e mensal da área de estudo, constatando que o principal modo de variabilidade de Hs indica um gradiente da energia de onda de noroeste para sudeste, onde as maiores ondas se encontram no oceano aberto e podem estar correlacionados com as localizações de áreas de ciclogênese.

Além disso, evidenciou a atenuação da energia de onda na plataforma continental, reduzindo gradualmente Hs em direção ao continente. Já o principal modo de variabilidade de Tp demonstrou um gradiente em que ocorre um aumento na direção sudoeste para nordeste, sendo esta a trajetória típica do deslocamento dos sistemas frontais ao longo do litoral sul e sudeste do Brasil.

Os resultados obtidos com a correlação dos índices climáticos e os espectros direcionas evidenciaram que existe uma influência na região pelas variações no clima que ocorrem no Atlântico tropical e Pacífico tropical. Porém, as correlações encontradas foram relativamente fracas, podendo estar associado ao fato que neste trabalho não foi verificado a variabilidade dos números de eventos extremos de ondas com os índices climáticos, mas sim correlações com o modo de variabilidade das variáveis e os espectros direcionais durante o período estudado, contrastando com outros autores que encontraram alta correlação dos índices climáticos através da variabilidade do número de eventos extremos (de precipitação e de ondas, por exemplo). Mas deve-se ressaltar que esta análise de correlação reflete a possível influência de determinados índices climáticos, mas não explica de que modo e as razões de como esta influência ocorre.

As relações mais significativas foram encontradas no El Niño 3.4 que apresentou relação negativa de -0,55 nos espectros de alta frequência na direção norte. Este índice apresentou quatro correlações estatisticamente significativas com os cinco modos de variabilidade encontrados em Hs e Tp, seguidos pelo os índices de TNA, AMM e PDO que apresentaram três correlações estatisticamente significativas. Em AMM verificou-se correlação positiva de 0,34 nos espectros de alta frequência nas direções nordeste e sudeste e negativa de -0,35 nos espectros de baixa frequência na direção sul. Enquanto que o índice WHWP, apresentou correlação positiva de até 0,44 nos espectros de média e alta frequência nas direções de noroeste e sudoeste, e correlações superiores a 0,30 na direção nordeste com frequência baixa.

Referências Bibliográficas

Araújo, C. E., Franco, D., Melo, E., & Pimenta, F. 2003. Wave regime characteristics of the southern Brazilian coast. *In Proceedings of the sixth international conference on coastal and port engineering in developing countries,* COPEDEC VI, Colombo, Sri Lanka, *Paper* (No. 097, p. 15).

Bacon, S., & Carter, D. J. T. 1993. A connection between mean wave height and atmospheric pressure gradient in the North Atlantic. *International Journal of Climatology*, *13*(4), 423-436.

Bertin, X., Prouteau, E., & Letetrel, C. 2013. A significant increase in wave height in the North Atlantic Ocean over the 20th century. *Global and Planetary Change*, *106*, 77-83.

Booij, N., Ris, R. C., & Holthuijsen, L. H. 1999. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of geophysical research: Oceans*, *104*(C4), 7649-7666.

Cai, W. 2006. Antarctic ozone depletion causes an intensification of the Southern Ocean super-gyre circulation. *Geophysical Research Letters*, *33*(3).

Camilloni, I., & Barros, V. 2000. The Parana river response to El Niño 1982–83 and 1997–98 events. *Journal of Hydrometeorology*, *1*(5), 412-430.

Campos, R.M. 2009. *Análise dos extremos de onda no Rio de Janeiro associados a ciclones extratropicais no Atlântico Sul. 2009*. Rio de Janeiro, 241p. Dissertação de Mestrado, Mestrado em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

CEPAL, N. U. et al. 2015. Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe: dinámicas, tendencias y variabilidad climática.

Chawla, A., Spindler, D.m., & Tolman, H. L. 2013. Validation of a thirty year wave hindcast using the Climate Forecast System Reanalysis winds. *Ocean Modelling*, *70*, 189-206.

Chiang, J. C., & Vimont, D. J. 2004. Analogous Pacific and Atlantic meridional modes of tropical atmosphere–ocean variability. *Journal of Climate*, *17*(21), 4143-4158.

Chiew, F. H., Piechota, T. C., Dracup, J. A., & McMahon, T. A. 1998. El Niño/Southern Oscillation and Australian rainfall, streamflow and drought: Links and potential for forecasting. *Journal of Hydrology*, *204*(1-4), 138-149.

Dalinghaus, Charline. 2016. A*nálise da estabilidade da forma em planta e perfil nas praias da barra da lagoa, moçambique e ingleses, Florianópolis - SC: aplicações em análise de perigos costeiros***.** Florianópolis, 189p. Dissertação de mestrado, Programa de

Pós-Graduação em Geografia, Centro de Filosofia e Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina.

Dodet, G., Bertin, X., & Taborda, R. 2010. Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades. *Ocean modelling*, *31*(3), 120-131.

Enfield, D. B., Mestas-Nuñez, A.m., Mayer, D. A., & Cid-Serrano, L. 1999. How ubiquitous is the dipole relationship in tropical Atlantic sea surface temperatures? *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *104*(C4), 7841-7848.

Franco, D., & MELO, F. E. 2008. Relevância dos mares secundários na caracterização do regime de ondas ao largo da Ilha de Santa Catarina, SC (2002-2005). In *Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica. Rio Grande, Brasil. SEMENGO III.* Disponível em*: <http://www.semengo.furg.br/index.php/historico>* Acesso em 20 abr.2017.

GAN, M. A.; RAO, V. B. 1991. Surface cyclogenesis over South America. *Monthly Weather Review*, v. 119, n. 5, p. 1293-1302.

Gille,s. T. 2002. Warming of the Southern Ocean since the 1950s. *Science*, *295*(5558), 1275-1277.

Grimm, A.m., Ferraz,s. E., & Gomes, J. 1998. Precipitation anomalies in southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. *Journal of climate*, *11*(11), 2863-2880.

Grimm, A.m., & Tedeschi, R. G. 2009. ENSO and extreme rainfall events in South America. *Journal of Climate*, *22*(7), 1589-1609.

Gong, D., & Wang,s. 1999. Definition of Antarctic oscillation index. *Geophysical research letters*, *26*(4), 459-462.

Hemer,m. A., McInnes, K. L., & Ranasinghe, R. 2013. Projections of climate change-driven variations in the offshore wave climate off south eastern Australia. *International Journal of Climatology*, *33*(7), 1615-1632.

Inman, D. L., & Masters, P.m. 1994. Status of research on the nearshore. *Shore and Beach*, *62*(3), 11-20.

Komen, G. J., Cavaleri, L., Donelan,m., Hasselmann, K., Hasselmann,s., & Janssen, P. A. E.m. 1996. *Dynamics and modelling of ocean waves*. Cambridge university press.

Mantua, N. J & Hare,s. R. 2002. The Pacific Decadal Oscillation. *Journal of Oceanograph,* 58: 35. doi: 10.1023/A:1015820616384

Melo Filho, E., Hammes, G. R., & Franco, D. 2006. Estudo de caso: a ressaca de agosto de 2005 em Santa Catarina.

Melo Filho, E., Hammes, G. R., Franco, D., & Romeu,m. A. R. 2008. Avaliação de desempenho do modelo WW3 em Santa Catarina.

Monteiro,m. A., & de Arruda Furtado,s.m. 1995. O clima do Trecho Florianópolis-Porto Alegre: uma abordagem dinâmica. *Geosul*, (19), 117-133.

Perez, J., Menendez,m., Camus, P., Mendez, F. J., & Losada, I. J. 2015. Statistical multi-model climate projections of surface ocean waves in Europe. *Ocean Modelling*, *96*, 161-170.

Pianca, C., Mazzini, P. L. F., & Siegle, E. 2010. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. *Brazilian Journal of Oceanography*, *58*(1), 53-70.

Reguero, B. G., Méndez, F. J., & Losada, I. J. 2013. Variability of multivariate wave climate in Latin America and the Caribbean. *Global and Planetary Change*, *100*, 70-84.

Rodrigues,m. L. G., Franco, D., & Sugahara,s. 2004. Climatologia de frentes frias no litoral de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Geofísica*, *22*(2), 135-151.

Saha,s., Moorthi,s., Pan, H. L., Wu, X., Wang, J., Nadiga,s., ... & Liu, H. 2010. The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *91*(8), 1015-1057.

Silva, P. G., Klein, A. H., González,m., Gutierrez, O., & Espejo, A. 2015. Performance assessment of the database downscaled ocean waves (DOW) on Santa Catarina coast, South Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, *87*(2), 623-634.

Stopa, J. E., & Cheung, K. F. 2014. Intercomparison of wind and wave data from the ECMWF Reanalysis Interim and the NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Ocean Modelling*, *75*, 65-83.

Thompson, D. W., & Wallace, J.m. (2000). Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. *Journal of climate*, *13*(5), 1000-1016.

Tolman, H. L. 1989. The numerical model {WAVEWATCH}: a third generation model for hindcasting of wind waves on tides in shelf seas.

Tolman, H. L. 1991a. A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady, and inhomogeneous depths and currents. *Journal of Physical Oceanography*, *21*(6), 782-797.

Tolman, H. L. 1992. Effects of numerics on the physics in a third-generation wind-wave model. *Journal of physical Oceanography*, *22*(10), 1095-1111.

Tolman, H. L. 1997. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.15. *Technical note*, *16*.

Tolman, H. L, 1999a. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18. NOAA / NWS / NCEP / OMB Technical Note 166, 110 pp.

Tolman, H. L. 2014. User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III version 4.18. *The WAVEWATCH III Development Group (2014). Tech. Note 316, NOAA/NWS/NCEP/MMAB.*

Trenberth, K. E. & Stepaniak, D. P. 2001. Indices of El Niño Evolution. *Journal of Climate*, v. 14, p. 1697-1701.

Wang, X. L., & Swail, V. R. 2002. Trends of Atlantic wave extremes as simulated in a 40-yr wave hindcast using kinematically reanalyzed wind fields. *Journal of climate*, *15*(9), 1020-1035.

Waters, R., Engström, J., Isberg, J., & Leijon,m. 2009. Wave climate off the Swedish west coast. *Renewable Energy*, *34*(6), 1600-1606.

Wamdig. 1988. The WAM model - A third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography*, *18*(12), 1775-1810.

4 TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho realizou a análise do clima de ondas de Santa Catarina e a sua variabilidade ao longo das últimas três décadas, contudo alguns processos foram simplificados e, por isso, sugerem-se alguns itens para serem abordados em trabalhos futuros visando a continuidade do trabalho e conhecimentos importantes para a área de estudo. Por exemplo:

- Realizar uma análise dos dados envolvendo os campos de pressão atmosférico e direções do campo de ondas da região. Outra análise que pode ser feita é em relação a variabilidade dos eventos extremos de ondas, pois as alterações climáticas, como já é abordado na literatura, não afetam somente o clima de ondas, mas também o número de eventos extremos, principalmente em Santa Catarina que é um estado brasileiro bastante conhecido pela quantidade de ocorrência desses eventos. Estas análises são cruciais para a concepção de infraestruturas costeiras e offshore, navegação e gestão costeira. Do ponto de vista ambiental, os eventos de ondas extremas também são importantes para alguns processos naturais, como o transporte de sedimentos litorais para a sobrevivência de determinados ecossistemas costeiros.

- Os modelos de reanálise apresentam imprecisões, principalmente relacionado a descrição dos dados de vento. Por isso sugere-se que seja aplicado um método de calibração nos dados afim de corrigir e aumentar a qualidade do produto obtido pelo modelo. Para isso pode se utilizar os dados de altimetria de satélites, que têm sido usados para tal aplicação, os dados de altimetria são valores que se relacionam com o nível do mar, possibilitando determinar a altura das ondas. Esses dados são orbitais, tendo entre 10 e 15 dias para passar duas vezes no mesmo ponto.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação teve como objetivo analisar as mudanças do clima de ondas do litoral de Santa Catarina nas últimas décadas através do modelo WW3. Para cumprir o objetivo foi realizado a implementação do modelo de ondas WW3 na região, a partir de dados de ventos da reanálise CFSR. Com intuito de obter dados com uma boa resolução, foram realizados dois *downscalling*, o primeiro ocorreu da grade global (resolução de 1/2°) para a grade regional de domínio no Atlântico Sul e com resolução de 1/4°. O segundo *downscalling* ocorreu da grade regional para a grade local, com resolução de 1/16°, aproximadamente 6km.

A partir disto foram obtidos dados de ondas no período de 1979 a 2010 que possibilitou compreender o clima de ondas da região e a sua variabilidade ao longo do tempo, como por exemplo, que o sul catarinense as ondas possuem Hs superiores a região norte do estado, caracterizado possivelmente pela batimetria da região, que no norte do estado a plataforma interna é mais extensa do que no sul, e também, devido à região ser controlada pelos ciclones associados a frentes frias e anticiclones provenientes da zona Polar.

O verão é a estação que as ondas apresentam valores médios de Hs e Tp em uma magnitude menor do que nas outras estações, sendo fevereiro o mês que apresenta as menores médias de Hs e Tp durante todo o ano. Enquanto que no inverno constatou-se ser a estação mais energética, com as maiores médias de Hs e Tp. Observou-se que o clima de ondas vem sofrendo alterações consideráveis ao longo do tempo e espacialmente, principalmente Hs, que apresentou a tendência de aumentar até 0,37cm.ano^{-1} na porção norte do litoral e 0,15cm.ano^{-1} na porção sul, de forma que, neste contexto, o litoral de Santa Catarina está mais suscetível a sofrer as maiores alterações na região do litoral norte.

Foi utilizado o método de FOEs para analisar a variabilidade anual e mensal da área de estudo. Verificou-se que o principal modo de variabilidade de Hs indica um gradiente da energia de onda de noroeste para sudeste, onde as maiores ondas se encontram no oceano aberto e podem ser resultado das ondas produzidas pelas frentes e anticiclones subtropicais. Além disso, evidenciou a atenuação da energia de onda na plataforma continental, reduzindo gradualmente Hs em direção ao continente. Já o principal modo de variabilidade de Tp demonstrou um gradiente em que ocorre um aumento na direção sudoeste para nordeste, sendo esta a trajetória típica do deslocamento dos sistemas frontais ao longo do litoral sul e sudeste do Brasil.

Finalmente, a correlação dos índices climáticos e com os espectros direcionas e modos de variabilidade de Hs e Tp evidenciaram que existe uma influência na região pelas variações no clima que ocorrem no Atlântico tropical e Pacífico tropical, ressaltando que realmente há uma ligação entre a dinâmica oceânica e atmosférica. As relações mais significativas foram encontradas no El Niño 3.4 que apresentou relação negativa de -0,55 nos espectros de alta frequência na direção norte. Este índice apresentou quatro correlações estatisticamente significativas com os cinco modos de variabilidade encontrados em Hs e Tp, seguidos pelo os índices de TNA, AMM e PDO que apresentaram três correlações estatisticamente significativas. Em AMM verificou-se correlação positiva de 0,34 nos espectros de alta frequência nas direções nordeste e sudeste e negativa de -0,35 nos espectros de baixa frequência na direção sul. Enquanto que o índice WHWP, apresentou correlação positiva de até 0,44 nos espectros de média e alta frequência nas direções de noroeste e sudoeste, e correlações superiores a 0,30 na direção nordeste com frequência baixa.

6 REFERÊNCIAS

ALVES, J.H.G.M. **Refração do Espectro de Ondas Oceânica em Águas Rasas: Aplicações à Região Costeira de São Francisco do Sul**, SC. 1996. 89p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1996.

AMANTE, C.; EAKINS, B.W. **ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis.** NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, Boulder, Colorado, 2009.

ARAUJO, C.E.S.; FRANCO, D.; MELO, E.; PIMENTA, F.M. **Wave Regime Characteristcs of the Southern Brazilian Coast**: In: COPEDEC VI, Colombo Proceedings & Book of Abstracts, Colombro, Sri Lanka, 2003, CD press, 2003.

CAI, W. **Antarctic ozone depletion causes an intensification of the Southern Ocean super-gyre circulation**. Geophysical Research Letters, v.33, p. L03712, 2006.

CANDELLA, R. N.; SOUZA, S.M.L. **Ondas oceânicas extremas na costa sul-sudeste brasileira geradas por ciclone com trajetória anormal em maio de 2011**. Revista Brasileira de Meteorologia, v.28, n°4, p. 441-456, 2013.

CARUSO JR., F. **Mapa geológico da Ilha de Santa Catarina – Escala 1: 100.000**. Texto explicativo. Notas Técnicas, v. 6, p. 1-28, 1993.

CEPAL, N. U. et al. Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe: dinámicas, tendencias y variabilidad climática. 2015.

CHAWLA, A.; SPINDLER, D..; TOLMAN, H.L. Validation of a thirty year wave hindcast using the Climate Forecast System Reanalysis winds. **Ocean Modelling**, v. 70, p. 189-206, 2013.

CHIANG, J.C.H; VIMONT, D.J. Analogous Pacific and Atlantic meridional modes of tropical atmosphere-ocean variability*. **Journal of Climate**, v. 17, n. 21, p. 4143-4158, 2004.

DRAGANI, W. C. *et al*. Are wind wave heights increasing in south-eastern south American continental shelf between 32°s and 40° S?. **Continental Shelf Research**, v. 30, n. 5, p. 481-490, 2010.

ENFIELD, D.B. *et al*. How ubiquitous is the dipole relationship in tropical Atlantic sea surface temperatures?. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 104, n. C4, p. 7841-7848, 1999.

FRANCO, D.; MELO FILHO, E. **Relevância dos mares secundários na caracterização do regime de ondas ao largo da Ilha de Santa Catarina-SC (2002-2005)**. In: III Seminário e workshop em Engenharia Oceânica, Rio Grande (RS), Anais III Seminário e workshop em Engenharia Oceânica, Rio Grande, 2008.

GAN, Manoel Alonso; RAO, Vadlamudi Brahmananda. Surface cyclogenesis over South America. **Monthly Weather Review**, v. 119, n. 5, p. 1293-1302, 1991.

GILLE, S. T. **Warming of the Southern Ocean since the 1950s**. Science, v. 295, p. 1275–1277, 2002.

GONÇALVES, A.; OLIVEIRA, M.A.M & MOTTA, S.O. **Geologia da Bacia de Pelotas e Plataforma de Florianópolis.** Boletim Técnico da PETROBRAS, v. 22(3), p. 157- 174, 1979.

GONG, D. & WANG, S. Definition of Antarctic oscillation index. **Geophysical Research Letters**, v. 26, n. 4, p. 459-462, 1999.

HEMER, M. A.; MCINNES, K. L.; RANASINGHE, Roshanka. Projections of climate change-driven variations in the offshore wave climate off south eastern Australia. **International Journal of Climatology**, v. 33, n. 7, p. 1615-1632, 2013.

INMAN, D. L.; MASTERS, P.m. **Status of research on the nearshore**. Shore and beach, p. 11-20, 1994.

JEFFREYS, H. **On the formation of water waves by wind.** Proc. Roy.Soc, London, Series A, v. 107, p. 189-206, 1925.

LORENZ, Edward N. Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction. 1956.

KALNAY, E. *et al*. **The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bulletin of the American meteorological** Society, v. 77, n. 3, p. 437-471, 1996.

KOMAR, P. D. **Beach processes and sedimentation**. 2 Edição. New Jersey: Prentice Hall, 544 p, 1998.

MAHIQUES, M.M. *et al*. The Southern Brazilian shelf: general characteristics, quaternary evolution and sediment distribution.**Brazilian Journal of Oceanography**, v. 58, n. SPE2, p. 25-34, 2010.

MANTUA, N.J.; HARE, S.R. The Pacific Decadal Oscillation. Journal of Oceanography, v.58, p.35-44, 2002.

MELO FILHO, E. & HAMMES, G.R.; FRANCO, D. Estudo de caso: A ressaca de agosto de 2005 em Santa Catarina. In: SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA, 2., 2006, Rio Grande. **Anais**. Rio Grande, 2006.

MIOT DA SILVA, G.; MOUSAVI, S.M.S.; JOSE, F. Wave-driven sediment transport and beach-dune dinamics in a headland bay beach. **Marine Geology**, v. 323-325, p.29-46, 2012.

MONTEIRO, A.M. & FURTADO, S.M. **O clima do trecho Florianópolis – Porto Alegre: uma abordagem dinâmica**. Geosul, v. 9, p. 117-133, 1995.

MORI, N. *et al*. Projection of extreme wave climate change under global warming. **Hydrological Research Letters**, v. 4, p. 15-19, 2010.

NIMER, E. **Climatologia da Região Sul**. Revista Brasileira de Geografia, v. 34(1), p.142-154**,** 1989.

PÉREZ, J. *et al*. ESTELA: a method for evaluating the source and travel time of the wave energy reaching a local area. **Ocean Dynamics**, v. 64, n. 8, p. 1181-1191, 2014.

PEREZ, J. *et al*. Statistical multi-model climate projections of surface ocean waves in Europe. **Ocean Modelling**, v. 96, p. 161-170, 2015.

PIANCA, C.; MAZZINI, P.L.F.; SIEGLE, E. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 58, n. 1, p. 53-70, 2010.

REGUERO, B. G. *et al*. A Global Ocean Wave (GOW) calibrated reanalysis from 1948 onwards. **Coastal Engineering**, v. 65, p. 38-55, 2012.

REGUERO, B. G.; MÉNDEZ, F. J.; LOSADA, I. J. Variability of multivariate wave climate in Latin America and the Caribbean. **Global and Planetary Change**, v. 100, p. 70-84, 2013.

RODRIGUES, M.L.G.; FRANCO, D.; SUGAHARA, S. **Climatologia de frentes frias no litoral de Santa Catarina**. Revista Brasileira de Geofísica, v. 22(2), p. 135-151, 2004.

ROMEU, M. A. R. **Refração-Difração de Ondas: Inclusão de Ilhas por Meio de Áreas de Dissipação de Energia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, p. 87, 2000.

ROMEU, M. A. R. **Método Operacional para Determinação do Estado do Mar Próximo a Costa: Aplicação à Ilha de Santa Catarina**. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, p. 120, 2007.

SAHA, Suranjana *et al*. The NCEP climate forecast system reanalysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 91, n. 8, p. 1015-1057, 2010.

STOPA, J.E.; CHEUNG, K.F. Intercomparison of wind and wave data from the ECMWF Reanalysis Interim and the NCEP Climate Forecast System Reanalysis. **Ocean Modelling**, v. 75, p. 65-83, 2014.

TOLMAN, H.L. & BOOIJ, N. **Modeling Wind Waves Using Wavenumber- direction Spectra and a Variable Wavenumber Grid.** The Global Atmosphere and Ocean System, v.6, p. 295-309, 1998.

TOLMAN, H.L. *et al.* **Development and implementation of wing-generated ocean surface wave models at NCEP.** NCEP Notes: Weather and Forecasting, v. 17, p. 311-333, 2002.

TOLMAN, H.L. *et al.* **User manual and system documentation of WAVEWATCH III, version 4.18.** NOAA Technical Note, Environmental Modeling Center, Marine Modeling and Analysis Branch, 2014.

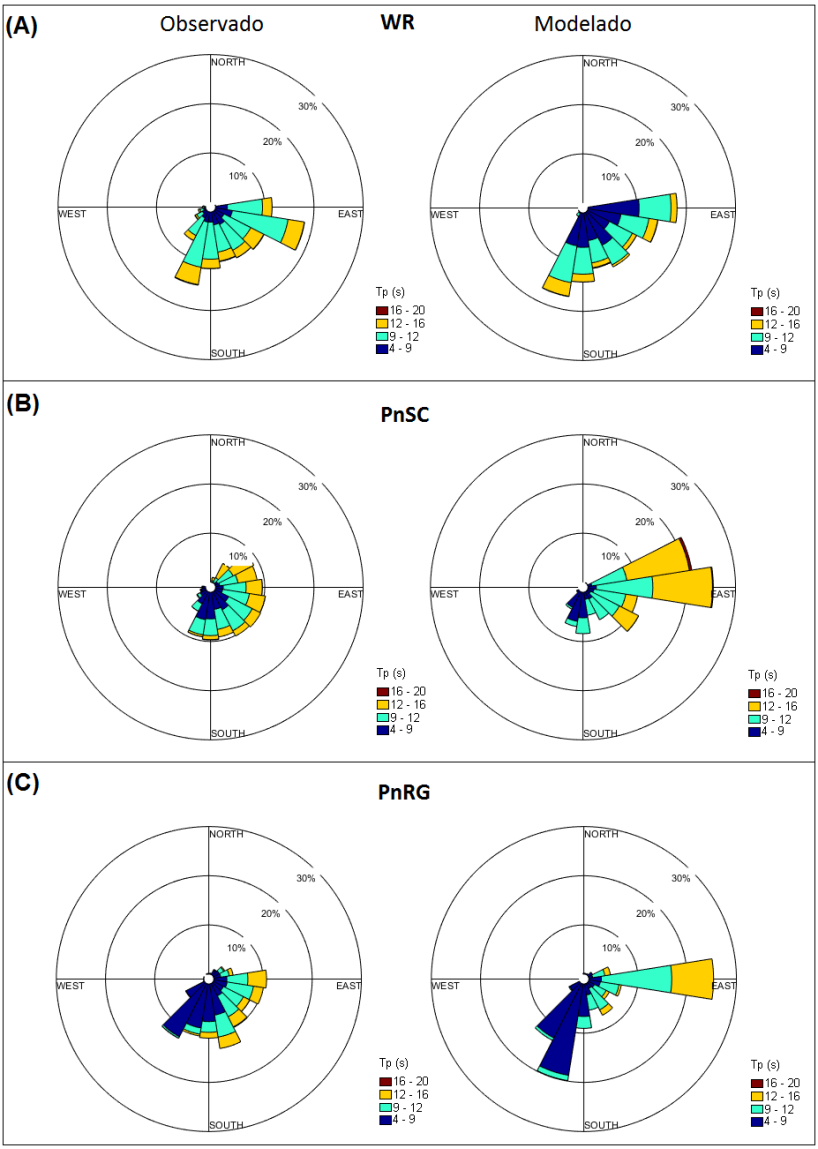
TRENBERTH, K. E. & STEPANIAK, D. P. Indices of El Niño Evolution. **Journal of Climate**, v. 14, p. 1697-1701, 2001.

WANG, C. & ENFIELD, D.B. The tropical Western Hemisphere warm pool. **Geophysical Research Letters**, v. 28, n. 8, p. 1635-1638, 2001.

WATERS, R. *et al*. Wave climate off the Swedish west coast. **Renewable Energy**, v. 34, n. 6, p. 1600-1606, 2009.

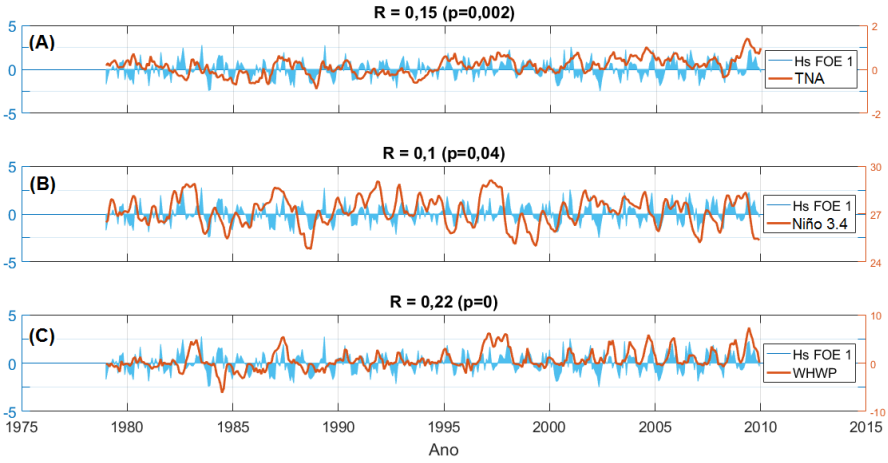
APÊNDICE A

Rosa da direção da onda pelo periodo de pico (Tp), observado e modelado. A) Ponto WR, B) PnSC e C) PnRG.



APÊNDICE B

Figuras das correlações estatisticamente significativas da FOE1 de Hs com os índices climáticos. A) TNA, B) Niño 3.4 e C) WHWP.



Figuras das correlações estatisticamente significativas entre a FOE2 de Hs e os índices climáticos. A) TNA, B) PDO, C) AMM, D) Niño 3.4 e E) AAO.

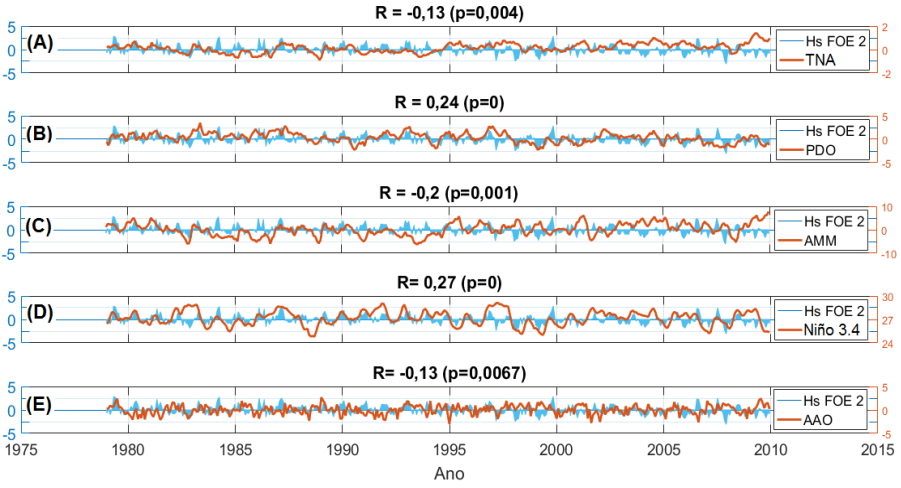
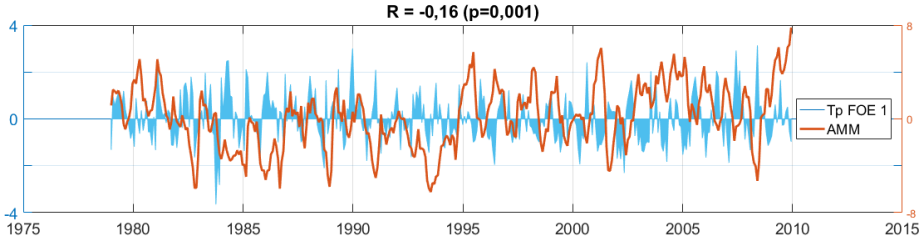
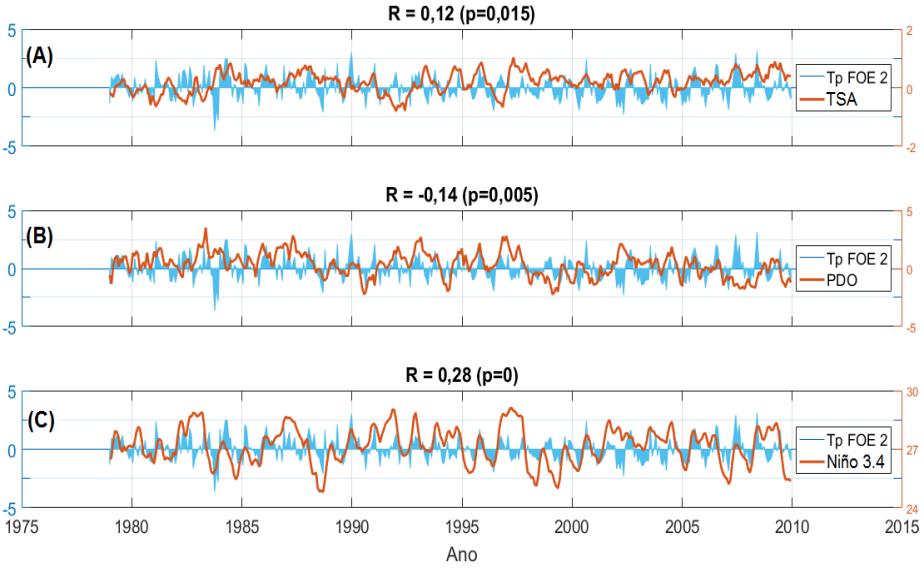
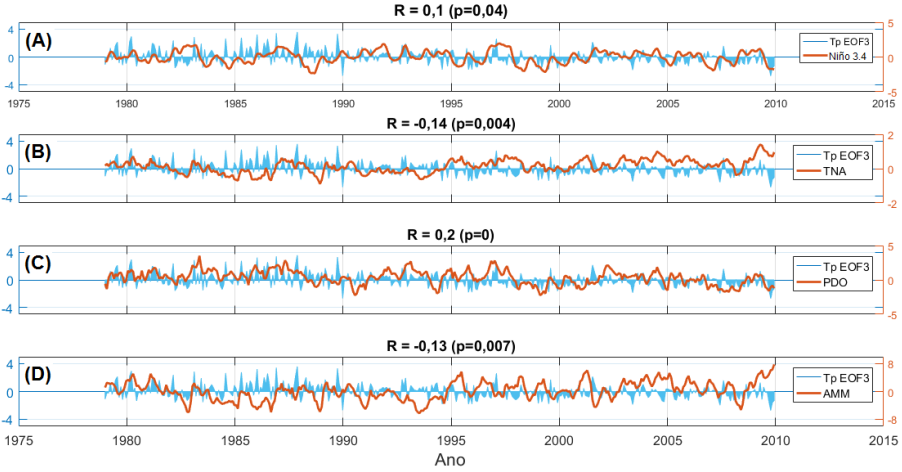


Figura da correlação estatisticamente significativa entre a FOE1 de Tp e o índice climático AMM.



Figuras das correlações estatisticamente significativas entre a FOE2 de Tp e os índices climáticos. A) TSA, B) PDO e C) Niño 3.4.



Figuras das correlações estatisticamente significativas entre a FOE3 de Tp e os índices climáticos. A) Niño 3.4, B) TNA, C) PDO e D) AMM.