



INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CLIMA E AMBIENTE

**APRIMORAMENTO DA PREVISÃO DO NÍVEL DO MAR PARA O LITORAL DE  
SANTA CATARINA ATRAVÉS DE FORÇANTES ATMOSFÉRICAS**

MARINA PAIOTTI DO CANTO

Florianópolis - SC

Agosto/2022

MARINA PAIOTTI DO CANTO

**APRIMORAMENTO DA PREVISÃO DO NÍVEL DO MAR PARA O LITORAL DE  
SANTA CATARINA ATRAVÉS DE FORÇANTES ATMOSFÉRICAS**

Dissertação apresentada ao Mestrado  
Profissional em Clima e Ambiente do  
Campus Florianópolis do Instituto Federal  
de Santa Catarina para a obtenção do  
diploma de Mestre em Clima e Ambiente.  
Orientador: Prof. Dr. Adriano Vitor.  
Coorientador: Prof. Dr. Mário Quadro.

Florianópolis-SC

Agosto de 2022

Aluno (a): **MARINA PAIOTTI DO CANTO**

|                |                                                                                                              |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Título:</b> | APRIMORAMENTO DA PREVISÃO DO NÍVEL DO MAR PARA O LITORAL DE SANTA CATARINA ATRAVÉS DE FORÇANTES ATMOSFÉRICAS |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em Clima e Ambiente**

Dr(a). **ADRIANO VITOR**



Documento assinado digitalmente  
**ADRIANO VITOR**  
Data: 07/11/2022 18:58:48-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

*Orientador(a) / Presidente / IFSC / Florianópolis - SC*

Participação: ( x ) Presencial ( ) Videoconferência  
( x ) *Aprovado* ( ) *Reprovado*

Dr(a). **MICHEL NOBRE MUZA**



Documento assinado digitalmente  
**MICHEL NOBRE MUZA**  
Data: 05/11/2022 07:30:15-0300  
CPF: 977.090.260-87  
Verifique as assinaturas em <https://v.ifsc.edu.br>

*Avaliador(a) Interno / IFSC / Florianópolis - SC*

Participação: ( x ) Presencial ( ) Videoconferência  
( x ) *Aprovado* ( ) *Reprovado*

Dr(a). **THIAGO PEREIRA ALVES**



Documento assinado digitalmente  
**THIAGO PEREIRA ALVES**  
Data: 04/11/2022 15:46:05-0300  
CPF: 031.525.469-63  
Verifique as assinaturas em <https://v.ifsc.edu.br>

*Avaliador(a) Interno / IFSC / Itajaí - SC Participação:*

( ) Presencial ( x ) Videoconferência  
( x ) *Aprovado* ( ) *Reprovado*

Dr(a). **MATIAS GUILHERME BOLL**



*Avaliador(a) Externo / EPAGRI / Florianópolis - SC*

Participação: ( x ) Presencial ( ) Videoconferência  
( x ) *Aprovado* ( ) *Reprovado*

*Este trabalho foi aprovado por:*

( ) maioria simples

( x ) unanimidade

**Florianópolis, 30 de setembro de 2022.**

CDD 551.5  
C232a

Canto, Marina Paiotti do

Aprimoramento da previsão do nível do mar para o litoral de Santa Catarina através de forçantes atmosféricas - [DIS] / Marina Paiotti do Canto; orientação de Adriano Vitor; coorientação de Mário Quadro – Florianópolis, 2022.

1 v.: il.

Dissertação de Mestrado (Clima e Ambiente) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Inclui referências.

1. Forçantes meteorológicas. 2. Nível do mar. 3. Previsão. 4. Modelo híbrido. I. Vitor, Adriano. II. Quadro, Mário. II. Título.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Adriano Vitor, que no momento mais crucial me incentivou a concluir mais esta etapa, com muita dedicação e compreensão com minhas as limitações.

Ao coorientador, Mário Quadro, que direcionou os passos finais deste trabalho com paciência e dedicação. Além de ter exercido durante todo o período uma coordenação de curso ativa e representativa.

Ao Programa de Mestrado Profissional em Clima e Ambiente do IFSC pela infraestrutura e corpo docente capacitado, que contribuiu para meu crescimento acadêmico e profissional com qualidade.

À EPAGRI pelo fornecimento dos dados e troca de informações neste período de construção do projeto. Em especial aos colaboradores Matias Boll e Luís Garbossa pela disponibilidade em nos atender.

Aos membros da banca examinadora, Professor Thiago Alves Pereira, Professor Michel Muza e ao membro externo Matias Boll, pelas críticas e sugestões.

Aos colegas da turma de 2019 pelo companheirismo, celebrações e inúmeras caronas que tanto me ajudaram.

A todos os colegas de trabalho que, durante o período de desenvolvimento da pesquisa acompanharam a “maré meteorológica” sem muita compreensão, mas entendendo a importância e valorizando meu esforço para estudar algo diferente da rotina.

Finalmente à minha família e amigos, que acompanharam por anos o desenvolvimento desta pesquisa e que por tantas vezes foram essenciais para a continuidade. Em especial ao Rômulo, que divide a vida, as frustrações e as conquistas comigo.

***“Escolher é assumir a responsabilidade  
que nos pertence. Escolhendo a gente se  
faz livre”.***

*Tamara Klink em “Mil milhas” (2021).*

## RESUMO

A Região Sul do Brasil é uma área bastante influenciada por perturbações meteorológicas que provocam intensas alterações no tempo predominante e no nível do mar. As marés são variações cíclicas do nível do mar e podem ser observadas no cotidiano e previstas pelas tábuas de maré (modelo harmônico de previsão), sendo por vezes, subestimadas ou superestimadas. A ocorrência de desníveis no nível do mar observados (positivos ou negativos) são algumas das alterações naturais que podem acarretar sérias implicações para as atividades humanas na zona costeira, sendo então necessário o aprimoramento dos métodos de predição do nível do mar. A pesquisa teve como objetivo desenvolver e aplicar um modelo híbrido de predição do nível do mar considerando indiretamente variáveis meteoceanográficas (velocidade e direção do vento, componentes  $u'$  e  $v'$  e pressão atmosférica instantânea), através de técnica estatística de regressão não-linear múltipla por mínimos quadrados e algoritmo genético. A proposta de utilização de dados em série, das sete estações maregráficas da EPAGRI ao longo do litoral de Santa Catarina, apresentou resultados satisfatórios e pode gerar subsídios para aplicação de outras técnicas de modelagem. Os ganhos, em média, pela aplicação do modelo ficaram em torno de 51%, sendo o mais baixo de 26,22% ao sul do Estado, em Balneário Rincão, e o mais alto de 66,61% ao norte, em Itapoá. Nota-se a melhoria significativa na predição sentido sul-norte, atestando que o sistema de alimentação da estação atual com os dados das estações anteriores é válido para este tipo de estudo. O resultado também corrobora que, estes sinais que induzem os desníveis do mar em relação ao previsto, são sistemas atuantes na região e podem ser monitorados em série com certa antecedência. Espera-se que os resultados possam auxiliar no aprimoramento e na incorporação dos estudos sobre os processos costeiros em geral no Brasil, principalmente em órgãos e empresas responsáveis pelo monitoramento destes fenômenos.

Palavras-Chave: Previsão. Nível do mar. Forçantes meteorológicas. Modelo híbrido.

## **ABSTRACT**

The Southern Region of Brazil is an area heavily influenced by meteorological disturbances that cause intense changes in the prevailing weather and sea level. Tides are cyclical variations in sea level that can be observed daily and predicted by tide tables (harmonic forecast model), sometimes being under or overestimated. The occurrence of observed unevenness in sea level (positive or negative) are some of the natural alterations that may cause serious implications for human activities in the coastal zone, making it necessary to improve sea level prediction methods. This research aimed to develop and apply a hybrid model of sea level prediction indirectly considering meteoceanographic variables (wind speed and direction, components  $u'$  and  $v'$ , and instantaneous atmospheric pressure) through the statistical technique of multiple non-linear regression by least squares and genetic algorithm. The proposal to use serial data from the seven EPAGRI tide gauge stations along the coast of Santa Catarina presented satisfactory results and can generate subsidies for the application of other modeling techniques. The average gains by applying the model were around 51%, with the lowest of 26.22% in the south of the state in Balneário Rincão, and the highest being 66.61% in the north, in Itapoá. There is a significant improvement in the south-north prediction, attesting that the power system of the current station with data of the previous stations is valid for this type of study. The result also corroborates that the signals that induce sea level unevenness in relation to what was predicted are active systems in the region and can be monitored in sequence in some advance. It is expected that the results can help in the improvement and incorporation of studies on coastal processes in general in Brazil, especially in agencies and companies responsible for monitoring these phenomena.

**Keywords:** Forecast. Sea level. Meteorological variables. Hybrid model.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1</b> - Tamanho e distâncias relativas à força de geração da maré do sistema Terra-Lua-Sol.....                                                                                                                                                                 | 16 |
| <b>Figura 2</b> - Diferença entre as marés de sizígia (Spring tide) e quadratura (Neap tide). Somatório das forças geradoras de maré nas luas nova/cheia e deduzidas nas luas crescente/minguante. ....                                                                   | 17 |
| <b>Figura 3</b> - Distribuição das marés no globo, classificadas como maré semi-diurna (verde), maré diurna (amarelo) e maré mista (vermelho).....                                                                                                                        | 19 |
| <b>Figura 4</b> - Presença do nível não-astronômico nos registros de nível do mar. (a) Salvador, (b) Fortaleza, (c) Rio Grande e (d) Rio de Janeiro. ....                                                                                                                 | 20 |
| <b>Figura 5</b> - Ilustração do princípio de Torricelli - barômetro invertido.....                                                                                                                                                                                        | 21 |
| <b>Figura 6</b> - Mecanismo de sobre-elevação e rebaixamento da água na costa S/SE brasileira. ....                                                                                                                                                                       | 22 |
| <b>Figura 7</b> - Exemplo de funcionamento geral de um algoritmo genético.....                                                                                                                                                                                            | 26 |
| <b>Figura 8</b> - Mapa de localização das estações maregráficas da EPAGRI utilizadas..                                                                                                                                                                                    | 29 |
| <b>Figura 9</b> - Representação do modelo utilizado no presente trabalho, baseado em regressão não linear múltipla e algoritmo genético. ....                                                                                                                             | 33 |
| <b>Figura 10</b> - Gráficos do padrão de direção (colaterais e subcolaterais) e intensidade do vento (m/s) das 07 estações.....                                                                                                                                           | 41 |
| <b>Figura 11</b> - Gráfico dos valores médios mensais da pressão atmosférica (hPa) para as 07 estações. A estação 02 não apresentou dados viáveis para representação...                                                                                                   | 42 |
| <b>Figura 12</b> - Gráficos dos valores do nível não-astronômico (resíduo da diferença entre os valores observados e os previstos pela previsão harmônica), para todas as estações. Período destacado no gráfico de final de junho a início de julho de 2019. ....        | 43 |
| <b>Figura 13</b> - Cartas sinóticas para representação da passagem de sistemas frontais sobre a região do estudo (litoral de Santa Catarina) em 12Z de 03/07/2019 (a) e 00Z de 05/07/2019 (b).....                                                                        | 45 |
| <b>Figura 14</b> - Histogramas do nível não-astronômico (NnA) para as 07 estações. Eixo y: frequência de ocorrência e eixo x: altura (cm). a) Passo de Torres, b) Balneário Rincão, c) Imbituba, d) Florianópolis, e) Balneário Camboriú, f) Barra Velha e g) Itapoá..... | 47 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 15</b> - Tempo (s) de execução das 100 réplicas para as sete estações utilizadas no estudo. ....                                                                                                                                                                           | 51 |
| <b>Figura 16</b> - Série comparativa das primeiras 200 horas entre os modelos do nível do mar observado (linha vermelha), harmônico (linha verde), proposto (linha azul) e nível do médio do mar (linha tracejada), para (a) ET02, (b) ET03 e (c) ET04. ....                         | 53 |
| <b>Figura 17</b> - Como na figura 19, para as (a) ET05, (b) ET06 e (c) ET07. ....                                                                                                                                                                                                    | 54 |
| <b>Figura 18</b> - Histogramas do erro médio (cm) dos modelos harmônico (barras azuis) e proposto (barras marrons) para as estações de a) Balneário Rincão (ET02), b) Imbituba (ET02), c) Florianópolis (ET02), d) Balneário Camboriú (ET02), e) Barra Velha (ET02) e f) Itapoá..... | 57 |
| <b>Figura 19</b> - Série comparativa do erro médio entre as 100 simulações do modelo proposto (linha azul) e do modelo harmônico (linha verde), para (a) ET02, (b) ET03 e (c) ET04. ....                                                                                             | 59 |
| <b>Figura 20</b> - Como na figura 19, para as (a) ET05, (b) ET06 e (c) ET07. ....                                                                                                                                                                                                    | 60 |
| <b>Figura 21</b> - Gráficos comparativos entre os modelos harmônico e proposto de (a) erros acumulados médios, (b) média de pontos ganhos e perdidos e (c) porcentagem de ganho pelo modelo proposto na previsão do nível do mar para cada estação. ....                             | 62 |
| <b>Figura 22</b> - Plataforma de pesca. Balneário Rincão/SC.....                                                                                                                                                                                                                     | 65 |
| <b>Figura 23</b> - Porto de Imbituba, Imbituba/SC.....                                                                                                                                                                                                                               | 66 |
| <b>Figura 24</b> - Baía sul de Florianópolis, Florianópolis/SC.....                                                                                                                                                                                                                  | 67 |
| <b>Figura 25</b> - Praia de Laranjeiras, Balneário Camboriú/SC.....                                                                                                                                                                                                                  | 68 |
| <b>Figura 26</b> - Barra Velha/SC.....                                                                                                                                                                                                                                               | 69 |
| <b>Figura 27</b> - Porto de Itapoá, Itapoá/SC.....                                                                                                                                                                                                                                   | 70 |
| <b>Figura 28</b> - Equações finais simplificadas por estação a) ET01, b) ET02, c) ET03, d) ET04, e) ET05, ET06 e f) ET07. ....                                                                                                                                                       | 73 |
| <b>Figura 29</b> - Cópia da tela (printscreen) do modelo no software MatLab 2020b.....                                                                                                                                                                                               | 73 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1</b> Tabela da localização das estações maregráficas e meteorológicas utilizadas no trabalho. ....                                                                                                                                                                                                                  | 31 |
| <b>Tabela 2</b> - Valores testados para configuração do modelo. ....                                                                                                                                                                                                                                                           | 35 |
| <b>Tabela 3</b> - Quantidade e porcentagem dos dados não utilizados por estação e total. ....                                                                                                                                                                                                                                  | 38 |
| <b>Tabela 4</b> - Análise exploratória de N (total de dados), N* (dados descartados), Média, EP Média (erro padrão da média), desvio padrão (DesvPad), valor Mínimo, Primeiro Quartil (Q1), Mediana, Terceiro Quartil (Q3) e Valor Máximo dos dados de nível do mar (cm) observado (Med) e estimado harmonicamente (Est). .... | 39 |
| <b>Tabela 5</b> - Correlação entre as variáveis NnA (cm), pressão atmosférica (hPa), velocidade máxima do vento (m/s), direção do vento (graus) e componentes zonal e meridional ( $u'$ e $v'$ ). ....                                                                                                                         | 51 |
| <b>Tabela 6</b> - Correlação entre os níveis não-astronômicos das 07 estações. ....                                                                                                                                                                                                                                            | 51 |
| <b>Tabela 7</b> - Resumo dos resultados e comparativo entre o modelo tradicional de previsão de maré (harmônico) e o modelo proposto. ....                                                                                                                                                                                     | 65 |
| <b>Tabela 8</b> - Configuração utilizada para calibração do modelo. ....                                                                                                                                                                                                                                                       | 74 |
| <b>Tabela 9</b> - Parâmetros de resultado do modelo. ....                                                                                                                                                                                                                                                                      | 75 |
| <b>Tabela 10</b> - Análise exploratória da velocidade máxima do vento (m/s) horária para as 7 estações. ....                                                                                                                                                                                                                   | 84 |
| <b>Tabela 11</b> - Análise exploratória da direção da velocidade máxima do vento (m/s) horária para as 7 estações. ....                                                                                                                                                                                                        | 84 |
| <b>Tabela 12</b> - Análise exploratória da pressão atmosférica média (hPa) horária para as 7 estações. A estação ET02 não apresentou dados viáveis para o uso. ....                                                                                                                                                            | 84 |

## SUMÁRIO

|                                                                   |           |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>SUMÁRIO .....</b>                                              | <b>10</b> |
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                        | <b>12</b> |
| <b>2. OBJETIVOS.....</b>                                          | <b>15</b> |
| <b>2.1. OBJETIVO GERAL .....</b>                                  | <b>15</b> |
| <b>2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</b>                           | <b>15</b> |
| <b>3. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>                              | <b>16</b> |
| <b>3.1. DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÕES.....</b>                       | <b>16</b> |
| <b>3.2. ESTUDOS DE MARÉS .....</b>                                | <b>18</b> |
| <b>3.3. NÍVEIS NÃO-ASTRONÔMICOS .....</b>                         | <b>19</b> |
| <b>3.4. MODELOS DE PREVISÃO CONSIDERANDO MAIS VARIÁVEIS .....</b> | <b>23</b> |
| <b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                                | <b>28</b> |
| <b>4.1. ÁREA DE ESTUDO .....</b>                                  | <b>28</b> |
| <b>4.2. DADOS .....</b>                                           | <b>29</b> |
| <b>4.3. MODELO .....</b>                                          | <b>33</b> |
| <b>4.4. AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA .....</b>                           | <b>36</b> |
| <b>5. RESULTADOS .....</b>                                        | <b>38</b> |
| <b>5.1. PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS .....</b>                     | <b>38</b> |
| <b>5.2. ANÁLISE METEOROLÓGICA .....</b>                           | <b>40</b> |
| <b>5.3. DADOS MAREGRÁFICOS .....</b>                              | <b>48</b> |
| <b>5.4. CORRELAÇÕES .....</b>                                     | <b>50</b> |
| <b>5.5. RESULTADOS DO MODELO .....</b>                            | <b>51</b> |
| 5.5.1. TEMPO DE PROCESSAMENTO.....                                | 51        |
| 5.5.2. ANÁLISE DE DESEMPENHO DO MODELO.....                       | 53        |
| <b>6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>                           | <b>66</b> |

|                                                         |           |
|---------------------------------------------------------|-----------|
| <b>7. PRODUTOS TÉCNICO E TECNOLÓGICOS .....</b>         | <b>74</b> |
| <b>7.1. EQUAÇÕES FINAIS POR ESTAÇÃO.....</b>            | <b>75</b> |
| <b>8. CONCLUSÃO.....</b>                                | <b>77</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                 | <b>79</b> |
| <b>APÊNDICE A - ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS.....</b> | <b>84</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

O cotidiano das pessoas que ocupam áreas litorâneas é influenciado por diversos fenômenos naturais e ininterruptos, um deles é chamado de maré, que consiste na variação do nível das massas de água que circundam os continentes. Esta variação ocorre periodicamente por uma ou duas vezes ao dia, sendo classificada em variações diurnas, semidiurnas ou mistas. Este fenômeno é resultado da ação das forças geradoras de maré, originadas da ação gravitacional dos sistemas Terra-Lua e Terra-Sol sobre os oceanos (PUGH, 1987; FRANCO, 1988; NUNES, 2007; MELO FILHO, 2017).

O Brasil é o quinto maior país do mundo em extensão territorial, com 8.5 milhões de km<sup>2</sup>. Possui um litoral com 7367 km, que aumenta para 9200 km se forem consideradas as saliências e reentrâncias do litoral que é banhado a leste pelo Oceano Atlântico. A área litorânea abrange 18 das 42 regiões metropolitanas do país, abrigando 26% da população brasileira (40% em Santa Catarina, segundo IBGE 2016) e inúmeros empreendimentos econômicos, responsáveis por 30% do PIB nacional.

A amplitude da maré astronômica no Brasil tende a aumentar de sul para norte ao longo da costa brasileira. Dividindo-se em setores de S/SE (até o Sul da Bahia), costa Nordeste (até o Ceará), costa Norte e extremo Norte. A principal razão pela qual a maré astronômica comporta-se dessa maneira no Brasil relaciona-se à localização dos pontos anfidrômicos das componentes de maré no Atlântico Sul e o modo pelo qual as ondas de maré astronômica se ajustam dentro da bacia desse oceano (MELO F<sup>o</sup>, 2017). Por este motivo, as ações dos efeitos atmosféricos, no nível do mar, nas regiões Sul e Sudeste, são mais notados e levam a maiores perdas, já que não há uma estruturação da zona costeira para grandes desníveis positivos ou negativos não previsíveis.

A zona costeira-marinha brasileira enfrenta fortes impactos provocados, principalmente, pela mudança do clima. Os efeitos atingem não só o ambiente, mas também a população. De 1991 a 2010, segundo dados oficiais, foram registrados 32 mil desastres naturais ao longo da costa, afetando mais de 100 milhões de pessoas (AUGUSTO, 2018).

A Região Sul do Brasil é uma área bastante influenciada por perturbações meteorológicas com períodos que variam de 3 a 5 dias (frentes frias), provocando intensas alterações no tempo predominante (OLIVEIRA, 2004). Além de uma zona costeira extensa e completamente urbanizada, que pode sofrer com a destruição da orla e intrusões salinas (RODRIGUES, 2004). A ocorrência de maré meteorológica e a geração de ondas de superfície (popularmente chamadas de “ressacas”) são alguns desses desastres naturais que podem acarretar sérias implicações para as atividades humanas na zona costeira.

O Estado de Santa Catarina conta com cinco portos marítimos: Itapoá, São Francisco do Sul, Navegantes, Itajaí e Imbituba, além de inúmeros portos pesqueiros industriais. Juntos, eles movimentam anualmente cerca de 18 milhões de toneladas de cargas e são frequentemente afetados por tempestades em sua área de operação (HERNANDEZ, 2017).

O fechamento de portos devido às condições meteorológicas adversas, os processos de erosão costeira, a destruição de construções à beira-mar e as enchentes anômalas são algumas das implicações diretas da passagem dos sistemas meteorológicos de escala sinótica e sub-sinótica por regiões costeiras (CAMARGO *et al.*, 2000). Além disso, atividades de grande importância econômica no Estado, como o turismo e a pesca, são diretamente afetadas devido à forte agitação marítima durante estes períodos.

Conforme estimativa do estudo de impacto econômico de Montanari (2015), em relação ao cenário mais pessimista da elevação do nível médio do mar do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), para o ano de 2100 e o cenário modelado de expansão urbana e populacional, para o município de Florianópolis/SC, o custo total do aumento do nível do mar de 1 metro em um desastre súbito chegou em 63 bilhões de reais. Apenas o custo direto do impacto foi estimado em 13 bilhões de reais e as perdas de empregos ficaram em torno de 31 mil postos de trabalho.

Sendo assim, o monitoramento do nível do mar realizado pela EPAGRI/CIRAM é necessário para a gestão adequada dos recursos costeiros, de modo que sua continuidade reflète um anseio das comunidades costeira e científica,

não apenas em Santa Catarina, mas também para os outros estados das regiões Sul e Sudeste do Brasil (ARAÚJO, 2020), sendo capaz de fornecer subsídio para a presente pesquisa.

Nesse sentido, devido à importância ambiental, social e econômica da zona costeira para o estado de Santa Catarina, se faz necessário o investimento na melhoria dos métodos de predição do nível do mar, levando-se em conta as forçantes atmosféricas, já que são fatores incidentes e importantes no desnível do mar para essa região.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Desenvolver e aplicar um modelo híbrido de predição do nível do mar considerando indiretamente variáveis meteoceanográficas, através de técnica estatística de regressão não-linear múltipla por mínimos quadrados e algoritmo genético.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Baseado em modelos matemáticos, desenvolver um sistema computacional, na forma de produto técnico e tecnológico, para ampliar a capacidade da previsibilidade do nível do mar na costa de Santa Catarina;
- Considerar as forçantes atmosféricas no modelo de previsão das marés: pressão atmosférica e vento (direção e velocidade);
- Testar a eficiência do sistema na previsão do nível do mar para a região litorânea do Estado de Santa Catarina;
- Avaliar a eficiência do modelo na previsão e sua viabilidade de implantação junto aos órgãos de monitoramento.

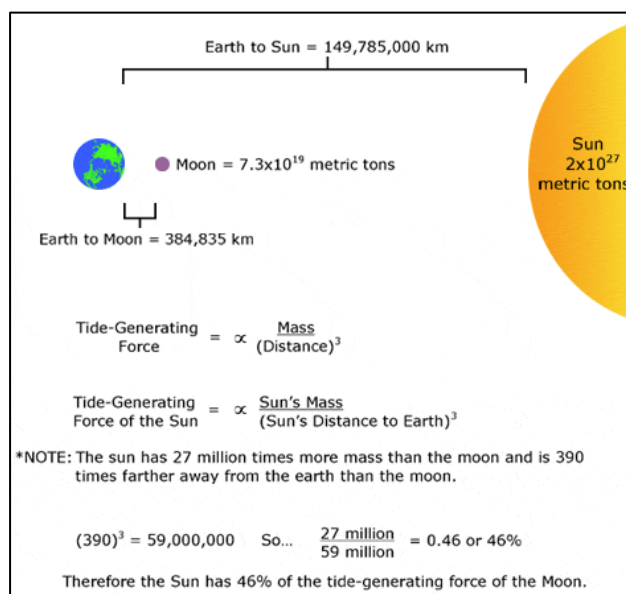
### 3. REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1. Definição e Classificações

Como parte do sistema Terra-Lua-Sol, o Sol é cerca de 27 milhões de vezes mais maciço que a Lua, porém encontra-se 387 vezes mais distante do que a Lua em relação à Terra. Em função disso, a influência do Sol sobre as marés é aproximadamente a metade da influência da Lua (GARRISON, 1942). A figura 1 ilustra esse processo.

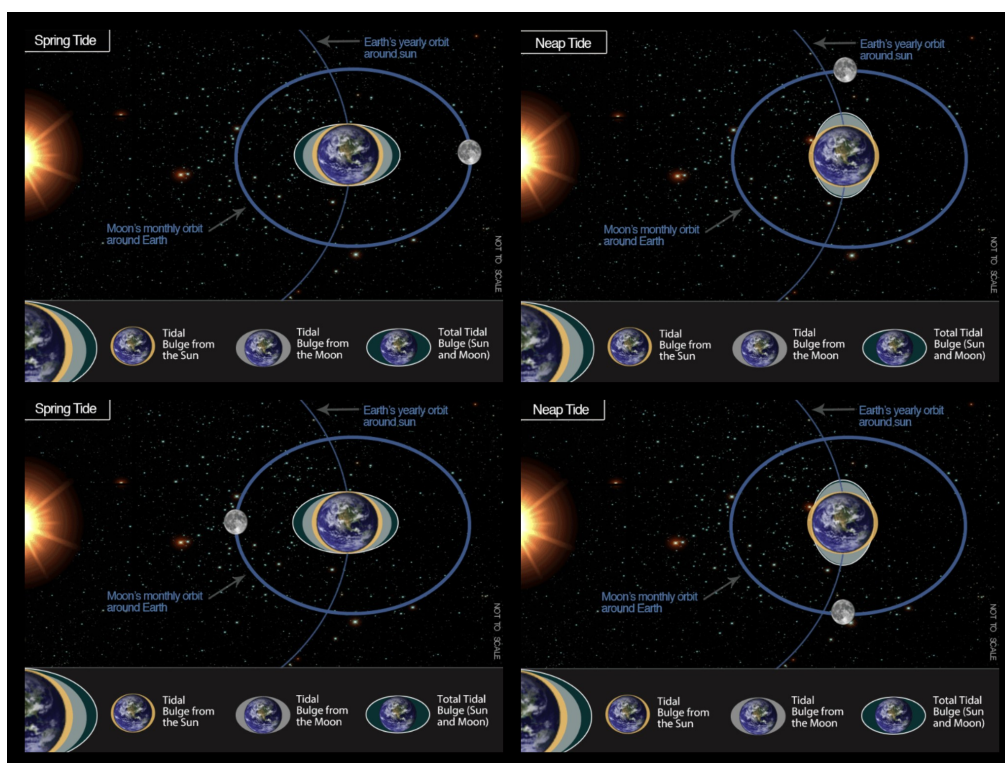
Devido a este fator, existe uma diferença cíclica nas amplitudes da maré de acordo com o posicionamento destes astros. A maré de sizígia ocorre quando a Terra, a Lua e o Sol encontram-se alinhados, tendo as forças gravitacionais somadas, resultando em maiores amplitudes. Já as marés de quadratura acontecem quando as forças gravitacionais do Sol e da Lua não estão alinhadas, resultando então em amplitudes menores (Fig. 2). As variações ocorrem alternadamente e podem ser verificadas de acordo com a fase da lua, sendo maré de sizígia nas luas cheia e nova e as quadraturas nas crescentes e minguantes.

**Figura 1** - Tamanho e distâncias relativas à força de geração da maré do sistema Terra-Lua-Sol.



Fonte: NOAA - *National Ocean Service*. Disponível em: <<https://oceanservice.noaa.gov/>>.

**Figura 2** - Diferença entre as marés de sizigia (*Spring tide*) e quadratura (*Neap tide*). Somatório das forças geradoras de maré nas luas nova/cheia e deduzidas nas luas crescente/minguante.



Fonte: NOAA - *National Ocean Service*. Disponível em: <<https://oceanservice.noaa.gov/>>.

Segundo Melo F<sup>o</sup> (2017), trata-se de complicadíssimo problema de mecânica dos fluidos que envolve a existência de ondas que se propagam e se adequam à topografia e ao formato das bacias oceânicas. Devido à complexidade da geometria e à rotação da Terra, essas ondas tendem a desenvolver pontos anfidrômicos, em torno dos quais a onda de maré gira e onde a variação vertical do nível é nula.

Em termos mais simples, a amplitude da maré astronômica em um determinado local da costa depende da amplitude das ondas de maré astronômica oceânicas na borda da plataforma continental, a qual depende da distância até os respectivos pontos anfidrômicos, e também das características da própria plataforma.

Para o Brasil, considerando o critério de Veloso e Alves (2006), a maré astronômica possui a seguinte classificação de altura (H): i) na costa S/SE (até o Sul da Bahia) enquadra-se no regime de micro-maré ( $H < 2$  m); ii) na costa Nordeste (até o Ceará) no regime de meso-maré ( $2 \text{ m} < H < 4$  m) e; iii) a costa

Norte brasileira no regime de macro-maré ( $H > 4$  m). Em alguns locais no extremo norte do país, a maré astronômica atinge níveis de hiper-maré ( $H > 6$  m).

### 3.2. Estudos de Marés

Uma evolução deste processo mostra que a maior parte dos estudos até o final do século XX estavam direcionados à construção de tabelas (tábuas) de marés para os portos marítimos, a fim de conhecer previamente as sequências e amplitudes das marés (TUKERIAN, 1968), estudando e elaborando análises harmônicas desse fenômeno.

Os modelos numéricos aperfeiçoados a partir da máquina de previsão das marés, desenvolvida por Lord Kelvin no século XIX, utilizam o método das constantes harmônicas, que permitem conhecer o comportamento astronômico do local estudado (FRANCO, 1981). A análise harmônica parte do pressuposto de que a onda de maré é o somatório das suas diversas componentes harmônicas, identificadas por meio dos seus períodos, já conhecidos para cada componente, gerando as amplitudes e fases, que variam de acordo com a localização (COELHO, 2016).

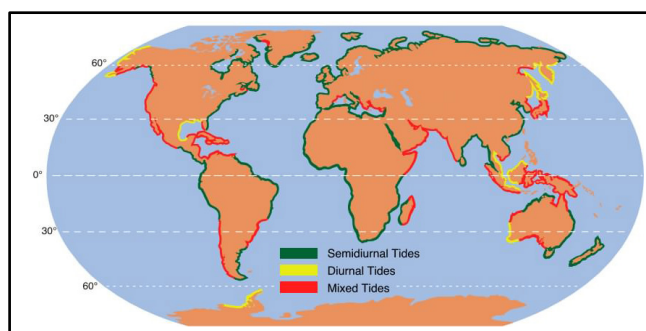
Neste sentido, a análise é elaborada com dados de séries horárias, de pelo menos 29 dias, dos valores da elevação da água num determinado ponto, com a latitude e longitude exata de onde foi fixado o marégrafo e o horário. A resposta da análise consiste nas amplitudes e fases das curvas senoidais em determinadas frequências específicas.

Tratando-se da Lua como principal gerador das marés, os dois máximos de amplitude ocorrem a cada 12 horas e 25 minutos, que corresponde à metade do denominado dia lunar. Quando a frequência em que o nível médio sobe e desce é de dois ciclos por dia lunar (ou solar, quando a maré é gerada pelo sol), a maré é caracterizada como maré semidiurna.

Quando a frequência é de um ciclo no dia lunar, então as marés são caracterizadas como diurnas (BORATO, 2018), que significa aproximadamente um período de maré por dia, enquanto as consideradas semidiurnas ocorrem duas vezes ao dia (GUIMARÃES & MARONE, 1996). Portanto, as componentes de uma

maré representam os ciclos distintos do movimento orbital da Lua e do Sol e da consequente variação do potencial gerador das marés. Cada região na costa possui a maré determinada por suas constituintes dominantes, as quais estão associadas às suas constantes harmônicas, suas amplitudes e suas fases (GUIMARÃES; MARONE, 1996). A figura 3 ilustra a distribuição dos tipos de maré ao redor do planeta.

**Figura 3** - Distribuição das marés no globo, classificadas como maré semi-diurna (verde), maré diurna (amarelo) e maré mista (vermelho).



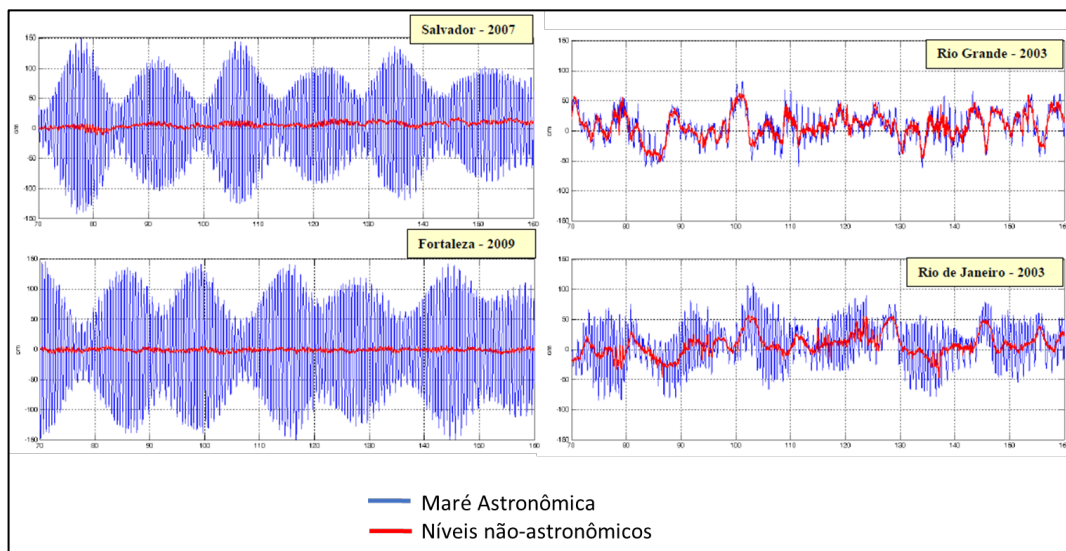
Fonte: Pidwirny, M. (2006). "Ocean Tides". *Fundamentals of Physical Geography, 2nd Edition*.  
<<http://www.physicalgeography.net/fundamentals/8r.html>>.

### 3.3. Níveis não-astronômicos

Muitos avanços foram conquistados com o entendimento das flutuações do nível do mar relativo à movimentação dos astros, porém, existem outros fatores que interferem neste fenômeno. Segundo Pugh (1987), até as previsões das marés mais cuidadosamente preparadas sobre o nível do mar ou as variações atuais diferem daquelas realmente observadas.

A diferença mensurada entre a maré prevista e a observada é creditada aos efeitos não-astronômicos, que interferem de maneira diversa em cada localidade e tem suas causas pouco conceituadas. Melo Filho (2017) afirma em seu estudo que a previsão dada pelas Tábuas de Maré para a costa sul-sudeste (S/SE) brasileira é bastante imprecisa, frequentemente com erros da ordem de 100% em relação ao nível real do mar. Sendo assim, se observa a presença importante de uma maré de origem não-astronômica nesse trecho da costa.

**Figura 4** - Presença do nível não-astronômico nos registros de nível do mar. (a) Salvador, (b) Fortaleza, (c) Rio Grande e (d) Rio de Janeiro.



Fonte: Adaptado. Melo Filho (2017).

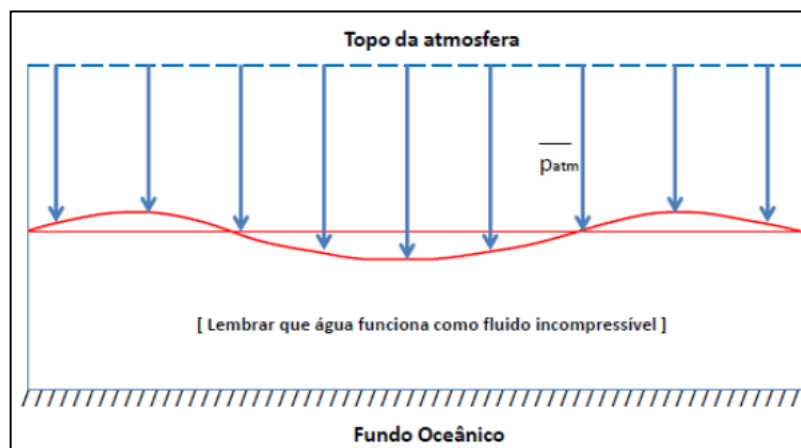
O nível não-astronômico, muitas vezes chamado de maré meteorológica, é definido como a diferença entre a maré astronômica, calculada pelas análises harmônicas, e a maré que se observa num dado momento (PUGH, 1987). Melo Filho (2017) sugere que o termo “maré meteorológica” pode ter surgido de uma simples comparação com o fenômeno de passagem de frentes frias no sul do Brasil, e sugere que os períodos de anomalia seriam a própria escala de tempo dos sistemas atmosféricos sinóticos (OLIVEIRA, 2004), algo entre alguns dias a poucas semanas. Carvalho (2015) cita que a maré meteorológica é um evento não determinístico, já que é produto de variações do campo de vento, não podendo assim ser perfeitamente determinado em um longo prazo.

A título de organização de termos, considera-se neste trabalho o uso do termo “nível não-astronômico” para se referir aos níveis observados e não abrangidos pela previsão astronômica, o que, segundo Melo Filho (2017), inclui os efeitos relacionados a “maré meteorológica”, mas não se restringe a eles.

Essas perturbações de origem meteorológica identificadas a partir dos

registros de alturas do nível da água, estão associadas, principalmente, aos efeitos da variação da pressão atmosférica interagindo no nível do mar, conhecido como barômetro invertido, segundo o princípio de Torricelli (Fig. 5), que provocam alterações no nível do mar, sendo respostas a uma condição de equilíbrio, com uma relação inversa entre ambos.

**Figura 5** - Ilustração do princípio de Torricelli - barômetro invertido.



Fonte: Melo Filho (2017).

O aumento da pressão de 1 hPa resultará em um decréscimo no nível do mar de, aproximadamente, 1 cm. Já o efeito da tensão do vento no nível do mar está associado ao mecanismo de transporte de Ekman e varia, inversamente, com a profundidade da água, e é mais importante quando sopra sobre uma região extensa de água rasa com profundidade inferior a 10 metros, como se observa em alguns casos de plataforma continental ou baía (OLIVEIRA, 2004).

As variações observadas no nível do mar podem ser negativas, quando consideramos um nível menor do mar do que previsto, e positivas, caso o nível do mar ultrapasse o considerado nas tábuas de marés. Nestes eventos, o mar pode se elevar e causar inundações nas áreas de baixo relevo densamente povoadas, que podem vir a sofrer danos materiais e imateriais, como perda de imóveis, equipamentos, vias de acesso, materiais de consumo e em casos extremos vidas.

Da mesma forma, as anomalias negativas causam grandes danos à navegação, podendo ameaçar a atracação das embarcações e impossibilitar uma

série de operações portuárias (CAMPOS; CAMARGO; HARARI, 2010).

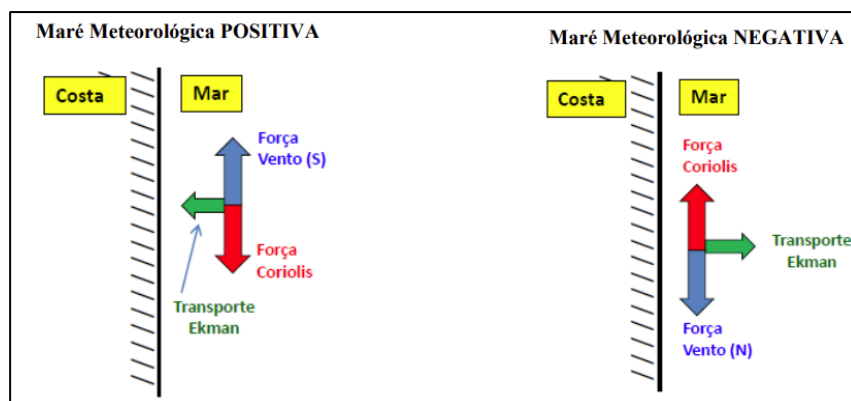
Estes efeitos, designados de sobre-elevação e rebaixamento devido à ação atmosférica, são de natureza periódica não regular, ou seja, de natureza não-periódica no sentido estrito ou harmônico, então, não seria uma componente sujeita à modelação harmônica, muito embora, possa ser possível uma modelagem numérica não harmônica (ANTUNES & GODINHO, 2011).

Melo *et al.* (2016) apresentou resultados que evidenciam que os níveis não-astronômicos são responsáveis por dois terços da energia das marés não previstas na costa brasileira e atribuiu a ação do vento maior influência do que a pressão atmosférica, entretanto, os efeitos resultantes na oscilação do nível do mar, apesar de serem explicados individualmente, agem concomitantemente sobre o movimento das parcelas de água. As alterações de pressão atuam igualmente em toda coluna de água, enquanto o efeito do vento depende de diversos fatores, como a intensidade e o tempo de atuação do mesmo e a situação de estratificação da coluna de água.

A figura 6 mostra que, de acordo com o mecanismo de Ekman, ventos provenientes de sul na região da linha de costa do Brasil acarretarão em um empilhamento de águas em direção à costa, enquanto que ventos provenientes de norte diminuirão o nível do mar (TRUCCOLO, 1998; MELO FILHO, 2017).

Truccolo, Franco e Schettini (2004), correlacionaram estatisticamente as variações do nível do mar de “baixa frequência” (períodos maiores que 55 horas) com forçantes atmosféricas locais em Santa Catarina: ventos (intensidade e direção) e pressão, concluindo que o vento paralelo à costa é principal agente motriz com um retardo de 6 a 10 horas em relação ao nível.

**Figura 6** - Mecanismo de sobre-elevação e rebaixamento da água na costa S/SE brasileira.



Fonte: Melo Filho (2017).

A grande magnitude do fenômeno observado no Brasil, principalmente nas regiões Sul e Sudeste, também está relacionada à presença de sinais remotos gerados na plataforma continental adjacente. Várias Autoras indicam que sistemas atuantes no oceano, mais distantes, se propagam de sul para norte em virtude de ondas de plataforma, portanto, há a possibilidade da ocorrência de uma maré meteorológica sem a presença de vento local (MELO, 2017; MELO *et al.*, 2016; OLIVEIRA, 2004).

Além disso, os níveis não-astronômicos respondem, também, às características batimétricas locais, sendo intensificados os efeitos dos fenômenos meteorológicos na variação do nível do mar, quando estes atuam sobre águas rasas (NUNES, 2007).

A plataforma continental da região sul apresenta-se consideravelmente ampla e com relevo suave. Essa superfície regular, sem formas topográficas acrescionais ou erosivas de grande amplitude regional (MARINO, 2006), podem contribuir para ocorrência do desnível não previsto pelo método de previsão harmônico tradicional.

### 3.4. Modelos de previsão considerando mais variáveis

Aperfeiçoar a previsão da maré para cada região, considerando os efeitos atmosféricos (pressão atmosférica e vento), torna-se um problema com diversas variáveis. Para tal, é necessário a aplicação de métodos computacionais (modelos dinâmicos ou estatísticos).

De maneira geral, modelos estatísticos procuram relacionar a resposta do sistema em estudo (variável dependente) às forçantes (variáveis independentes,

supostamente conhecidas ou estimáveis). Não sendo baseados em princípios físicos fundamentais, como no caso dos modelos hidrodinâmicos; os modelos estatísticos necessitam de algum conhecimento prévio sobre o funcionamento do sistema.

Este processo garante que o conjunto de parâmetros escolhidos inclua todos os aspectos relevantes. Adicionalmente, é necessário dispor de dados que permitirão estabelecer as relações desejadas entre a resposta e as forçantes. Com as relações estabelecidas, o modelo pode ser usado para previsões (MELO Fº, 2017).

A Inteligência Computacional (IC) é uma área da ciência que busca, através de técnicas inspiradas na natureza, o desenvolvimento de sistemas inteligentes que imitam aspectos do comportamento humano, tais como: aprendizado, percepção, raciocínio, evolução e adaptação (PACHECO, 2004).

Atualmente, desenvolvem-se pesquisas em modelagem computacional nas áreas de meteorologia e oceanografia, principalmente, no que se refere a melhoria da qualidade dos dados que são utilizados nos modelos numéricos de previsão e no aprimoramento dos próprios modelos e técnicas (OLIVEIRA, 2004; MELO Fº, 2017, BORATO, 2018).

Existem modelos com Redes Neurais Artificiais (RNAs) desenvolvidos para estudos do comportamento do oceano e da atmosfera, principalmente na variabilidade do nível do mar relacionado à maré meteorológica (OLIVEIRA, 2004; BORATO, 2018). Oliveira (2004) exemplificou usos da RNA para variabilidade no nível do mar, sinalizando que Felippo (2003), Patrick *et al.* (2003), Sperb (2003) e Truccolo (1998) usaram modelos de RNAs com forçantes atmosféricas como elementos de entrada, tendo alcançado resultados satisfatórios.

Já um modelo de regressão linear múltiplo no domínio do tempo e da frequência, utilizado por Truccolo (1998) em São Francisco do Sul - SC, apontou que parte das flutuações de baixa frequência do nível do mar está associado às variações atmosféricas locais, atribuídos a uma resposta linear à meteorologia local em função dos efeitos combinados da pressão atmosférica, através do seu efeito dinâmico e da tensão longitudinal do vento, através do mecanismo de Ekman.

Métodos de inteligência artificial para previsão do nível do mar também foram utilizados para análise harmônica, Ghorbani *et al.* (2010) comparou dois métodos: Programação Genética e RNAs. Em alguns casos a programação genética apresentou melhores resultados, enquanto que em outros as RNAs obtiveram um melhor desempenho, entretanto, os dois métodos apresentaram boas performances como alternativas à análise harmônica.

Outra opção viável são as técnicas híbridas, entre elas, o modelo de regressão não-linear que utiliza a ideia de ajuste por mínimos quadrados em conjunto com algoritmo genético, que podem comportar o volume de dados e as interações não lineares dos dados meteorológicos vinculados às interferências nos regimes de maré astronômicas, sendo estes, métodos de modelagem mais simples em comparação com RNAs e exigem processamento em tempo factível ao problema, facilitando a aplicação prática dos modelos para aperfeiçoar a previsão por parte de órgãos públicos e privados direcionados a segurança civil e ambiental (VITOR, 2015).

Modelos não lineares são caracterizados por funções  $f(x, \theta)$  não lineares em pelo menos um dos parâmetros  $\theta_i$ . Em outras palavras, para que um modelo seja não linear é necessário que, ao menos, uma das derivadas da  $f(x, \theta)$  com relação à  $\theta_i$ , dependa de ao menos um dos parâmetros  $\theta_i$ .

Adicionalmente, a estimativa dos parâmetros pode ser feita através de outras técnicas de otimização matemática, como o método dos mínimos quadrados, que procura o melhor ajuste para um conjunto de dados, tendo como objetivo minimizar a soma do quadrado das diferenças entre os valores observados e os valores preditos pelo modelo.

Segundo Mazucheli e Achcar (2002), o método de estimação por mínimos quadrados é usado na análise de dados em que as observações são constituídas por variáveis resposta  $y_i$  obtidas em diferentes níveis da variável independente  $x_i$ , ( $i=1, \dots, n$ ). Assume-se que a relação variável resposta/variável independente pode ser adequadamente representada pela equação (1).

$$y = f(x; \theta) + \varepsilon \quad (1)$$

em que  $y = (y_1, \dots, y_n)^t$  e  $x = (x_1, \dots, x_n)^t$  são os vetores de variáveis resposta e variável explicativa, respectivamente,  $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_p)^t$  é o vetor de parâmetros desconhecidos,  $f(x; \theta) = (f(x_1; \theta), \dots, f(x_n; \theta))^t$  é uma função das variáveis regressoras e dos parâmetros chamada de função esperança ou função de regressão e  $\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)^t$  é o vetor de erros aleatórios.

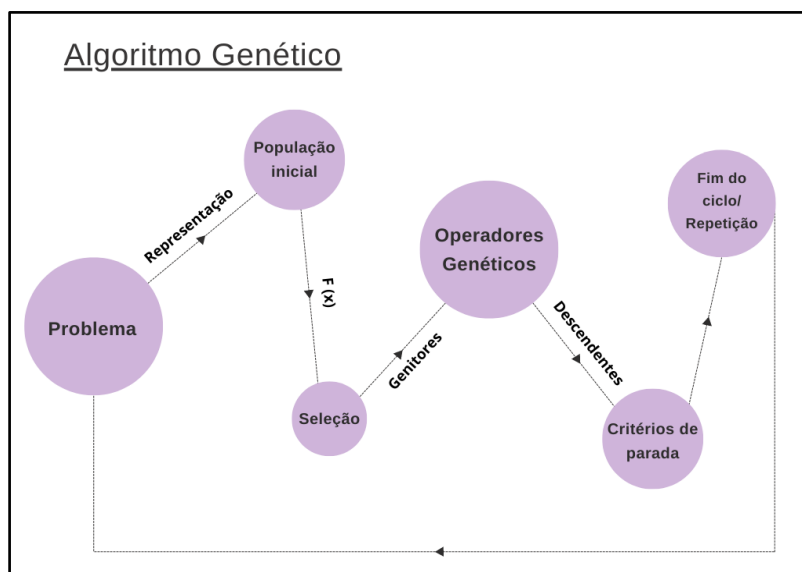
Considerando que a função de regressão é contínua e admite derivada de primeira e segunda ordens com relação aos parâmetros, define-se a soma de quadrados dos erros através da equação (2).

$$S(\theta) = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i; \theta)]^2 \quad (2)$$

Pode-se notar que após a realização de um dado experimento,  $(x_i, y_i)$  são observações fixas e conhecidas, portanto  $S(\theta)$  depende exclusivamente de  $\theta$ . Denota-se por  $\hat{\theta}$  os estimadores de mínimos quadrados de  $\theta$ , ou seja, os valores de  $\hat{\theta}$  que minimizam  $S(\theta)$ .

Os algoritmos genéticos, por sua vez, são particularmente aplicados e adicionados em problemas complexos de otimização: i) problemas com diversos parâmetros ou características que precisam ser combinadas em busca da melhor solução; ii) problemas com muitas restrições ou condições que não podem ser representadas matematicamente e iii) problemas com grandes espaços de busca (PACHECO, 2004), sendo uma alternativa viável para o presente trabalho. A figura 7 representa o funcionamento geral de um algoritmo genético.

**Figura 7** - Exemplo de funcionamento geral de um algoritmo genético.



Fonte: ADAPTADO (Pacheco, 2004)

Desse modo, considerando a característica de orientação e relevo submarino da costa de Santa Catarina, os fenômenos atmosféricos incidentes de sul para norte, mecanismos de transporte na coluna d'água já fundamentados e a disponibilidade de uma rede de marégrafos instalados em série ao longo da costa do Estado, sugere-se que é possível obter um sistema de previsão do nível do mar mais eficiente considerando efeitos meteorológicos, a fim de prever desníveis reais com algumas horas de antecedência.

Eloi Fº (2017) concluiu em sua tese que, a previsão de nível para o Porto de Rio Grande/RS com antecedência de um dia, tem chance de funcionar bem a partir de medições de nível em Mar del Plata (Argentina) e com o uso de previsões meteorológicas para Punta del Este (Uruguai).

Da mesma forma, previsões para o Rio de Janeiro/RJ com antecedência de um dia podem ser obtidas, com grandes chances de êxito, a partir de medições de nível em Imbituba e de previsões meteorológicas em Cananéia/SP e/ou Santos/SP.

Além disso, o autor cita que providências similares para outros sítios da costa SE brasileira podem também ser implementadas aproveitando a infraestrutura da rede maregráfica já existente.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Área de estudo

O estudo tem foco no litoral do Estado de Santa Catarina, que está localizado na região Sul do Brasil (Fig. 8). Ao longo dos 561,4 km de extensão do seu litoral, representando 7% do litoral brasileiro (DIEHL *et al.*, 2004), entre as latitudes de 25° 57' 41"S e 29° 23' 55"S, desenvolvem-se importantes atividades do setor marítimo, entre pesca artesanal e comercial e indústria portuária (RODRIGUES, 2004).

A plataforma continental Sul do Brasil caracteriza-se por ser relativamente larga, com isóbatas alinhadas paralelamente à costa, e com orientação geral da linha de costa de 45° em relação ao norte (TRUCCOLO, 1998).

A planície costeira encontra-se em contato direto com as águas do oceano Atlântico Sul, com ondulações geradas principalmente pelos ventos do sudeste e as correntes litorâneas propiciam uma deriva resultante direcionada para nordeste, sendo fator principal na formação das praias no litoral (DIEHL *et al.*, 2004).

De modo geral, em Santa Catarina a maré possui um regime de micro-maré mista, com predominância semi-diurna, tendo uma variação de 0,4 a 1,2m, nas marés de quadratura e sizígia respectivamente, podendo alcançar até 1m acima do nível previsto em condições de maré meteorológica (TRUCCOLLO, 1998; TRUCCOLLO *et al.*, 2006).

Os ventos predominantes no litoral catarinense, de setembro a fevereiro são provenientes de nordeste e os ventos de março a agosto são provenientes de sudoeste e sudeste (DIEHL & HORN FILHO, 1996). Na circulação atmosférica a situação normal é o domínio do sistema semi-fixo com ventos de NE, onde predomina a alta subtropical do Atlântico Sul, juntamente com o efeito local da brisa marinha (RODRIGUES, 2004).

Além disso, sobre a região da plataforma continental catarinense, Truccolo & Franco (2000) identificaram uma resposta do nível do mar altamente influenciada por passagens frontais, muitas vezes provocando sobre-elevações.

Periodicamente, o sistema é perturbado pela passagem de frentes frias originadas pelo Anticiclone Móvel Polar, que percorrem o litoral da América do Sul migrando sobre a região de sudoeste para nordeste (DHN, 1994; RODRIGUES, 2004). Os sistemas de frentes frias atuam com maiores intensidades no sul do Brasil devido a sua proximidade às zonas de geração (TRUCCOLO, 1998).

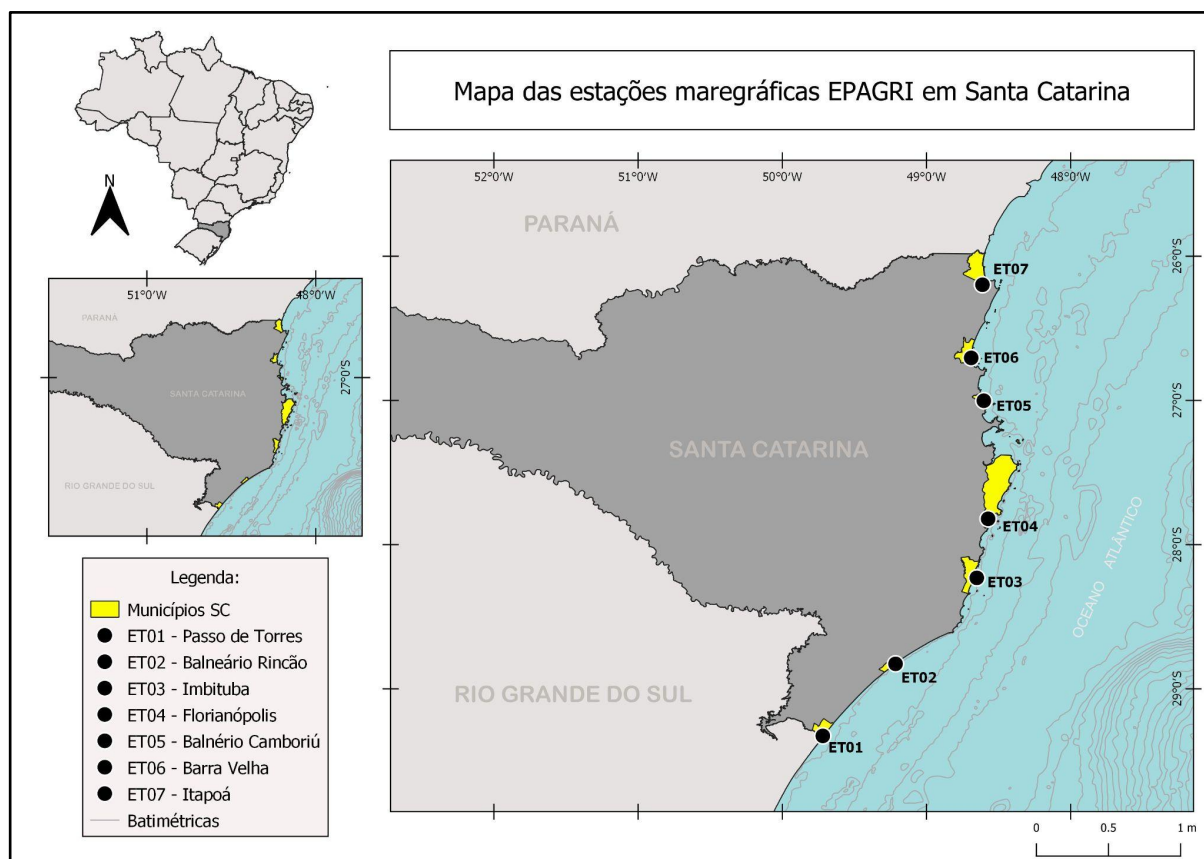
A passagem de uma frente fria produz variações bruscas da pressão atmosférica e da temperatura do ar, ocasionando também uma modificação da magnitude e direção do vento (STECH & LORENZZETTI, 1992).

Oliveira (2004), no estudo sobre climatologia de frentes frias entre 1999-1990, mostra a trajetória típica dos deslocamentos de sudoeste para nordeste, com duração média de 3 dias ao longo do litoral sul e sudeste do Brasil. A média mensal de ocorrência de frentes frias atingindo Santa Catarina foi de 3 a 4, sendo ligeiramente maior na primavera. Os estudos de Oliveira (1986), Lemos & Calbete (1996) e Justi da Silva & Silva Dias (2000, 2002), identificaram maior número também na primavera e inverno.

#### **4.2. Dados**

Para elaboração do trabalho, foram utilizadas informações de estações maregráficas e meteorológicas distribuídas ao longo da costa pertencentes e mantidas pela EPAGRI (Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina) e INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), que tem acesso gratuito em tempo real através do website das instituições (<https://ciram.EPAGRI.sc.gov.br/index.php/maregrafos/>; <https://bdmep.inmet.gov.br/>), sendo suas séries temporais cedidas para o presente estudo visando a aplicação do produto gerado ao final da construção do método. A figura 8 ilustra a localização destas estações na área de estudo.

**Figura 8** - Mapa de localização das estações maregráficas da EPAGRI utilizadas.



Fonte: A Autora

A Tabela 1 apresenta as localidades selecionadas para o presente trabalho são Itapoá, Barra Velha, Balneário Camboriú, Florianópolis, Imbituba, Balneário Rincão e Passos de Torres. Estas localidades representam a posição das estações marítimas sobre o litoral do Estado de Santa Catarina de norte a sul. Destas estações foram utilizados dados de altura do nível do mar, obtidos através de marégrafos. Os marégrafos da EPAGRI fazem medições automáticas do nível do mar, através de sensores tipo radar e piezoelétrico, a intervalos de tempo pré-fixados de cinco minutos.

Já as variáveis atmosféricas foram obtidas através das estações de Itapoá, Balneário Barra do Sul, Itajaí, Florianópolis, Imbituba, Jaguaruna e Arroio do Silva. Destas estações foram utilizados dados de velocidade ( $\text{m.s}^{-1}$ ), direção do vento (graus) e pressão atmosférica instantânea (hPa), obtidos a partir de estações meteorológicas automáticas e convencionais.

Os dados medidos são automaticamente transmitidos a cada 15 minutos para um servidor computacional, localizado na sede da EPAGRI em Florianópolis,

SC. É realizado o controle de qualidade automático e os dados são armazenados em um banco de dados digital e posteriormente utilizados para a confecção dos maregramas e de outros produtos (ARAÚJO *et al.*, 2021).

Quando não houveram dados de estações meteorológicas no mesmo local ou região da estação maregráfica, foram utilizadas a mais próxima ou a que mais se equiparava com a condição geográfica local e as estações que dispunham dos dados no período.

**Tabela 1** Tabela da localização das estações maregráficas e meteorológicas utilizadas no trabalho.

| Localidade dos dados litoral de Santa Catarina - Brasil |                                |                                           |                            |                                             |                            |
|---------------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------|----------------------------|
| Estação                                                 | Estação (município referência) | Dados nível do mar (previsto e observado) | Localização (Lat. e Long.) | Dados meteorológicos (pressão atm. e vento) | Localização (Lat. e Long.) |
| ET01                                                    | Passo de Torres                | Passo de Torres                           | 29°19'34.0"S               | Arroio do Silva                             | 28°S7'46.0"S               |
|                                                         |                                |                                           | 49°43'09.0"W               |                                             | 49°22'49.0"W               |
| ET02                                                    | Balneário Rincão               | Balneário Rincão                          | 28°49'34.0"S               | Jaguaruna                                   | 28°39'25.0"S               |
|                                                         |                                |                                           | 49°12'53.0"W               |                                             | 49°22'49.0"W               |
| ET03                                                    | Imbituba                       | Imbituba                                  | 28°13'51.0"S               | Imbituba                                    | 28°13'51.0"S               |
|                                                         |                                |                                           | 48°39'03.0"W               |                                             | 48°39'03.0"W               |
| ET04                                                    | Florianópolis                  | Florianópolis                             | 27°00'00.0"S               | Florianópolis                               | 27°35'24.0"S               |
|                                                         |                                |                                           | 48°34'12.0"W               |                                             | 48°30'36.0"W               |
| ET05                                                    | Balneário Camboriú             | Balneário Camboriú                        | 27°00'00.0"S               | Itajaí                                      | 26°57'36.0"S               |
|                                                         |                                |                                           | 48°35'24.0"W               |                                             | 48°46'12.0"W               |
| ET06                                                    | Barra Velha                    | Barra Velha                               | 26°42'00.0"S               | Balneário Barra do Sul                      | 26°29'24.0"S               |
|                                                         |                                |                                           | 48°41'24.0"W               |                                             | 48°37'48.0"W               |
| ET07                                                    | Itapoá                         | Itapoá                                    | 26°11'24.0"S               | Itapoá                                      | 26°11'24.0"S               |
|                                                         |                                |                                           | 48°36'36.0"W               |                                             | 48°36'36.0"W               |

Fonte: A Autora

Para elaboração de discussões sobre casos de elevação e rebaixamento do nível do mar, relacionados à atuação de sistemas meteorológicos, também foram utilizadas cartas sinóticas disponíveis no site da Marinha do Brasil

(<https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-smm-cartas-sinoticas/cartas-sinoticas>), que estão organizadas em horários 00h e 12h por dia. As cartas foram baixadas de acordo com as datas estabelecidas e interpretadas de acordo com a presença de forçantes objetivos do trabalho.

Considerando a data em que todos os equipamentos entraram em funcionamento e as séries temporais mais longas disponíveis para todas as estações, foi considerado para o presente trabalho o período de 01 de Maio (00:00) de 2018 à 31 de Agosto (23:59) de 2019.

É importante ressaltar que os dados de maré costumam ser acompanhados de falhas e valores espúrios, ocasionados pela dificuldade em se obter essas observações, levando-se em consideração o ambiente aquático, duração da série necessária, locais de difícil acesso, custo de equipamentos e segurança. Devido a essas dificuldades se faz necessário o uso de correções automáticas ou manuais sobre os dados ou até mesmo o descarte de períodos com dados espúrios.

Cabe enfatizar também que algumas estações estão instaladas no interior de canais ou em áreas mais abrigadas pela própria necessidade de se manter a segurança dos equipamentos e facilitar a manutenção dos mesmos, porém este fato confere certa distorção quando consideramos que esses dados representam a ação da maré e dos dados meteorológicos na costa.

Eloi F<sup>o</sup> (2017), que utilizou um marégrafo no interior da Lagoa dos Patos - RS para representar a costa do Estado do RS, expõe que os dados são considerados válidos para este tipo de estudo, já que se considera que as flutuações não-astronômicas (mais vinculadas à maré meteorológica) tem uma periodicidade longa, o que não afeta essa extrapolação para regiões externas aos canais e áreas abrigadas.

As séries são analisadas, estatisticamente, quanto a médias, valores extremos, variâncias e desvios-padrão, colaborando para eliminação de valores espúrios. Testes de correlação são necessários para se definir quais variáveis atmosféricas de cada local são mais importantes para serem inseridas como dados de entrada para aplicação nas equações (SPERB, 2003), ou até mesmo a ordem de introdução dessas variáveis.

Em resumo, os dados maregráficos e meteorológicos cedidos da região costeira de Santa Catarina, servem como base para inferências sobre as variáveis climáticas que mais atuam e são importantes para cada região. As séries de dados maregráficas e meteorológicas foram utilizadas para: (i) análise exploratória; (ii) manipulação em modelos matemáticos com regressões não lineares múltiplas e algoritmos genéticos e (iii) teste da qualidade de previsão em série dos níveis não-astronômicos.

#### **4.3. Modelo**

O objetivo primário da modelagem de processos físicos nas ciências atmosféricas e hidrológicas é a previsão de uma variável no tempo e/ou espaço a partir de um determinado conjunto de variáveis de entrada (LEGATES, 1999). Nesse sentido, o autor propõe que o desenvolvimento de um modelo se dá através das etapas de treinamento e teste.

O treinamento de um modelo matemático é o processo de ajuste dos parâmetros para que ele represente bem o processo objetivo, condizente com a realidade observada. Nesta etapa é necessário um conjunto de dados observados e as respectivas condições iniciais e variáveis a serem inseridas. A partir do treinamento, realizado com um conjunto de dados observados, a fase de teste consiste em testar ou avaliar o desempenho do modelo.

Tanto no treinamento e no teste dos modelos, é necessário um critério para demonstrar seu desempenho e/ou comparação (para as diferentes estações). Quando se compara um conjunto de  $n$  dados observados ao conjunto correspondente de  $n$  dados simulados ou preditos, geralmente utilizam-se parâmetros para quantificar a semelhança entre os dois. Resumidamente, o que se procura no treinamento é ajustar parâmetros iniciais do modelo para se obter o maior grau de semelhança possível.

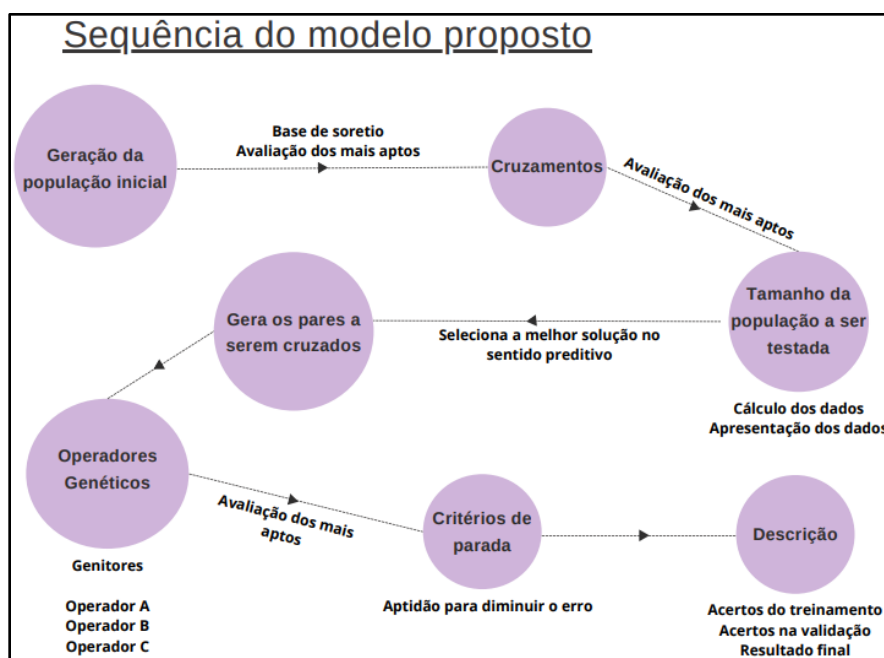
No presente trabalho, foi proposto um modelo híbrido envolvendo a técnica estatística de Regressão não Linear Múltipla associada ao algoritmo de IC denominado de Algoritmo Genético.

A figura 9 ilustra a representação do modelo proposto no trabalho. Com a

realização de um sorteio, cria-se uma população inicial com as variáveis adicionadas, avaliando a melhor aptidão em se aproximar da resposta do dado horário observado, sendo a resposta da função aplicada em determinadas horas.

As melhores respostas são selecionadas e determina-se os pares a serem cruzados e o tamanho da população que se deseja atingir. Esses resultados são cruzados e os operadores genéticos equilibram os pares (genitores) mais aptos. Se os resultados apresentarem qualidade suficiente, determinada de acordo com a programação de diminuir o erro, é armazenada. Caso não atinja níveis satisfatórios, outra combinação é realizada.

**Figura 9** - Representação do modelo utilizado no presente trabalho, baseado em regressão não linear múltipla e algoritmo genético.



Fonte: A Autora

A ferramenta escolhida para implementação do modelo proposto foi o MatLab (versão 2020b), por oferecer um pacote de funções que trabalham com equações e série de dados suficientes para os testes iniciais.

As séries com os dados do modelo proposto foram obtidas em formato csv, contendo 11718 observações horárias, para cada uma das 8 variáveis descritas na seção 4.2 (nível do mar instantâneo, maré astronômica prevista, nível do mar não-astronômico, pressão atmosférica instantânea, velocidade do vento, direção do

vento e componentes zonal e meridional do vento), para cada uma das 7 estações maregráficas, totalizando aproximadamente 656208 informações numa mesma planilha.

Para o conjunto de testes foram separadas aleatoriamente 2000 observações horárias, ou aproximadamente 30% dos dados, com o objetivo de que esses dados não sejam utilizados pelo algoritmo na fase de treinamento, e sim apenas na fase de teste de eficiência.

O modelo foi estruturado considerando as variações no tamanho da população, na quantidade de dados horários para validação do modelo, no número de interações, na porcentagem do operador de cruzamento, no tamanho da população em cada execução e na quantidade de dados horários em cada execução.

Foram realizados testes para se avaliar em qual configuração o modelo apresentaria melhores condições de operação. Segundo Truccolo (1998), a melhor configuração de modelo será aquela que conseguirá minimizar o erro quadrático médio. Na tabela 2, se apresenta a variedade dos valores testados até que se atinja um nível satisfatório, considerando o tempo de execução e a resposta objetivo do modelo.

**Tabela 2** - Valores testados para configuração do modelo.

| <b>Configurações do modelo para teste</b> |           |
|-------------------------------------------|-----------|
| Réplicas                                  | 1 - 100   |
| Marégrafo                                 | M01 - M07 |
| Tamanho da população                      | 50 - 2000 |
| Pontos para teste                         | 50 - 2000 |
| Iterações                                 | 5 - 100   |
| % operador                                | 0,2 - 1,0 |
| Pontos em cada execução                   | 20 - 50   |
| Tamanho da população em cada execução     | 0 - 200   |

Fonte: A Autora

#### 4.4. Avaliação estatística

A performance do modelo em relação aos dados observados geralmente é determinada através de comparações entre os valores simulados pelo modelo e as observações (LEGATES, 1999). Esta medida é importante tanto para a avaliação da aplicação do modelo como também para a padronização de resultado das estações para comparação entre elas. A seguir são descritos os parâmetros estatísticos utilizados neste estudo para avaliação do modelo.

De acordo com Wilks (2006) o erro médio (EM), o erro médio absoluto (EMA) e o erro quadrado médio (EMQ) são métodos bastante apropriados para verificação da acurácia ou exatidão escalar de dados estimados ( $e$ ) em relação aos observados ( $o$ ) em uma amostra com  $N$  pares de  $i$  de dados, sendo descritos pela equação (3).

$$EM = N^{-1} \sum_{i=1}^N (o_i - e_i) \quad (3)$$

Analisando a Eq. (3), verifica-se que diferenças positivas ( $o > e$ ) tendem a anular diferenças negativas ( $o < e$ ). A fim de evitar esse possível erro, utilizam-se os valores absolutos das diferenças (Eq. 4):

$$EMA = N^{-1} \sum_{i=1}^N |o_i - e_i| \quad (4)$$

A Eq. (5) pode, segundo Wilks (2006), ser interpretada como a magnitude do erro inerente à estimativa de uma amostra de dados.

$$EMQ = N^{-1} \sum_{i=1}^N (o_i - e_i) (o_i - e_i)^2 \quad (5)$$

A cada rodada do modelo os resultados são apresentados em variáveis como: “Tempo (s)” - que representa o tempo de processamento naquela rodada. “Erro médio do modelo harmônico tradicional” - que representa a soma do quadrado de todos os erros do nível do mar previsto harmonicamente. “Erro médio do modelo proposto” - apresenta a soma do quadrado de todos os erros do nível do mar previsto pelo presente modelo.

Já o “Ganho pelo modelo proposto (%)” representa a porcentagem de ganho com a utilização do modelo em relação à previsão tradicional harmônica. “Perdas

pelo modelo proposto”, “Ganhos pelo modelo proposto” - são valores absolutos dos pontos onde o modelo proposto perde acurácia em relação ao método harmônico e, o oposto, quando o modelo proposto supera os acertos do modelo harmônico.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Pré-processamento dos dados

Como primeira etapa do estudo, foi realizada uma triagem visando o descarte de dados faltantes ou espúrios. Quando apresentado um ou mais dados faltantes, o dado horário como um todo foi excluído (todas as variáveis daquela hora). As séries maregráficas foram analisadas, estatisticamente, quanto a médias, valores extremos, variâncias e desvios-padrão, avaliando-se a existência de valores espúrios que viessem a comprometer a qualidade das informações.

Os dados meteorológicos também foram verificados para o mesmo propósito. Como resultado, o total de dados não utilizados foi 28466, representando 4,35% do total. A tabela 3 resume a quantidade dos dados não utilizados por estação e variável meteoceanográfica utilizada.

**Tabela 3** - Quantidade e porcentagem dos dados não utilizados por estação e total.

| Total de dados horários: 11.718                  |                      |                             |                    | Total geral: 653.738   |                       |               |               |               |
|--------------------------------------------------|----------------------|-----------------------------|--------------------|------------------------|-----------------------|---------------|---------------|---------------|
| ET                                               | Dados não utilizados | Nível do mar observado (cm) | Pressão atm. (hPa) | Velocidade vento (m/s) | Direção vento (graus) | Comp. u'      | Comp. v'      | Total         |
| ET01                                             | n<br>% do total      | 1943<br>16.58               | 318<br>2.17        | 485<br>4.14            | 485<br>4.14           | 485<br>4.14   | 485<br>4.14   | 4201<br>0.64  |
| ET02                                             | n<br>% do total      | 119<br>1.02                 | 11718<br>100.00    | 39<br>0.33             | 39<br>0.33            | 39<br>0.33    | 39<br>0.33    | 11993<br>1.83 |
| ET03                                             | n<br>% do total      | 20<br>0.17                  | 140<br>1.19        | 140<br>1.19            | 625<br>5.33           | 625<br>5.33   | 625<br>5.33   | 2035<br>0.31  |
| ET04                                             | n<br>% do total      | 21<br>0.18                  | 16<br>0.14         | 16<br>0.14             | 16<br>0.14            | 16<br>0.14    | 16<br>0.14    | 101<br>0.02   |
| ET05                                             | n<br>% do total      | 20<br>0.17                  | 1113<br>9.50       | 17<br>0.15             | 17<br>0.15            | 17<br>0.15    | 17<br>0.15    | 1188<br>0.18  |
| ET06                                             | n<br>% do total      | 25<br>0.21                  | 4<br>0.03          | 535<br>4.57            | 535<br>4.57           | 535<br>4.57   | 535<br>4.57   | 2169<br>0.33  |
| ET07                                             | n<br>% do total      | 21<br>0.18                  | 1250<br>10.67      | 1377<br>11.75          | 1377<br>11.75         | 1377<br>11.75 | 1377<br>11.75 | 6779<br>1.04  |
| <b>Total = 28466</b><br><b>% do total = 4,35</b> |                      |                             |                    |                        |                       |               |               |               |

Fonte: A Autora.

A tabela 4 mostra o resultado da estatística descritiva dos dados de nível do mar. A média do nível do mar instantâneo observado variou de 42 a 91 cm aproximadamente, com o máximo encontrado para a estação 07 (ET07) com 233 cm e para a estação 03 (ET03) com 45 cm.

Para a maré astronômica (Est), o nível do mar variou em média de 43 cm a 83 cm, com máximo de 187 cm para ET07 e mínimo de -14 cm na mesma estação. Ressalta-se também que, em geral, para a maioria dos parâmetros estatísticos analisados, os valores tendem a se elevar desde as estações localizadas mais ao sul em direção a norte. Esse padrão caracteriza a maior variabilidade climática sobre o litoral norte de SC.

**Tabela 4** - Análise exploratória de N (total de dados), N\* (dados descartados), Média, EP Média (erro padrão da média), desvio padrão (DesvPad), valor Mínimo, Primeiro Quartil (Q1), Mediana, Terceiro Quartil (Q3) e Valor Máximo dos dados de nível do mar (cm) observado (Med) e estimado harmonicamente (Est).

#### Estatísticas

| Variável | N     | N*   | Média  | EP Média | DesvPad | Mínimo  | Q1     | Mediana | Q3      | Máximo  |
|----------|-------|------|--------|----------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|
| ET01_Med | 9747  | 1965 | 42,033 | 0,214    | 21,128  | -40,000 | 29,000 | 43,000  | 55,080  | 148,000 |
| ET02_Med | 11593 | 119  | 61,036 | 0,241    | 25,945  | -35,000 | 44,500 | 60,600  | 77,700  | 175,500 |
| ET03_Med | 11692 | 20   | 50,680 | 0,230    | 24,895  | -45,600 | 35,000 | 51,000  | 66,700  | 149,700 |
| ET04_Med | 11691 | 21   | 57,235 | 0,247    | 26,681  | -42,700 | 39,300 | 57,300  | 75,000  | 165,900 |
| ET05_Med | 11692 | 20   | 69,184 | 0,284    | 30,723  | -34,000 | 48,100 | 69,000  | 89,600  | 174,100 |
| ET06_Med | 11687 | 25   | 77,922 | 0,305    | 33,001  | -26,000 | 55,000 | 77,000  | 100,000 | 206,000 |
| ET07_Med | 11691 | 21   | 91,238 | 0,381    | 41,197  | -27,900 | 61,600 | 89,600  | 119,900 | 233,600 |
| ET01_Est | 11712 | 0    | 43,159 | 0,0747   | 8,089   | 16,000  | 38,000 | 43,000  | 49,000  | 69,000  |
| ET02_Est | 11712 | 0    | 57,954 | 0,141    | 15,247  | 8,000   | 48,000 | 59,000  | 69,000  | 98,000  |
| ET03_Est | 11712 | 0    | 48,047 | 0,160    | 17,361  | -12,000 | 37,000 | 49,000  | 60,000  | 91,000  |
| ET04_Est | 11712 | 0    | 53,435 | 0,189    | 20,448  | -9,000  | 40,000 | 54,000  | 68,000  | 111,000 |
| ET05_Est | 11712 | 0    | 62,465 | 0,234    | 25,373  | 0,000   | 44,000 | 62,000  | 79,000  | 133,000 |
| ET06_Est | 11712 | 0    | 68,746 | 0,265    | 28,670  | -7,000  | 48,000 | 68,000  | 88,000  | 149,000 |
| ET07_Est | 11712 | 0    | 83,061 | 0,344    | 37,176  | -14,000 | 56,000 | 82,000  | 109,000 | 187,000 |

Fonte: A Autora.

O [APÊNDICE A](#) apresenta a análise exploratória para as variáveis magnitude e direção da velocidade máxima do vento e pressão atmosférica.

Após as análises exploratórias, o nível não-astronômico para cada local foi obtido simplesmente subtraindo a série temporal da maré astronômica da maré bruta observada (MELO F<sup>o</sup>, 2017; TRUCCOLLO, 1998). Os dados foram testados

no modelo, primeiramente brutos, sem tratamento baseados em filtros e em seguida com filtro de média móvel, na tentativa de suavizar a série de dados.

Para as séries maregráficas não se observou maior qualidade na previsão do modelo com aplicação de filtro, então optou-se pelo uso da série bruta, até mesmo para se considerar facilitar a aplicação do modelo no sentido prático de automatização.

## 5.2. Análise meteorológica

Inicialmente, o padrão do comportamento da velocidade e direção do vento foi analisado individualmente, através dos dados das estações de Itapoá (ET01), Balneário Barra do Sul (ET02), Itajaí (ET03), Florianópolis (ET04), Imbituba (ET05), Jaguaruna (ET06) e Arroio do Silva (ET07). Foi utilizado o gráfico de rosa dos ventos para melhor visualização da relação entre intensidade e direção das velocidades máximas do vento nessas regiões, entre 2018 e 2019. A figura 10 ilustra os resultados do comportamento individual, que são:

- ET01 - Passos de Torres: Com aproximadamente 20% do total das ocorrências, a direção Leste foi a predominante para Passos de Torres, seguido de pouco mais de 15% da direção Sul e 10% de Nordeste e Oeste. A intensidade média das ocorrências foi de 6,96 m/s.
- ET02 - Balneário Rincão: Com 20% do total das ocorrências, a direção Leste foi a predominante para Balneário Rincão, seguido de aproximadamente 20% da direção Oeste e aproximadamente 13% de Sul. A intensidade média das ocorrências foi de 5,18 m/s;
- ET03 - Imbituba: Com aproximadamente 36% do total das ocorrências, a direção Norte foi a predominante para Imbituba, seguido de aproximadamente 18% da direção Sul e aproximadamente 14% de Nordeste. A intensidade média das ocorrências foi de 6,48 m/s.
- ET04 - Florianópolis: Com 29,41% do total das ocorrências, a direção Norte foi a predominante para Florianópolis, seguido de aproximadamente 26% da direção Sul e aproximadamente 16,40% de Leste. A intensidade média das ocorrências foi de 4,07 m/s. Dados que corroboram com Dalbosco et al (2020) onde citam que, o sistema oceânico fixo de alta pressão que gera uma

predominância de ventos do quadrante nordeste é interrompido durante a entrada de frentes frias (sistemas frontais) com ventos do quadrante sul.

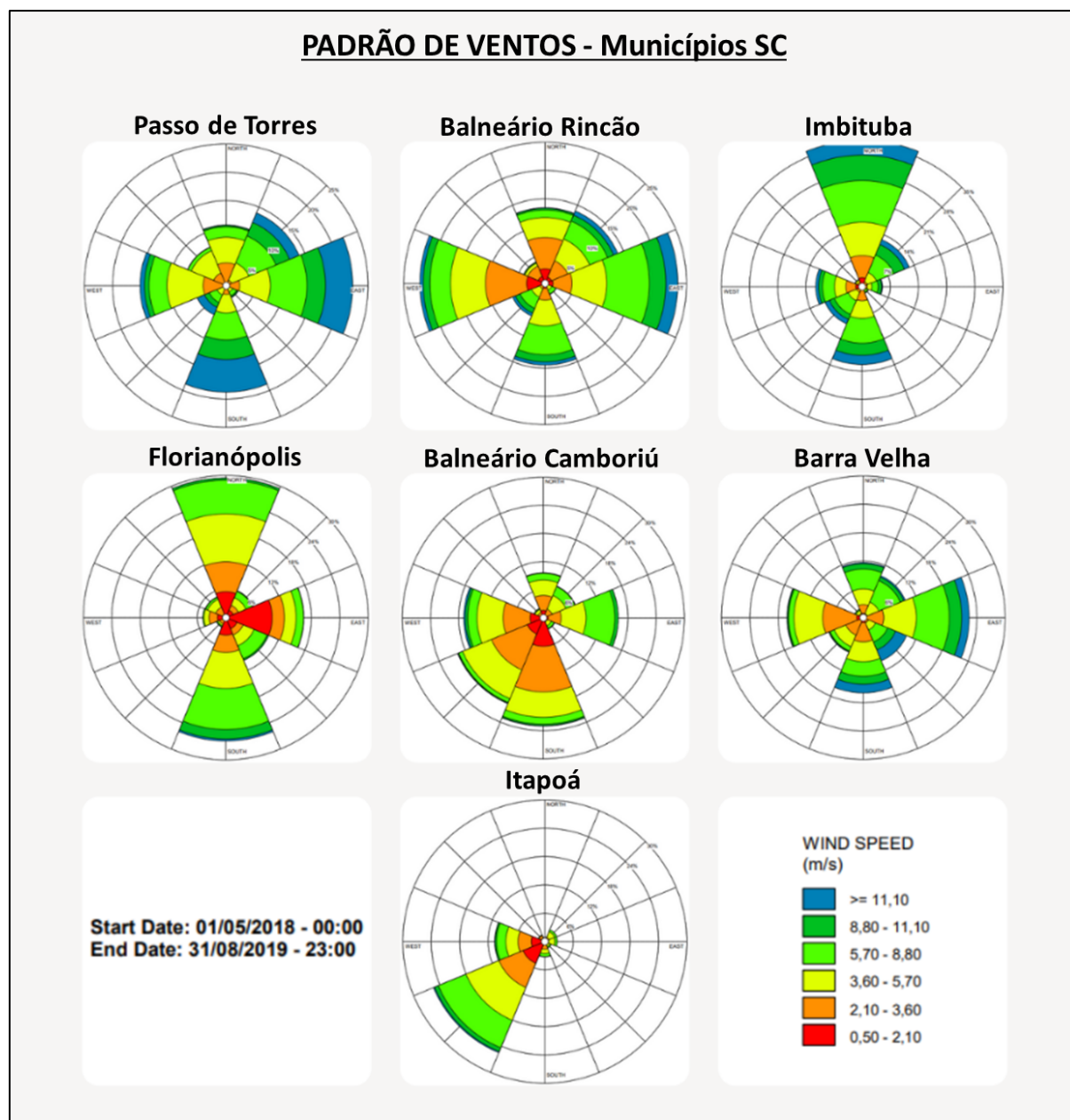
- ET05 - Balneário Camboriú: Com aproximadamente 23% do total das ocorrências, a direção Sul foi a predominante para Balneário Camboriú, seguido de aproximadamente 20% da direção Sudoeste e aproximadamente 17% de Oeste. A intensidade média das ocorrências foi de 3,84 m/s.
- ET06 - Barra Velha: Com 22,33% do total das ocorrências, a direção Leste foi a predominante para Barra Velha, seguido de aproximadamente 16,08% da direção Oeste e 15,91% de Sul. A intensidade média das ocorrências foi de 5,66 m/s.
- ET07 - Itapoá: Com aproximadamente 26% do total das ocorrências, a direção Sudoeste foi a predominante Itapoá, seguido de aproximadamente 11% da direção Oeste e aproximadamente 4% de Sul. A intensidade média das ocorrências foi de 2,26 m/s. Apenas 48% dos dados de Itapoá foram avaliados, sendo o restante registrado como zero ou dado faltante.

Em uma avaliação geral dos dados, pode-se observar a não uniformidade das direções e intensidade dos ventos nas estações do estudo. Porém, observa-se as maiores intensidades nas três primeiras regiões, mais ao sul.

Imbituba e Florianópolis predominam as direções do vento de sul e norte, já as estações de Passo de Torres, Balneário Rincão e Barra Velha predominam direções de leste e oeste. Balneário Camboriú apresenta variações de sul a oeste e a estação de Itapoá apenas de sudoeste e oeste, provavelmente devido a baixa quantidade de dados avaliados.

A quantidade de dados de ventos mais intensos ocorre em Passo de Torres (maiores que 11,10 m/s) e os menos intensos em Balneário Camboriú (até 3,6 m/s).

**Figura 10** - Gráficos do padrão de direção (colaterais e subcolaterais) e intensidade do vento (m/s) das 07 estações.



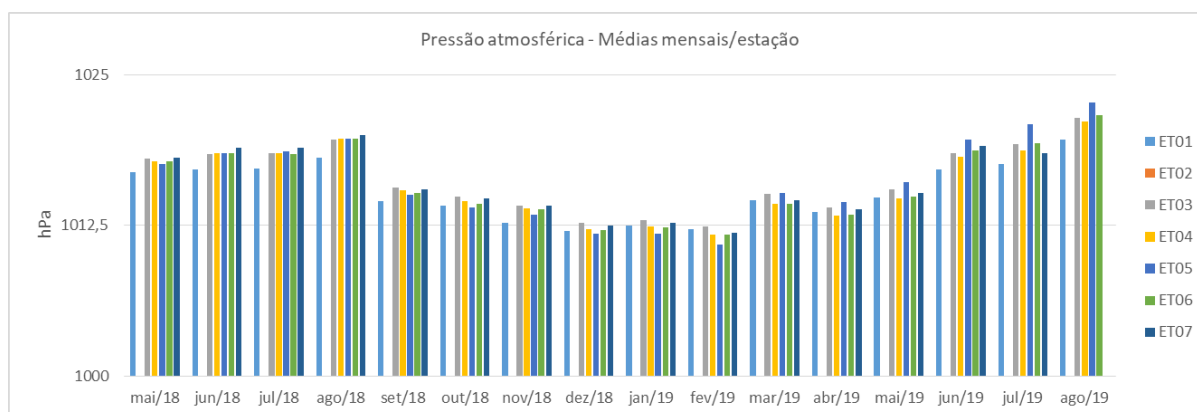
Fonte: A Autora.

Os dados de pressão atmosférica são apresentados em valores médios mensais para cada uma das 7 estações (Fig. 12), sendo que os dados da ET02 não apresentaram valores representativos e foram descartados da análise.

A partir das observações de Vianello e Alves (1991), através da identificação dos ciclos sazonais de altas (baixas) pressões no inverno (verão) na série de dados, pode-se inferir que a área de estudo em questão se encontra sob influência do

Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que migra, ou se expande, para o continente durante o inverno e permanece circunscrito às regiões oceânicas no verão. Neste sentido, as baixas pressões registradas durante o verão, quando é esperado que o ASAS se encontre sobre o oceano, proporcionam as condições de circulação atmosférica regional propícias à manifestação do efeito do transporte de Ekman, possivelmente favorecendo o nível não-astronômico negativo na região costeira.

**Figura 11** - Gráfico dos valores médios mensais da pressão atmosférica (hPa) para as 07 estações. A estação 02 não apresentou dados viáveis para representação.



Fonte: A Autora.

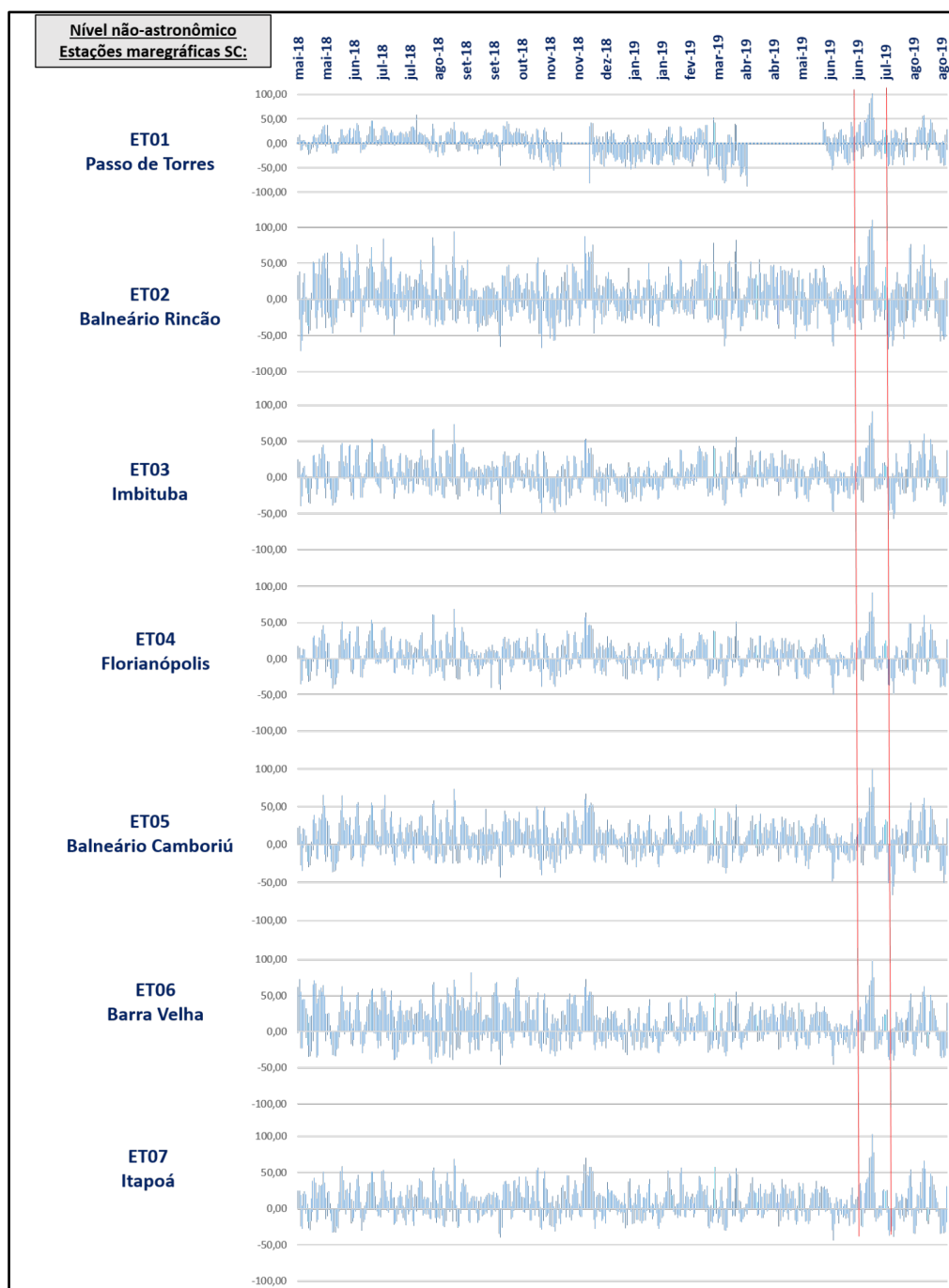
Rodrigues *et al.* (2004), Oliveira (1986), Lemos & Calbete (1996) e Justi da Silva & Silva Dias (2002), verificaram a atuação das frentes frias, no litoral de Santa Catarina, em todas as épocas do ano. A trajetória típica de deslocamento das frentes frias é, de sudoeste para nordeste, durante 3 dias em média, ao longo do litoral sul e sudeste do Brasil.

Oliveira (2022) em pesquisa mais recente, encontrou período médio de atuação em 4 dias, com a maior frequência mensal entre junho e novembro, nas estações de inverno e primavera.

Com objetivo de avaliar os eventos influenciados por forçantes atmosféricas, investigou-se o episódio da passagem de sistema frontal sobre a Região Sul do Brasil entre o final de junho e início de julho de 2019. A região entre as linhas vermelhas da figura 12 ilustra essa situação, onde verifica-se uma clara elevação do nível não astronômico em todas as estações.

Este evento individual, identificado como desnível positivo, foi definido como um pico/cavado na série temporal do nível não-astronômico (MELO Fº, 2017). O período foi selecionado baseado na altura significativa do evento (mais elevada da série) e pela presença do desnível positivo em todas as estações simultaneamente.

**Figura 12** - Gráficos dos valores do nível não-astronômico (resíduo da diferença entre os valores observados e os previstos pela previsão harmônica), para todas as estações. Período destacado no gráfico de final de junho a início de julho de 2019.



Fonte: A Autora.

Em complemento, foram analisadas cartas sinóticas obtidas no site da Marinha do Brasil, dos dias 29/06 (00h) até 08/07/2019 (12h), demonstrando a passagem de dois sistemas frontais sobre a região sul da América do Sul. Além das cartas sinóticas, a média dos dados, das forçantes atmosféricas, durante este período atenderam aos requisitos propostos por Truccolo em 1998:

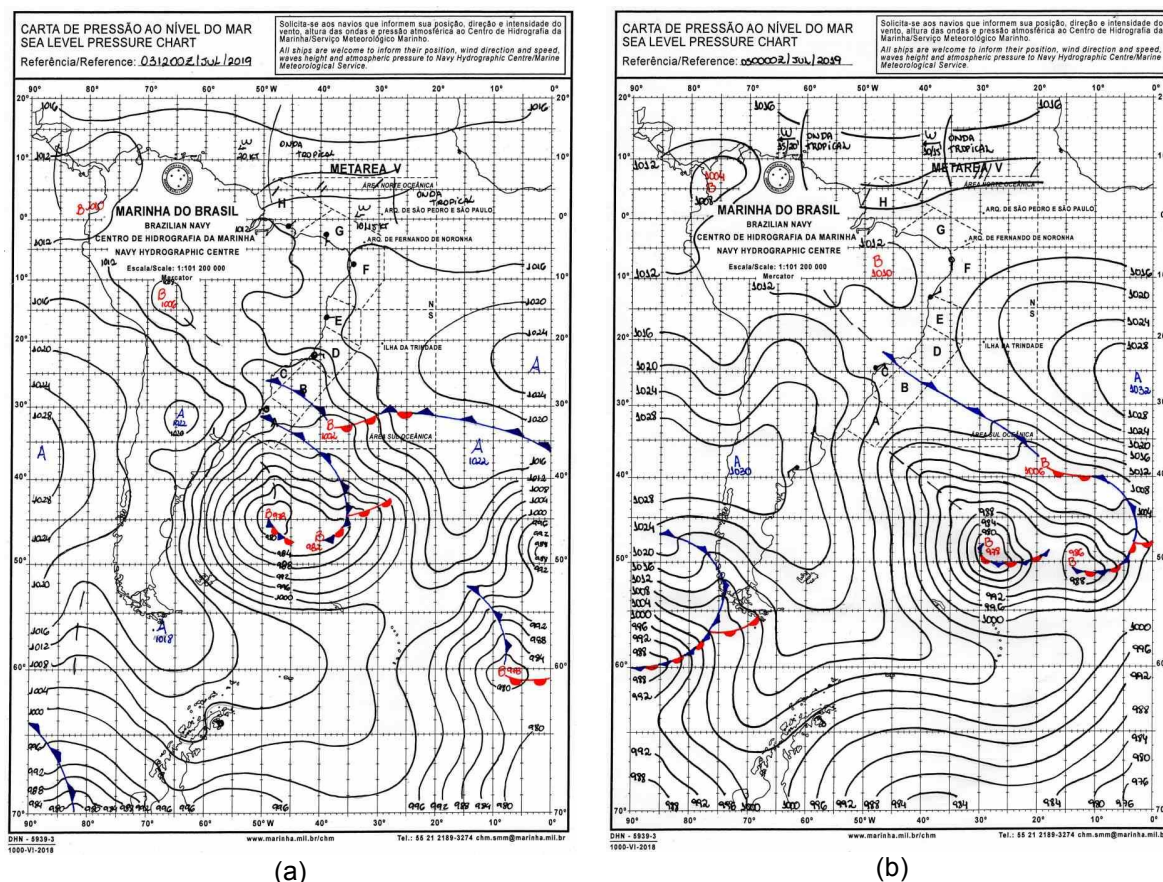
*“Com a aproximação da frente fria, a velocidade média do vento é de 5 m/s no setor quente da frente, apresentando uma rotação anti-horária de nordeste para noroeste. Durante a permanência da frente, logo após a pressão atmosférica chegar ao seu valor mínimo, o vento passa a soprar do quadrante sul com uma velocidade média de 8 m/s no setor frio. Aproximadamente 1 dia após a passagem da frente o vento volta a soprar de nordeste, com o retorno do Anticiclone do Atlântico Sul. A duração média de uma frente fria é de 2 a 3 dias, com intervalo de tempo consecutivo entre as frentes de 6 a 11 dias, e a velocidade média de propagação é de 500 km/dia”*

Com a observação das cartas sinóticas (Fig. 13), pode-se observar a incidência de duas frentes frias sobre a região sul de Santa Catarina, no período selecionado. Entre os dias 03 e 05 de julho de 2019, um centro de baixa pressão está sob o oceano, movimentando-se gradualmente sobre o continente com uma direção de 45° em relação ao Norte.

Em complemento, um centro de alta pressão mantém-se sobre o continente, porém a ASAS se desloca mais para a parte oriental do oceano. No próximo dia (Fig. 13b) já se observa o domínio do centro de alta sobre o continente, e uma outra frente se propagando em direção à região de estudo.



**Figura 13** - Cartas sinóticas para representação da passagem de sistemas frontais sobre a região do estudo (litoral de Santa Catarina) em 12Z de 03/07/2019 (a) e 00Z de 05/07/2019 (b).



Fonte: Web - Marinha do Brasil. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-smm-cartas-sinoticas/cartas-sinoticas>>

Quando os sistemas frontais passam sobre áreas oceânicas, os gradientes horizontais da pressão atmosférica e as tensões do vento associados com estes sistemas induzem oscilações do nível d'água que devem estar defasadas temporalmente na sua resposta à estas forçantes, já que existe uma inércia do movimento na água (TRUCCOLO, 1998).

Através desta verificação, pode-se assumir que os fenômenos estão relacionados. Sugere-se como evidência que a passagem de sistemas atmosféricos, como as frentes frias, podem alterar o nível do mar, mesmo entendendo que essa dinâmica não seja direta e independente de outros fatores.

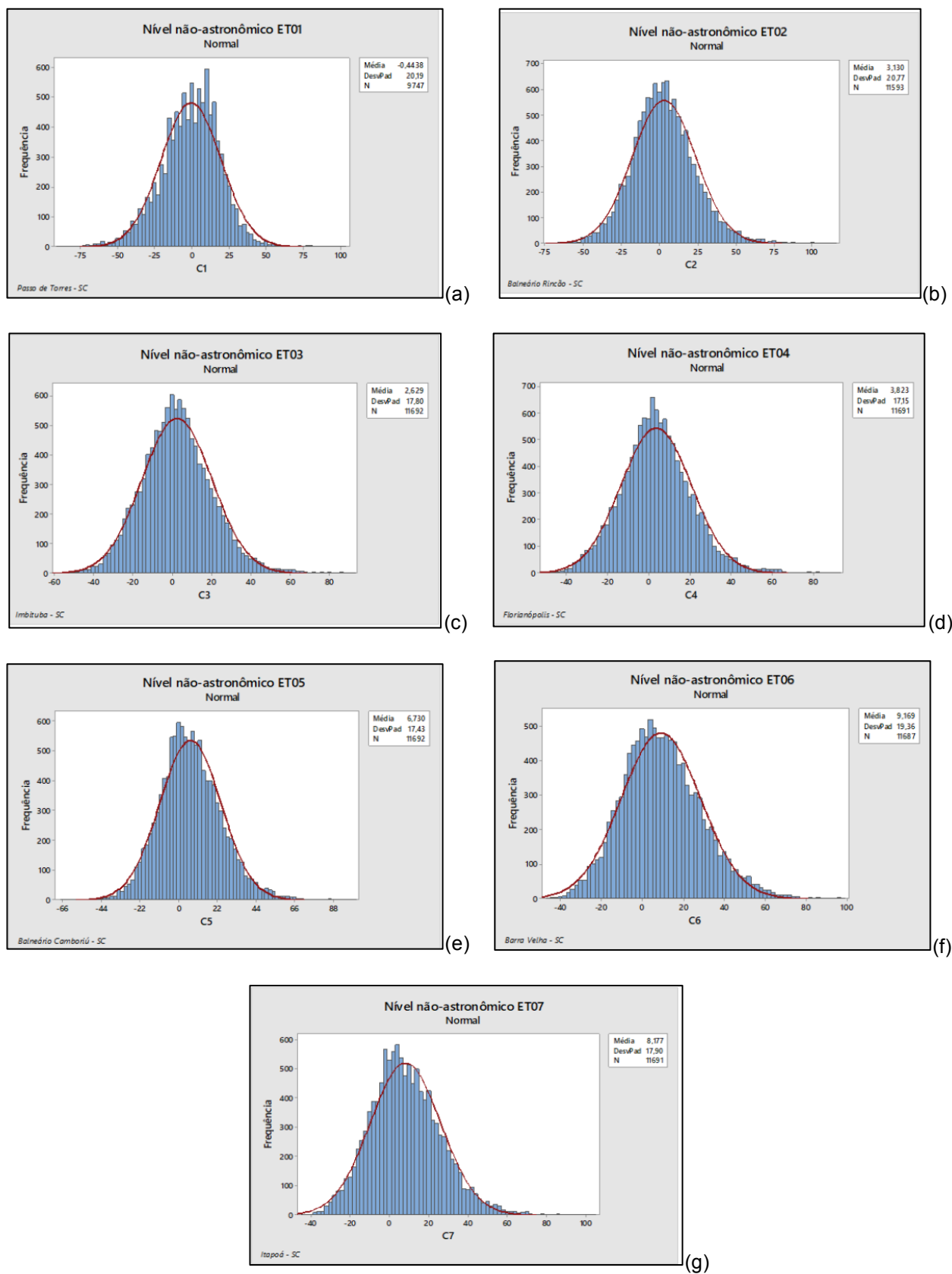
### 5.3. Dados maregráficos

A figura 14 apresenta os resultados (histogramas) da subtração da maré astronômica dos dados da maré bruta observada, denominados de nível não-astronômico. Estes resultados foram utilizados para avaliar estatisticamente a ocorrência de eventos positivos (sobre-elevação) e negativos (rebaixamento) em relação ao nível do mar.

De forma geral, observa-se que as variações dos níveis entre positivos e negativos aparenta ser relativamente equivalentes, tanto em amplitude como em número de ocorrências. Porém, pode-se notar uma leve assimetria para direita, valores positivos em relação a cauda esquerda, o que não ocorre apenas para a estação 01 - Passo de Torres. Em resumo pode-se constatar que os eventos positivos e negativos se equivalem, porém, os positivos atingem valores maiores que os negativos.

Em relação aos eventos positivos e negativos, Eloi F<sup>o</sup> (2017) comenta em sua tese que, embora haja uma equivalência na quantidade dos eventos, os eventos positivos são muito mais notados que os eventos negativos em vista das consequências adversas de um nível do mar elevado. Embora os eventos de um nível negativo interfiram na diminuição do calado para navegação, por exemplo, ainda sim podem passar despercebidos do público em geral.

**Figura 14** - Histogramas do nível não-astronômico (NnA) para as 07 estações. Eixo y: frequência de ocorrência e eixo x: altura (cm). a) Passo de Torres, b) Balneário Rincão, c) Imbituba, d) Florianópolis, e) Balneário Camboriú, f) Barra Velha e g) Itapoá.



Fonte: A Autora.

#### 5.4. Correlações

As tabelas 5 e 6 apresentam os cálculos de correlação e Valor-p entre as variáveis utilizadas no estudo (Fig. 5) e somente para os níveis não-astronômicos (NnA) para cada uma das sete estações avaliadas (Fig. 6). Em relação a figura 5, observa-se que não há correlações diretas aparentes entre as variáveis escolhidas para elaboração do trabalho, o que já é esperado devido a não dependência das variáveis. Os maiores valores de correlação são observados entre a direção do vento e a componente zonal ( $u'$ ) ( $r=-0.725$ ), seguido de  $u'$  e da componente meridional ( $v'$ ) ( $r=-0.531$ ).

Através da figura 6 observa-se que as maiores correlações entre os níveis não-astronômicos das estações são, respectivamente, entre ET05 e ET07 ( $r=0.926$ ), entre ET03 e ET04 ( $r=0.921$ ), entre ET04 e ET05 e ET04 e ET07 ( $r=0.916$ ). A ET01 foi a que apresentou as piores correlações com as demais estações, sendo aproximadamente  $r=0.6$  em todas as comparações.

Nota-se uma melhoria significativa nas correlações conforme a proximidade das estações aumenta, exceto para a estação ET07 e ET06, onde reduz na última correlação. Esse fato pode ser explicado devido ao deslocamento dos sistemas frontais de sul para norte. Em função disso as estações mais ao sul tendem sofrer o efeito da NnA antes, efeito este que se propaga para as estações subsequentes. Condição que justifica o uso da alimentação dos dados da estação atual com os dados das estações anteriores.

O valor-p é definido como a probabilidade de se observar um valor da estatística de teste maior ou igual ao encontrado (FERREIRA, 2015).  $p = 0,000$  significa que há 0% de chance de se observar correlação diferente entre os termos, dessa forma aceitamos a hipótese nula e concluímos que a correlação encontrada é estatisticamente significativa.

**Tabela 5** - Correlação entre as variáveis NnA (cm), pressão atmosférica (hPa), velocidade máxima do vento (m/s), direção do vento (graus) e componentes zonal e meridional ( $u'$  e  $v'$ ).

| Correlações                                            |                 |                 |                 |                 |                |
|--------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|
|                                                        | NnA             | Pressão atm     | Vel máx vento   | Dir vento       | u              |
| Pressão atm                                            | 0,162<br>0,000  |                 |                 |                 |                |
| Vel máx vento                                          | 0,078<br>0,000  | -0,073<br>0,000 |                 |                 |                |
| Dir vento                                              | 0,272<br>0,000  | 0,134<br>0,000  | -0,174<br>0,000 |                 |                |
| u                                                      | -0,367<br>0,000 | -0,095<br>0,000 | 0,141<br>0,000  | -0,725<br>0,000 |                |
| v                                                      | -0,371<br>0,000 | -0,104<br>0,000 | -0,320<br>0,000 | -0,334<br>0,000 | 0,531<br>0,000 |
| Conteúdo da Célula<br>Correlação de Pearson<br>Valor-p |                 |                 |                 |                 |                |

Fonte: A Autora.

**Tabela 6** - Correlação entre os níveis não-astronômicos das 07 estações.

| Correlação: NnA ET01; NnA ET02; NnA ET03; NnA ET04; ... 6; NnA ET07 |                |                |                |                |                |                |
|---------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Correlações                                                         |                |                |                |                |                |                |
|                                                                     | NnA ET01       | NnA ET02       | NnA ET03       | NnA ET04       | NnA ET05       | NnA ET06       |
| NnA ET02                                                            | 0,660<br>0,000 |                |                |                |                |                |
| NnA ET03                                                            | 0,696<br>0,000 | 0,813<br>0,000 |                |                |                |                |
| NnA ET04                                                            | 0,691<br>0,000 | 0,804<br>0,000 | 0,921<br>0,000 |                |                |                |
| NnA ET05                                                            | 0,631<br>0,000 | 0,727<br>0,000 | 0,859<br>0,000 | 0,916<br>0,000 |                |                |
| NnA ET06                                                            | 0,608<br>0,000 | 0,661<br>0,000 | 0,800<br>0,000 | 0,856<br>0,000 | 0,864<br>0,000 |                |
| NnA ET07                                                            | 0,610<br>0,000 | 0,704<br>0,000 | 0,844<br>0,000 | 0,916<br>0,000 | 0,926<br>0,000 | 0,876<br>0,000 |
| Conteúdo da Célula<br>Correlação de Pearson<br>Valor-p              |                |                |                |                |                |                |

Fonte: A Autora.

## 5.5. Resultados do modelo

### 5.5.1. Tempo de processamento

As informações sobre o tempo de execução do modelo, para cada estação, estão apresentadas a seguir (Fig. 15). Em geral, o tempo médio de execução oscilou entre 130 e 155 s. Os tempos de processamento, em geral, se apresentam bem próximos para as 06 estações. A mediana das réplicas é de, aproximadamente,

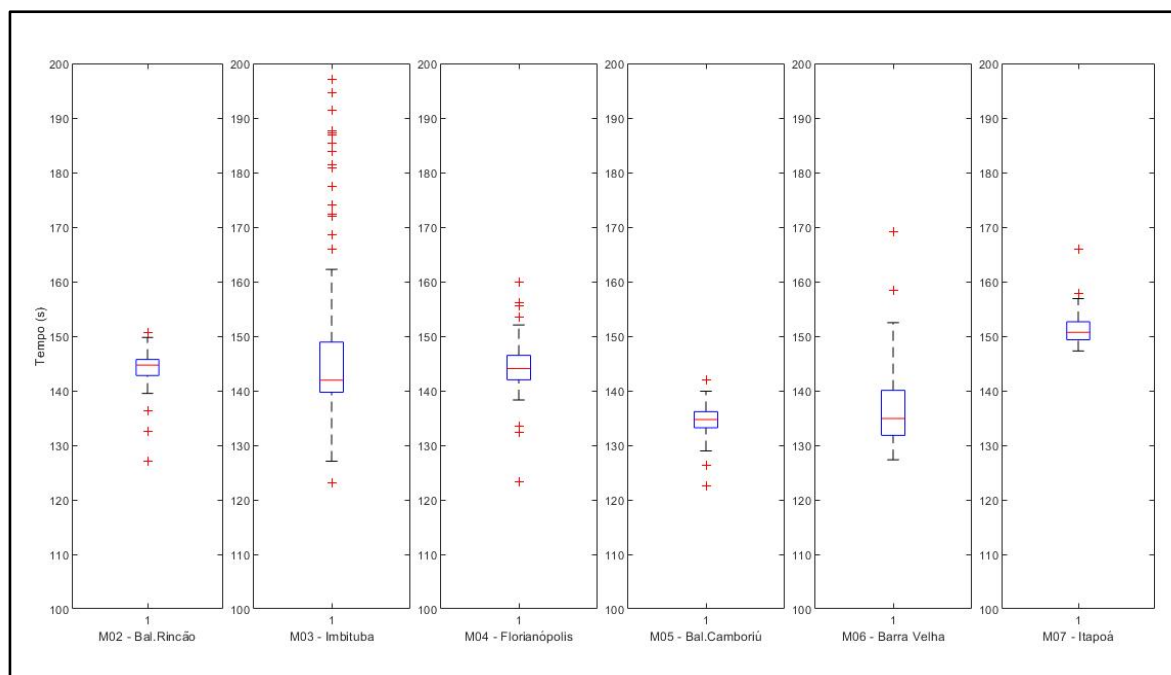
134 a 150 s, com apenas a estação de Imbituba com valores esporádicos acima de 170 s. As menores medianas são das estações de Balneário Camboriú e Barra Velha, e a maior na estação de Itapoá.

A velocidade de processamento indica que o modelo pode ser aplicado em centros operacionais, assim como atualizado com a inserção de novos dados de reproprocessamento. A variação nos tempos de processamento e *outliers* podem estar relacionados a quantidade de dados utilizados em cada estação, que variam conforme a qualidade dos dados que foram adquiridos, além do próprio poder computacional dedicado no momento do processamento.

Individualmente, para a ET02 (Balneário Rincão), a mediana encontra-se nos 144.7 s, sendo o máximo encontrado de 150,57 segundos e mínimo de 127.1 segundos, e tendo 5 *outliers* representados no gráfico. A ET03 (Imbituba) apresenta a mediana com 141.9 s, 196,99 e 123.1 como máximo e mínimo respectivamente e 17 *outliers*.

Para Florianópolis (ET04) tem-se a mediana com 144.1 s, 159.8 e 123.3 como máximo e mínimo respectivamente e 7 *outliers*. Na ET05 (Balneário Camboriú) a mediana se apresenta em 134.7 s, sendo o máximo e mínimo, respectivamente 142.1 e 122.6 s e 3 *outliers*. Para Barra Velha (ET06), a mediana se dá em 134.9 s e 169.2 e 127.3 como máximo e mínimo respectivamente e 2 *outliers*. Por fim, a ET07 (Itapoá) apresenta a mediana em 150.7 s, o máximo em 165.9 e mínimo em 147.3, sendo apenas 2 *outliers*.

**Figura 15** - Tempo (s) de execução das 100 réplicas para as sete estações utilizadas no estudo.



Fonte: A Autora.

### 5.5.2. Análise de desempenho do modelo

O desempenho do modelo pode ser avaliado pela comparação dos resultados obtidos das simulações com dados observados/previstos para um mesmo ponto (CZIZEWESKI & PIMENTA, 2017).

Nesse sentido, a figura 16 apresenta os gráficos comparativos das séries temporais do nível do mar sobrepostas do modelo harmônico de previsão, nível do mar observado e modelo proposto, para as estações ET02, ET03 e ET04. Nesta figura foram plotados os dados horários das primeiras 200 horas, com o objetivo de não sobrecarregar a rotina de criação dos gráficos, e principalmente, para não poluir a área do gráfico visando a melhor observação da diferença entre os modelos.

Para a estação de Balneário Rincão (ET02), pode-se observar pela figura 16a que, frequentemente, os modelos, preditivo harmônico e o proposto por este trabalho, subestimam o valor do nível do mar observado nas primeiras 30 horas e nas últimas 20 horas o modelo proposto corresponde melhor em comparação com o previsto harmonicamente, se aproximando mais das observações, porém não tem uma melhoria significativa no geral.

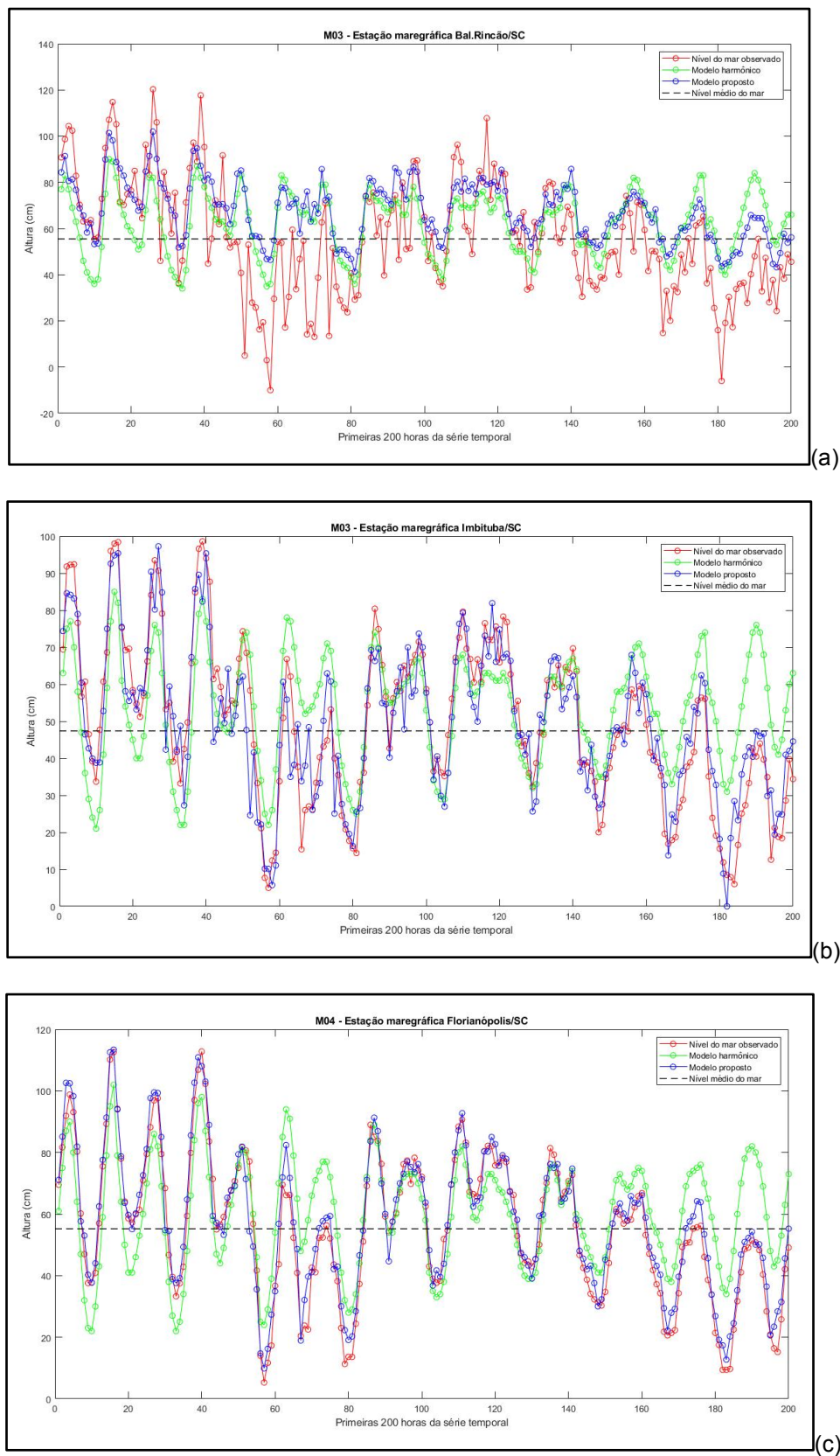
Na estação de Imbituba (Fig. 16b) observa-se uma melhora significativa na aproximação do nível previsto pelo modelo proposto e do nível do mar observado. Nas primeiras e nas últimas 40 horas da série fica evidente o maior distanciamento da curva da previsão harmônica e da aproximação das demais. A estação de Florianópolis (Fig. 16c) apresenta a melhor aproximação entre as curvas do modelo proposto e do nível observado, ficando evidente em quase toda a série.

A figura 17 apresenta os gráficos comparativos para as estações ET05, ET06 e ET07. Em Balneário Camboriú (Fig. 17a), assim como na ET04, também observa-se uma boa aproximação entre o modelo proposto e o nível do mar observado em toda a série das primeiras 200 observações.

Na estação de Barra Velha (Fig. 17b) pode-se observar uma melhora significativa no geral, com destaque para os valores observados abaixo do nível do mar, ou seja, para as variações negativas. Assim como em Florianópolis e Balneário Camboriú, a estação de Itapoá (Fig. 17c) apresenta uma boa melhora na predição dos valores do nível observado pelo modelo proposto. Consegue-se distinguir que as curvas do nível observado e do modelo proposto estão quase sempre mais alinhadas.

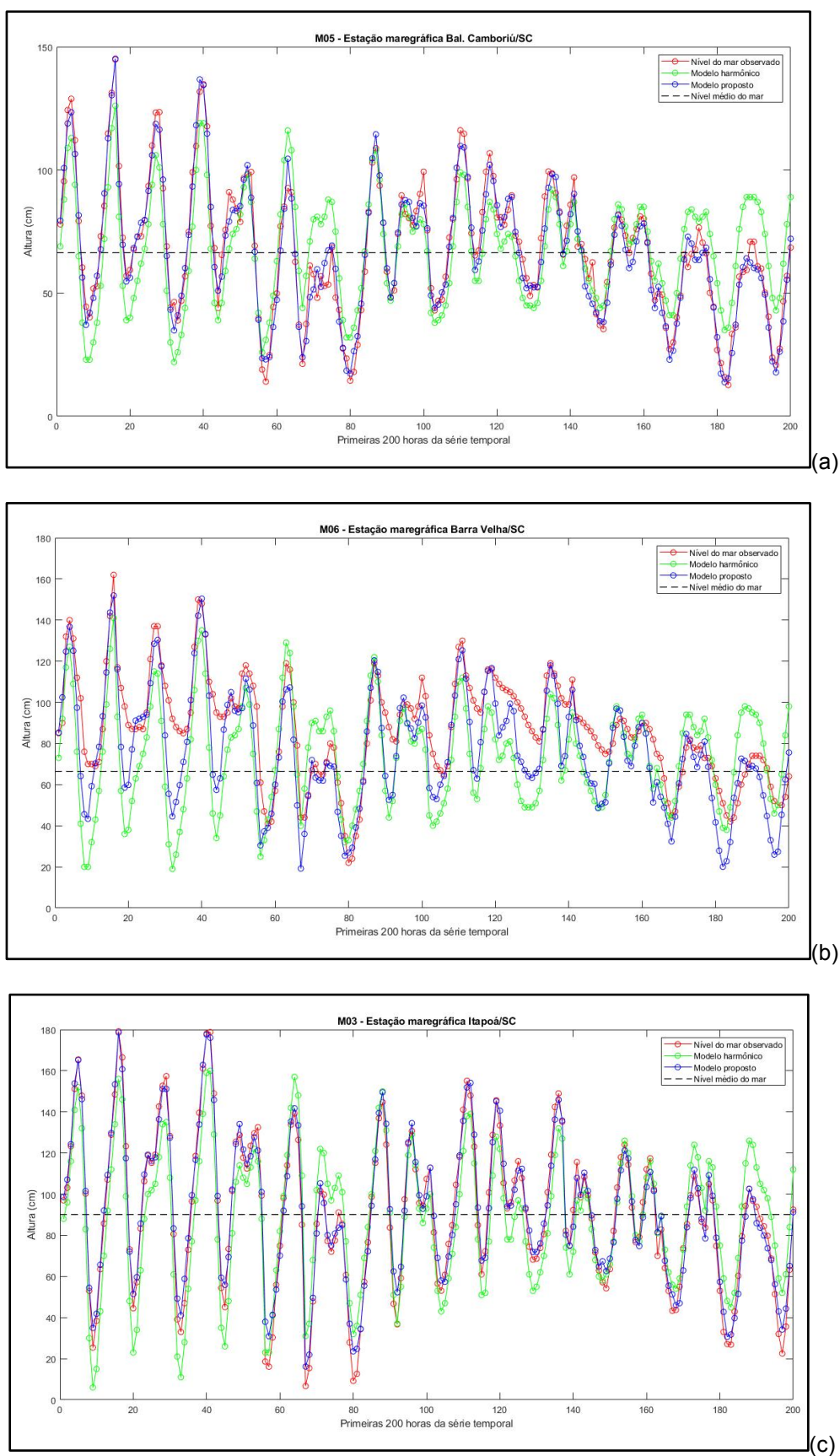
Ressalta-se ainda que, a análise das figuras 16 e 17 mostram claramente o avanço na melhoria da previsão do nível do mar pelo modelo proposto em relação ao modelo harmônico. Enquanto o modelo harmônico tende a extrapolar os picos máximos e mínimos das séries, o modelo proposto indica com mais precisão a inversão destas curvas.

**Figura 16** - Série comparativa das primeiras 200 horas entre os modelos do nível do mar observado (linha vermelha), harmônico (linha verde), proposto (linha azul) e nível do médio do mar (linha tracejada), para (a) ET02, (b) ET03 e (c) ET04.



Fonte: A Autora.

**Figura 17** - Como na figura 19, para as (a) ET05, (b) ET06 e (c) ET07.



Fonte: A Autora.

Os histogramas do erro médio, para cada estação, dos modelos harmônico e proposto, em relação ao nível do mar observado, são apresentados na figura 18. Os histogramas foram elaborados a fim de demonstrar as frequências abrangidas pelo erro médio das 7064 observações horárias.

Em geral, para todas as estações, os erros são menores no modelo proposto em relação ao modelo harmônico, sendo que o erro tende a ampliar nas estações mais ao norte de Santa Catarina.

O modelo proposto para a ET02 (Balneário Rincão), demonstra a redução dos erros do modelo proposto em comparação com o modelo harmônico de previsão tradicional, principalmente nas variações positivas acima de 40 cm. Concentrando mais os erros entre -20 e 20 cm (Fig. 18a).

O modelo proposto para os dados de Imbituba (Fig. 18b) apresentou uma evidente melhoria nos resultados para demonstração do nível do mar em comparação com a modelagem harmônica tradicional, principalmente nas variações positivas e negativas acima de 40 cm. Pode-se observar também que boa parte do erro médio do modelo proposto manteve-se na faixa de 20 cm (em módulo), contra 40 cm do modelo harmônico.

A figura 18c mostra que o modelo proposto para a ET02 (Florianópolis) apresentou uma melhoria ainda maior nos resultados para demonstração do nível do mar em comparação com a modelagem harmônica tradicional, principalmente nas variações positivas e negativas acima de 40 cm. Pode-se observar também que a maior parte do erro médio do modelo proposto manteve-se na faixa de 20 cm (em módulo), contra -60 cm e +80 cm do modelo harmônico.

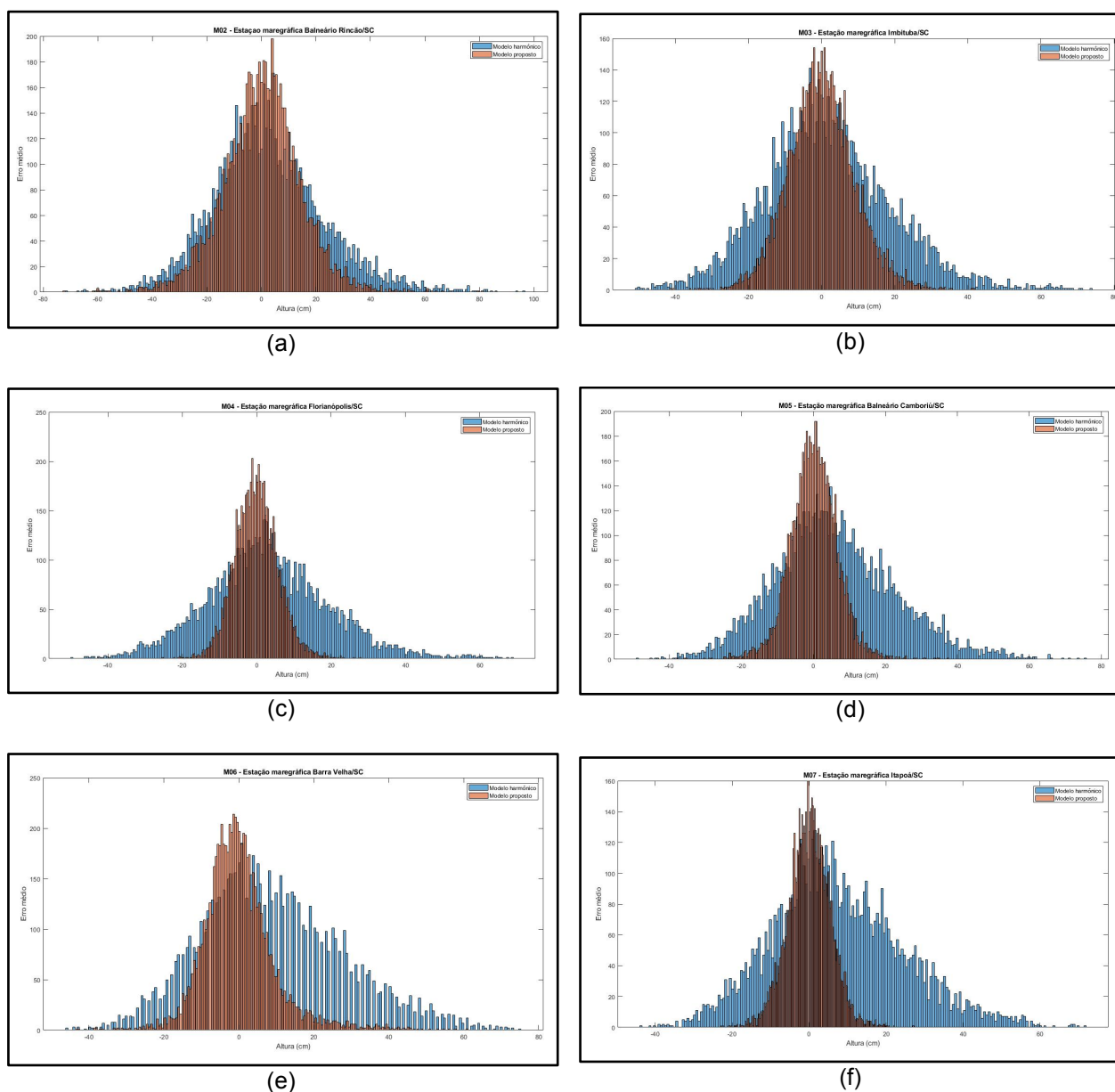
Na localidade de Balneário Camboriú (Fig. 18d), o modelo proposto também apresentou melhores resultados para demonstração do nível do mar em comparação com a modelagem harmônica tradicional, principalmente nos erros positivos maiores que 20 cm. Para esta estação, boa parte do erro do modelo proposto concentrou-se na faixa dos -10 cm e +10 cm.

O modelo proposto para os dados de Barra Velha (Fig. 18e) apresentou melhoria nos resultados para demonstração do nível do mar em comparação com a

modelagem harmônica tradicional, principalmente nos erros positivos maiores que 10 cm. Para esta estação, o modelo reduziu significativamente os erros acima de +40 cm.

Por fim, o modelo proposto para a ET07 (Itapoá) (Fig. 18f) apresentou melhoria nos resultados para demonstração do nível do mar em comparação com a modelagem harmônica tradicional, principalmente nos erros positivos maiores que 10 cm. Para esta estação, boa parte do erro do modelo proposto concentrou-se na faixa dos -10cm e +10 cm. Para esta estação, o modelo reduziu significativamente os erros acima de +20 cm, quase anulando essa faixa de erro.

**Figura 18** - Histogramas do erro médio (cm) dos modelos harmônico (barras azuis) e proposto (barras marrons) para as estações de a) Balneário Rincão (ET02), b) Imbituba (ET02), c) Florianópolis (ET02), d) Balneário Camboriú (ET02), e) Barra Velha (ET02) e f) Itapoá.



Fonte: A Autora.

Os gráficos da série do erro médio das 100 simulações realizadas do modelo proposto, para as 7064 observações, foram elaborados com o intuito de se evidenciar a diferença entre os métodos frente às medidas tomadas *in situ*. A figura 19 mostra estes resultados para as estações mais ao sul ET02, ET03 e ET04. Para a estação de Balneário Rincão (Fig. 19a), quando analisada a série de dados sobrepostas, pode-se observar a melhoria da previsão, principalmente nas primeiras

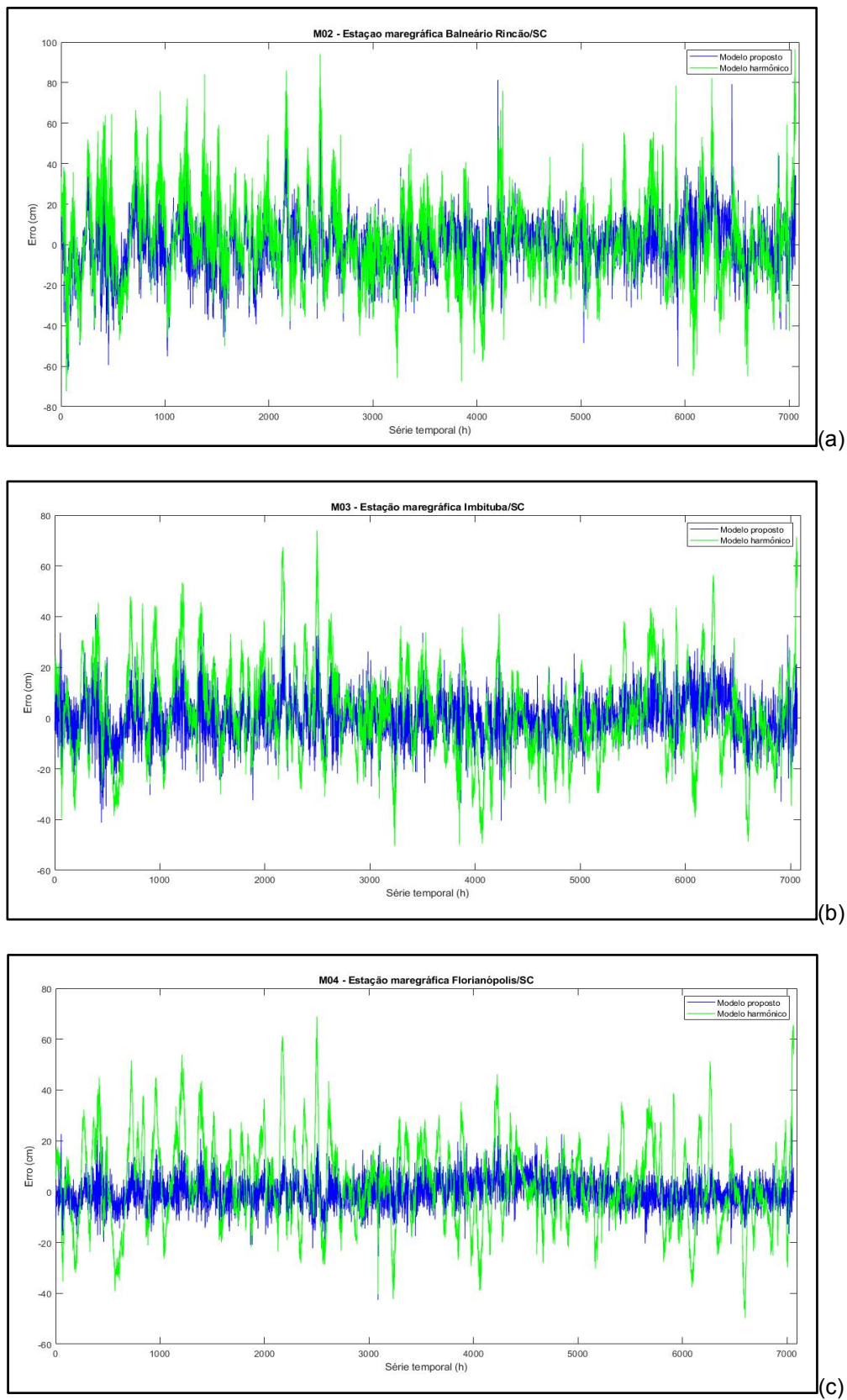
2000 horas das observações, com os erros positivos diminuídos. Em Imbituba (Fig. 19b) observa-se uma melhoria geral média ao longo das observações, com redução dos erros positivos nas primeiras 3000 horas de observação e redução dos erros negativos nas últimas 200 horas. Para Florianópolis (Fig. 19c), observa-se uma melhoria geral em toda a série observada, com erros variando majoritariamente em torno dos 10 centímetros negativos e positivos.

A figura 20 apresenta a série comparativa dos erros dos dois modelos (harmônico e proposto) para as localidades do litoral norte de SC (ET05, ET06 e ET07). Em Balneário Camboriú (Fig. 20a) observou-se uma melhoria significativa do modelo proposto, principalmente nas variações dos erros positivos nas primeiras 3000 horas.

Na estação de Barra Velha (Fig. 20b), observa-se a ineficiência do modelo proposto nas primeiras 500 horas de observação. No entanto, os erros do modelo harmônico também são elevados, sendo que os desvios positivos estão evidenciados.

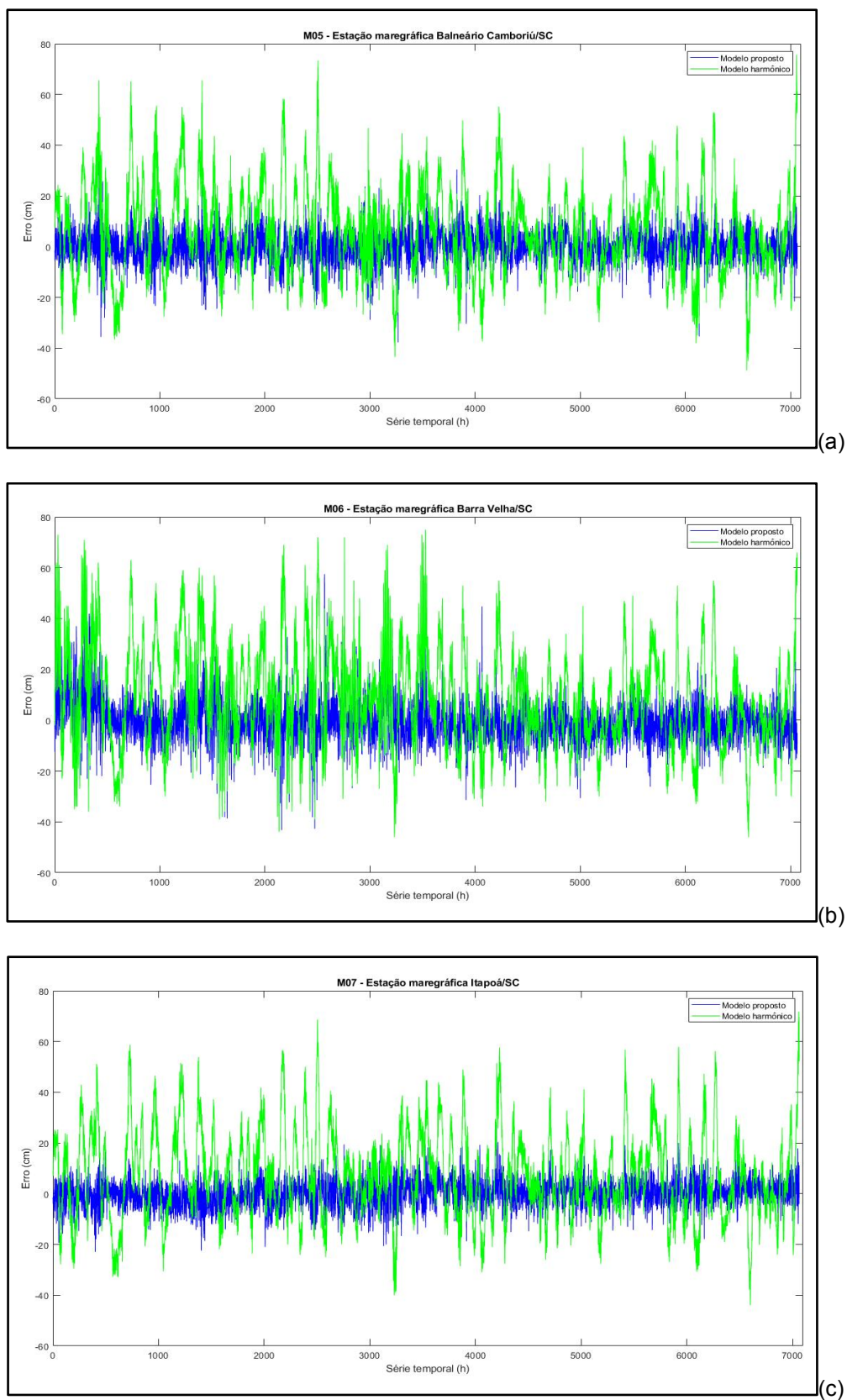
De uma maneira geral há uma melhoria nos erros positivos ao longo das 7064 observações, principalmente até aproximadamente a hora 3500. Para Itapoá (Fig. 20c), observa-se uma melhoria geral em toda a série observada, com erros variando majoritariamente em torno dos 10 centímetros negativos e positivos. Destaca-se a melhoria nos erros positivos ao longo da série.

**Figura 19** - Série comparativa do erro médio entre as 100 simulações do modelo proposto (linha azul) e do modelo harmônico (linha verde), para (a) ET02, (b) ET03 e (c) ET04.



Fonte: A Autora.

**Figura 20** - Como na figura 19, para as (a) ET05, (b) ET06 e (c) ET07.



Fonte: A Autora.

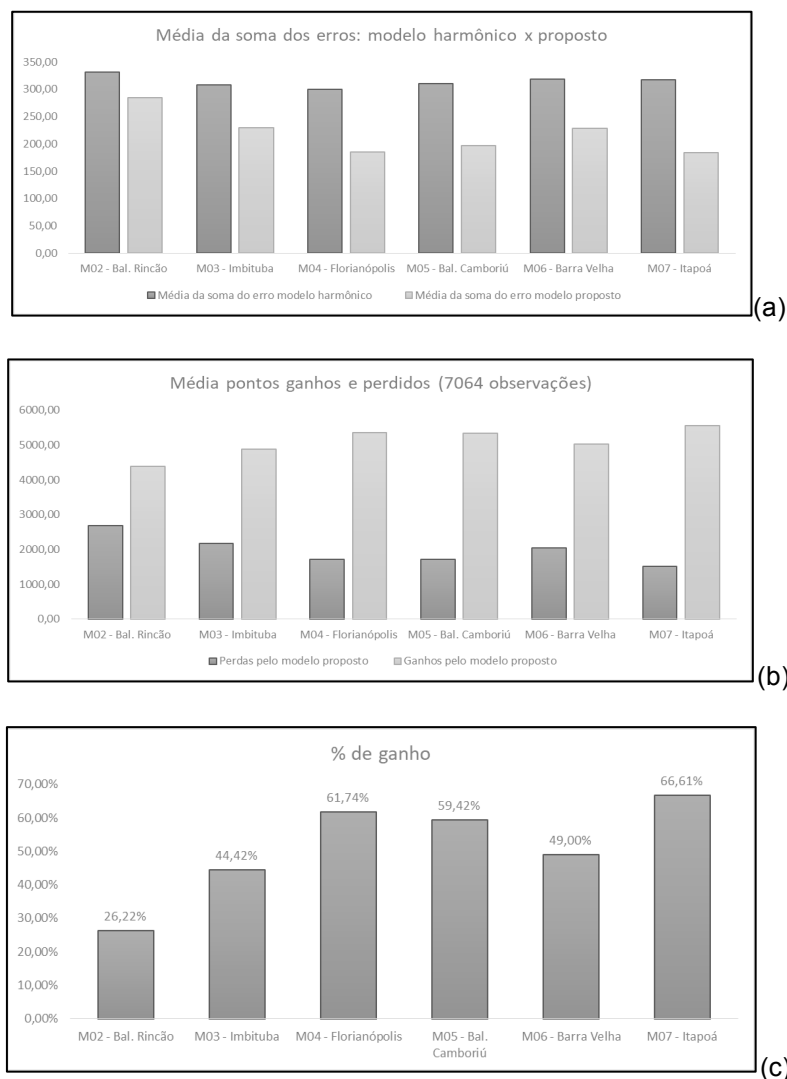
No intuito de comparar os modelos, a cada execução de réplica, apresenta-se o resultado na forma de erros e acertos do modelo proposto em detrimento do maior sucesso ou falha do modelo astronômico tradicional (Figs. 21a e 21b).

A cada réplica rodada, o resultado de acerto ou erro pelo modelo proposto foi gerado. O gráfico representa a média da quantidade de vezes (em 100 réplicas) em que o modelo teve sucesso, sendo unânime para todas as estações, com a maior quantidade de acertos para Itapoá, Florianópolis e Balneário Camboriú, respectivamente, e a menor para Balneário Rincão.

Por fim, para avaliação resumida do desempenho do modelo proposto, apresenta-se o gráfico do percentual de ganho na previsão em relação à modelagem harmônica tradicional (Fig. 21c). Observa-se que a aplicação do modelo melhorou a previsão do nível do mar para Itapoá em quase 67%, seguido de Florianópolis com 61,47%, Balneário Camboriú com 59,42%, Barra Velha com 49%, Imbituba com 44,42% e Balneário Rincão com 26,22%.

Outro resultado importante, também observado em análises anteriores, é o avanço no desempenho do modelo proposto (redução de erros e porcentagem de ganho) das estações localizadas no sul em direção a norte. Claramente pode-se inferir que, à medida que uma estação capta o sinal de um evento não astronômico, o modelo transfere esse sinal para as estações localizadas a norte. Com isso o desempenho do modelo tende a melhorar.

**Figura 21** - Gráficos comparativos entre os modelos harmônico e proposto de (a) erros acumulados médios, (b) média de pontos ganhos e perdidos e (c) porcentagem de ganho pelo modelo proposto na previsão do nível do mar para cada estação.



Fonte: A Autora.

A tabela 7 apresenta uma síntese dos resultados encontrados, indicando um resumo dos resultados e comparativo entre o modelo tradicional de previsão de maré (harmônico) e o modelo proposto. Através desta tabela é possível observar que, para todas estações avaliadas, o modelo proposto apresenta melhores resultados que o modelo harmônico, principalmente nas estações localizadas no litoral norte de SC.

**Tabela 7** - Resumo dos resultados e comparativo entre o modelo tradicional de previsão de maré (harmônico) e o modelo proposto.

| Estação                     | Tempo (s) | Média da soma do erro - modelo harmônico | Média da soma do erro - modelo proposto | Percentual de ganho | Perdas pelo modelo proposto | Ganhos pelo modelo proposto |
|-----------------------------|-----------|------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| <b>ET02 - Bal. Rincão</b>   | 144.12    | 331.58                                   | 284.81                                  | 26.22%              | 2676.97                     | 4387.03                     |
| <b>ET03 - Imbituba</b>      | 148.14    | 308.22                                   | 229.79                                  | 44.42%              | 2178.94                     | 4885.06                     |
| <b>ET04 - Florianópolis</b> | 144.30    | 300.20                                   | 185.68                                  | 61.74%              | 1707.51                     | 5356.49                     |
| <b>ET05 - Bal. Camboriú</b> | 134.62    | 310.04                                   | 197.51                                  | 59.42%              | 1721.27                     | 5342.73                     |
| <b>ET06 - Barra Velha</b>   | 141.58    | 318.24                                   | 228.61                                  | 49.00%              | 2044.41                     | 5019.59                     |
| <b>ET07 - Itapoá</b>        | 151.21    | 317.72                                   | 183.60                                  | 66.61%              | 1511.23                     | 5552.77                     |

Fonte: A Autora.

## 6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A apresentação dos resultados demonstra o nível de eficiência do modelo proposto por este trabalho, no sentido de melhorar a previsão do nível do mar ao longo da costa de Santa Catarina, com a inclusão de variáveis atmosféricas como preditores.

Este capítulo apresenta uma discussão dos resultados distinta para cada estação porque a aplicação do modelo para cada estação foi diferente e, em função disso, as características dos erros têm especificações distintas. Como exemplo, (i) a característica da medida do nível do mar, (ii) a inserção de variáveis, (iii) e a quantidade de dados inseridos é variável para cada estação.

A estação de Balneário Rincão é a primeira estação a demonstrar resultados quanto a melhoria na previsão de sinal do nível do mar, uma vez que a ET01 de Passos de Torres é utilizada como primeira variável inserida e foi escolhida por ser a primeira estação do Estado, considerando-se as estações em série de sul para norte.

O modelo proposto para Balneário Rincão demonstrou apenas 26.22% de melhoria na previsão do nível do mar em relação ao modelo tradicional, provavelmente por ser a primeira estação com o modelo aplicado, esta estação (ET02) foi a que teve a menor inclusão de dados atrasados, tanto de nível do mar, como de fatores atmosféricos.

Importante ainda ressaltar que os dados de pressão atmosférica nesta estação foram desconsiderados devido à falta de mensurações e da alta presença de valores espúrios. Além disso, o erro da previsão harmônica se apresenta bem significativo e, como é uma das variáveis de entrada, também pode ter contribuído para o baixo desempenho.

Segundo Melo F<sup>o</sup> (2017), a importância de efeitos remotos nos desníveis não-astronômicos existentes na costa brasileira, sugere que a qualidade das previsões feitas com modelos estatísticos pode ser melhorada se dados atmosféricos coletados a sul do local das medições de nível forem incorporados. Da mesma maneira, a inclusão de medições de nível do mar obtidas a sul do local de interesse

como forçante também deve contribuir para melhorar a capacidade preditora desse tipo de modelo.

**Figura 22** – Plataforma de pesca. Balneário Rincão/SC.



Fonte: Ricardo B. (maio de 2015) – Trip Advisor.

A localização do marégrafo nesta estação também pode ter contribuído para a baixa melhoria, já que se encontra em uma plataforma de pesca, mar adentro e bem exposta à ação da movimentação da água costeira (Fig. 22), o que pode prejudicar a leitura pelo equipamento com precisão.

Em oposto, o marégrafo imediatamente anterior, Passo de Torres, que fornece os dados de entrada, está localizado no interior de uma desembocadura de rio, o que faz com que a leitura também seja afetada, mas de forma diferente.

A aplicação de filtros nas séries maregráficas não foram suficientes para melhoria do resultado do modelo, permanecendo bem próximo do apresentado anteriormente. Dessa maneira, assim como comentado anteriormente, optou-se pelo não uso de filtragem.

Esta estação contempla provavelmente uma das melhores localizações para acompanhamento de níveis não-astronômicos, principalmente associados a

passagem de frentes frias, já que não sofre interferência de barreiras geográficas como baías ou enseadas e está localizada mais ao sul do Estado. Pode-se considerar em um próximo estudo a aplicação de outros filtros, de alta e baixa frequências, mais específicos para as oscilações de frequências não interessantes.

Ademais, pode-se considerar a inclusão de estações mais ao sul, para suprir a defasagem de dados atrasados no tempo e testes de outros transformadores de sinais não interessantes vinculados aos limites físicos.

Os resultados apresentados para a estação de Imbituba (ET03) evidenciam uma melhoria na predição do nível do mar em relação aos resultados apresentados para a estação de Balneário Rincão (ET02). O modelo proposto melhorou em 44.42% a qualidade da previsão e podem estar relacionados à adição dos dados em atraso de mais uma estação anterior.

**Figura 23** – Porto de Imbituba, Imbituba/SC.



Fonte: Divulgação/ND (2020).

A localização de instalação da estação maregráfica também difere do marégrafo imediatamente anterior de Balneário Rincão. Em Imbituba, a estação encontra-se no Porto de Imbituba (Fig. 23), que está instalado em uma enseada aberta, junto à chamada Ponta de Imbituba, possuindo águas abrigadas e profundas, sem canal de acesso e com baixo índice de assoreamento (CIA DOCAS IMBITUBA, 2022).

Vale ressaltar a importância da melhoria ao final da série de 200 horas para avaliação do modelo, que apresenta o aprimoramento da previsão de desníveis negativos. Esta estação valida a necessidade de melhoramento na previsão do nível

do mar, já que conta com um terminal portuário e que pode vir a sofrer consequências com as variações no nível não-astronômico negativo, desde interrupções temporárias de operação e até acidentes de grandes magnitudes.

A melhoria em mais de 40% também pode estar relacionada à uniformidade nas medições de direção do vento, sendo predominantemente de Norte, o que levaria a mais registros de observações negativas em relação à previsão harmônica.

Para a estação da ilha de Florianópolis (ET04), observa-se uma melhoria bem significativa na previsão do nível, sendo 61,74% melhor do que a previsão tradicional, sendo a segunda melhor na aplicação do modelo.

Considera-se a dinâmica complexa de rotação da maré na baía formada entre a Ilha de Florianópolis e o continente, que é formada por dois corpos de água, denominados de Baía Sul e Baía Norte. Sendo que a Baía Norte possui uma ligação com o mar muito maior do que a Baía Sul e esta característica parece influenciar de maneira substancial a hidrodinâmica local (Fig. 24).

**Figura 24** – Baía sul de Florianópolis, Florianópolis/SC.



Fonte: Divulgação/Correio de Santa Catarina (2022).

Porém, mesmo considerando a dinâmica complexa, Dalbosco *et al.* (2020) discute que o nível do mar atual e local, em Florianópolis, apresenta forte relação com o padrão de vento local, indicando que o vento é o principal agente forçante. O vento nordeste drena o fluxo para o sul e provoca o rebaixamento do nível local por equilíbrio geostrófico. O vento de sul, por outro lado, força as correntes para o norte

e acumula água na costa, elevando o nível do mar local. Fato que parece ser positivo para aplicação do modelo, a princípio. Cabe ainda ressaltar que a maioria das medições de direção do vento encontradas para a região ficam em torno das direções Norte e Sul, representando juntas 55.41% do total.

Para Balneário Camboriú (ET05) obteve-se o terceiro melhor aproveitamento entre as estações, com 59,42% de ganho na previsão pelo modelo proposto, bem próximo do aprimoramento da estação de Florianópolis. A estação maregráfica encontra-se na praia de Laranjeiras, que tem uma extensão de 750 metros, localizada em uma pequena baía, tendo como característica águas calmas (Fig.25).

**Figura 25** – Praia de Laranjeiras, Balneário Camboriú/SC.



Fonte: Divulgação/Dicas do nosso Brasil (2020).

A característica da região de instalação é bem próxima da estação de Imbituba, que aparentemente oferece uma zona mais abrigada para a tomada dos dados de nível do mar. Além disso, a qualidade dos dados nessa estação, tendo descarte de apenas 0.02%, parece oferecer ao modelo condições para melhoria na previsão. Até mesmo o uso de uma estação remota para os dados meteorológicos não significou perdas, considerando que as estações da Praia de Laranjeiras e de Itajaí tem distância de aproximadamente 15 km.

Após uma sequência de melhoria nos resultados, partindo de Bal. Rincão com 26.22%, Imbituba com 44.42% e Florianópolis e Bal. Camboriú com

aproximadamente 60%, tem-se a Estação de Barra Velha (ET06), mantendo-se como a quarta melhor resposta da aplicação do modelo, com 49% de melhoria. Considerando que os pontos atingidos pelas estações de Florianópolis e Bal. Camboriú são bem próximos, a estação de Barra Velha interrompe uma melhoria crescente zonalmente, levantando a hipótese de que, não somente a inclusão de mais variáveis atrasadas no tempo leva a maiores chances de melhoria na aplicação do modelo.

**Figura 26** – Barra Velha/SC.



Fonte: Secov/SC.

Um fato importante a ser retomado sobre os dados diz respeito à localização das estações de monitoramento das variáveis, onde pode-se observar que, foram utilizados dados de estações próximas para as variáveis meteorológicas quando não havia disponibilidade na mesma localidade das estações maregráficas. Os dados meteorológicos para as estações de Bal. Rincão e Barra Velha foram obtidos em estações distantes em aproximadamente 30 km ao Norte, sendo essa a maior distância para este uso de dados remotos e, conforme apresentado anteriormente, foram os menores aprimoramentos na previsão do nível do mar obtidos. Fato que levanta a hipótese de que o uso de dados de estações distantes ou até mesmo o erro na escolha dessas localidades pode influenciar negativamente nos resultados.

Para Itapoá (ET07), observa-se uma melhoria acima dos 66%, sendo o melhor desempenho das 06 estações na aplicação do modelo. Com isso, a

aplicação do modelo se mostra muito viável e otimista, considerando que a região de Itapoá é uma importante região portuária e econômica para o Estado. O fato de ser a última estação da série, o marégrafo mais ao Norte, corrobora para se encontrar a maior melhoria nos dados, já que contempla todos os dados imediatamente anteriores.

Porém, é importante ressaltar que, houve uma defasagem de dados da velocidade/direção do vento e pressão atmosférica disponíveis para essa região, para o período de estudo (aproximadamente 12%). Fato este que levanta a hipótese de que, a inserção de mais variáveis atrasadas pode até mesmo substituir a necessidade de inclusão das variáveis locais. Ao contrário da situação da segunda estação, onde a entrada de poucos dados provavelmente afetou a qualidade da previsão.

A localização da estação também pode ser um fator a ser considerado, até mesmo por ser a estação com a maior amplitude de maré, devido ao complexo estuarino da baía da Babitonga (Fig. ser caracterizado pela dominância de maré enchente com amplificação da altura da maré (hiper síncrona) nas áreas mais interiores (TRUCCOLO & SCHETTINI, 1999), causada principalmente por efeitos de fricção e estreitamento do canal principal (VIEIRA, 2008).

**Figura 27** – Porto de Itapoá, Itapoá/SC.



Fonte: Divulgação/Porto de Itapoá.



## 7. PRODUTOS TÉCNICO E TECNOLÓGICOS

O principal Produto Técnico e Tecnológico (PTT) desenvolvido neste estudo foi o modelo de previsão do nível médio do mar. Para tal, foram rodadas pelo modelo 100 réplicas de cada estação maregráfica. Com as configurações apresentadas na tabela 8. Os valores de cada variável foram fixados após rodadas testes de verificação, onde foi avaliado a melhoria na resposta objetivo.

**Tabela 8** - Configuração utilizada para calibração do modelo.

| Configurações fixas do modelo:        | Valor     |
|---------------------------------------|-----------|
| Réplicas                              | 100       |
| Marégrafo                             | M02 - M07 |
| Tamanho da população                  | 50        |
| Pontos para teste                     | 2000      |
| Interações                            | 50        |
| % operador                            | 0,2       |
| Pontos em cada execução               | 20        |
| Tamanho da população em cada execução | 30        |

Fonte: A Autora.

Os resultados do modelo são apresentados de acordo com a tabela 9.

**Tabela 9** - Parâmetros de resultado do modelo.

| Resultados do modelo                |                                    |                     |                                   |                                   |                                      |
|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Erro médio<br>(modelo<br>harmônico) | Erro médio<br>(modelo<br>proposto) | Tempo<br>(segundos) | Perdas<br>pelo modelo<br>proposto | Ganhos<br>pelo modelo<br>proposto | Ganho<br>pelo modelo<br>proposto (%) |

Fonte: A Autora.

Os dados foram rodados e armazenados em uma matriz de resultados automaticamente. Os gráficos para demonstração dos resultados são apresentados abaixo e discutidos brevemente na seção seguinte.

### 7.1. Equações Finais por estação

As equações finais simplificadas, sem o ajuste por variável, para o melhor resultado, ou seja, coeficiente utilizado que mais contribui para o resultado se ajustar a curva dos dados horários observados em cada estação, estão apresentadas abaixo na figura 28:

**Figura 28** - Equações finais simplificadas por estação a) ET01, b) ET02, c) ET03, d) ET04, e) ET05, ET06 e f) ET07.

a) *Nível do mar ET02*

$$= 491,4528 - 6,249 x_1 + 8,3246 x_2 - 0,8327 x_3 - 1,9384 x_4 - 0,0263 x_5 + 8,7167 x_6 - 4,7232 x_7 - 0,0457 x_8 + 7,0456 x_9$$

b) *Nível do mar ET03*

$$= 59,5894 - 0,3203 x_1 + 1,1190 x_2 - 0,4874 x_3 - 0,0324 x_4 + 5,9533 x_5 + 0,3290 x_6 - 0,0365 x_7 + 0,1293 x_8 + 0,8041 x_9$$

c) *Nível do mar ET04*

$$= -200,0380 - 0,1396 x_1 + 1,1278 x_2 + 0,1584 x_3 - 0,0221 x_4 + 0,0015 x_5 - 2,2721 x_6 + 0,2026 x_7 - 0,0763 x_8 + 0,2449 x_9 + 0,5729 x_{10}$$

d) *Nível do mar ET05*

$$= 397,4203 - 0,5331 x_1 + 1,5923 x_2 + 1,5896 x_3 + 0,0090 x_4 - 1,1142 x_5 + 6,2058 x_6 - 0,4009 x_7 + 0,0047 x_8 - 0,0403 x_9 - 0,0907 x_{10} + 0,9621 x_{11}$$

e) *Nível do mar ET06*

$$= 57,3377 - 1,7996 x_1 + 2,6556 x_2 + 0,4165 x_3 - 0,0321 x_4 - 11,0975 x_5 + 3,5890 x_6 - 0,0543 x_7 - 0,0241 x_8 + 0,5113 x_9 - 2,0060 x_{10} - 1,3325 x_{11}$$

f) *Nível do mar ET07*

$$= 461,2083 + 0,2366 x_1 - 0,1868 x_2 + 1,0514 x_3 + 0,6382 x_4 + 0,0243 x_5 - 1,0568 x_6 + 6,0569 x_7 - 0,4582 x_8 + 0,2369 x_9 + 0,3327 x_{10} + 0,5870 x_{11} - 0,2303 x_{12}$$

Fonte: A Autora.

Sendo,  $x_1$  = Dados do nível do mar da estação anterior,  $x_2$  = Dados do nível do mar previsto para estação atual,  $x_3$  = Dados da velocidade máxima do vento,  $x_4$  = Dados da direção do vento,  $x_5$  = Dados componente  $u'$ ,  $x_6$  = Dados componente  $v'$ ,  $x_7$  = Dados da pressão atmosférica instantânea,  $x_8$  a  $x_{12}$  = Nível não astronômico dos marégrafos anteriores.

**Figura 29** - Cópia da tela (*printscreen*) do modelo no software MatLab 2020b.

```

1 % INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA - MESTRADO PROFISSIONAL EM CLIMA E AMBIENTE
2 % Discente: Marina Fiolotti do Canto / Prof. Dr. Adriano Vitor
3
4 % PROPOSTA DE APRIMORAMENTO DA PREVISÃO DO NÍVEL DO MAR PARA SANTA CATARINA ATRAVÉS DA INCLUSÃO INDIRETA DE FORÇANTES ATMOSFÉRICAS
5
6
7 %MODELO
8 Tamanho=size(XCompleto,1);
9 Temp=[1:1:Tamanho]';
10 Selecao=[];
11 for i=1:Pontos_Validacao
12     PreSelecao=Temp(Temp>0);
13     Escolha=cell(size(PreSelecao,1)*rand(1,1));
14     Selecao=[Selecao PreSelecao(Escolha)];
15     Temp(PreSelecao(Escolha))=0;
16 end
17 clear Escolha Temp PreSelecao
18 Selecao=sort(Selecao)';
19 X=XCompleto(Selecao,:);
20 Y=YCompleto(Selecao);
21
22 %Gerar População Inicial:-----
23 MatrizCoef=[];
24 for i=1:TamPop
25     IndicesLin=sort(cell(size(X,1)*rand(1,Pop_Cada_Execucao)));
26     MatrizCoef=[MatrizCoef; lny(X(IndicesLin,:))'*X(IndicesLin,:)]';
27 end
28 clear IndicesLin
29
30 %-----
31 BaseSortei=[min(MatrizCoef); max(MatrizCoef)];
32
33

```

Fonte: A Autora.

## 8. CONCLUSÃO

Pela natureza do fenômeno e pelos resultados obtidos no presente trabalho, a previsão do nível do mar nas zonas costeiras, não depende apenas das oscilações de grande magnitude do sistema Terra-Lua-Sol, mas também, depende da previsão das variáveis atmosféricas: pressão atmosférica e ventos (ao nível do mar).

A aplicação do modelo teve o intuito de aprimorar as previsões do nível do mar, através da inclusão de variáveis atmosféricas direta ou indiretamente, e se apresentou como alternativa enriquecedora para uma previsão do nível do mar mais eficiente.

Mesmo que a limitação do aperfeiçoamento dos modelos previsão do nível do mar, hoje em dia, ainda esteja relacionada ao horizonte de tempo que as previsões atmosféricas são geradas, limitando a melhoria desses modelos ao mesmo espaço de tempo da previsão atmosférica (poucos dias) (MELO F°, 2017), a proposta de utilização de dados em série, considerando o maior número de estações disponíveis, apresentou resultados satisfatórios e pode gerar subsídios para aplicação de outras técnicas de modelagem.

Os resultados da aplicação do modelo nas estações abrangidas no presente trabalho se mostraram satisfatórios, com aprimoramento da previsão do nível do mar mais de 65%, sendo a maioria em torno de 50%.

Nota-se a melhoria significativa na predição sentido sul-norte, atestando que o sistema de alimentação da estação atual com os dados das estações anteriores é viável e deve ser estimulada para este tipo de estudo. Resultado também que corrobora com a literatura, que estes sinais que induzem os desníveis do mar em relação ao nível previsto são sistemas atuantes na região e podem ser monitorados em série com certa antecedência.

Espera-se que os resultados possam auxiliar no aprimoramento e na incorporação dos estudos sobre os processos costeiros em geral no Brasil, principalmente em órgãos e empresas responsáveis pelos monitoramentos destes fenômenos.

O trabalho teve como finalidade a elaboração de um produto técnico e tecnológico, através de um *script* do modelo, que busca aprimorar a previsão do nível do mar e pode ser utilizado pela EPAGRI.

Como sugestão para novos estudos:

Com os pontos levantados sobre as diferenças nos erros de cada estação, pode-se considerar que é necessária a condução de novos estudos, com diferentes inclusões de dados e maiores cuidados na escolha da localização das estações meteorológicas caso os dados não estejam disponíveis na mesma região.

É válido a inclusão de novas estações mais a sul, como no Rio Grande do Sul, Uruguai e Argentina, objetivando a ampliação da rede de monitoramento e melhor acompanhamento em Santa Catarina.

Pode-se considerar em um próximo estudo o uso de dados de reanálise para se testar a importância dos efeitos remotos nos desníveis da previsão do nível do mar e a aplicação de filtros de alta e baixa frequências (entre outros), mais específicos para as oscilações de frequências não interessantes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTUNES, C. **Estudo da análise harmônica da maré aplicada ao marégrafo de Cascais**. Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia. Porto, Portugal, 2011.

Araújo, C. E. S. Análise das flutuações do nível do mar no litoral de Santa Catarina. **Agropecuária Catarinense**, Florianópolis, v.33, n.1, p.61-67, jan./abr. 2020.

ARAUJO, C. E. S., Antunes E N., Garbossa, L. H. P., Boll, M., Vanz, A. Suavização dos maregramas. Edição: EPAGRI/DEMC – On-line. Florianópolis, dezembro de 2021.

<[https://ciram.EPAGRI.sc.gov.br/ciram\\_arquivos/site/maregrafos\\_suavizacao.pdf](https://ciram.EPAGRI.sc.gov.br/ciram_arquivos/site/maregrafos_suavizacao.pdf)>.

AUGUSTO, E. Ministério do Meio Ambiente. Brasília, 2018. Disponível em: Acesso em: 3 set. 2018.

BORATO, L. **Uso de redes neurais artificiais para previsão das flutuações do nível do mar em Cananéia, São Paulo, Brasil**. Monografia – Curso de Oceanografia, Centro de Estudos do Mar, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. – Pontal do Paraná. 85 p., 2018.

CAMARGO, R.; HARARI, J.; LOPES, R.; CARUZZO, A.; ZACHARIAS, D. C. Implementação de Sistema de Previsão de Marés Meteorológicas no Atlântico Sudoeste. **XI Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Rio de Janeiro. Anais, p 2646-2654, 2000.

CAMPOS, R. M.; CAMARGO, R.; HARARI, J. Caracterização de eventos extremos do nível do mar em Santos e sua correspondência com as reanálises do modelo do NCEP no Sudoeste do atlântico sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.2, 175 - 184, 2010.

CARVALHO, R. A. **Estudo da Variabilidade do Nível Médio do Mar na Costa Brasileira como Subsídio a Projetos de Engenharia** – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica. XII, 46 p.: il; 29,7 cm, 2015.

COELHO, A. de L. **Método de previsão de maré oceânica, utilizando análise harmônica em séries de 18,69 anos**, 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2016.

COMPANHIA DOCAS DE IMBITUBA. Disponível em: <<https://www.cdiport.com.br/infra/infra.htm>>. Acesso em: 05/07/2022.

CZIZEWESKI, A.; PIMENTA, F. M. CIRCULAÇÃO DE MARÉ NOS ARREDORES DA ILHA DE SANTA CATARINA. 2017. **XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Disponível em:

<<http://abrh.s3.amazonaws.com/Eventos/Trabalhos/60/PAP023220.pdf>>. Acesso em: 06/07/2022.

DALBOSCO, A. L. P. Analysis of currents on the continental shelf off the Santa Catarina Island through measured data. RBRH [online]. 2020, v. 25 [Accessed 6 July 2022], e7. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Epub 31 Jan 2020. ISSN 2318-0331. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020180175>.

DHN. Roteiro Costa Sul: do Cabo Frio ao Arroio Chui, Lagoas dos Patos e Mirim, Diretoria de Hidrografia e Navegação. 12° Ed. Rio de Janeiro. 282 p. 1994.

FERNEDA, E. Redes neurais e sua aplicação em sistemas de recuperação de informação. **Ci. Inf.**, Brasília, v. 35, n. 1, p. 25-30, jan./abr. 2006.

FERREIRA, J. C.; PATINO, C. M. What does the p value really mean? *Jornal Brasileiro de Pneumologia* [online]. 2015, v. 41, n. 5 [Accessed 23 August 2022], pp. 485. Available from: <<https://doi.org/10.1590/S1806-37132015000000215>>. ISSN 1806-3756. <https://doi.org/10.1590/S1806-37132015000000215>.

FILIPPO, A. M. **Variabilidade do Nível do Mar em Função de Eventos Meteorológicos de Baixa Frequência**. Tese de D. Sc., UFF, Niterói, RJ, 2003. Florianópolis, 100 p, Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), PPGEA, UFSC, Brasil, 1998.

FRANCO, A. S. 1981, **Tides fundamentals analysis and prediction**. São Paulo, IPT.

FRANCO, A. S.; ROCK, N. J. The Fast Fourier Transform and its application to tidal oscillations. **Bol. Inst. Oceanogr.** 1971, vol.20, n.1, pp.145-199.

FRANCO, A.S. **Tides, fundamentals, analysis and prediction** - Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica. São Paulo, 1988.

GARRISON, T. **Fundamentos de Oceanografia**, CENGAGE learning, São Paulo, 2010.

GHORBANI, M. A.; KHATIBI, R.; AYTEK, A.; MAKARYNSKYY, O.; SHIRI, J. Sea water level forecasting using genetic programming and comparing the performance with Artificial Neural Networks. **Computers & Geosciences**, v. 36, p. 620-627, 2010.

GUIMARÃES, M. R. F.; MARONE, E. **Oceanografia física com ênfase em ambientes estuarinos**, 1996.

HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e prática**. Porto Alegre: Bookman, 2001.

HERNANDEZ, A. O. **Eventos extremos de ondas e marés meteorológicas no norte de Santa Catarina**. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Florianópolis, 2017.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE CIDADES E ESTADOS. Rio de Janeiro: IBGE, 2016.

JUSTI DA SILVA, M.G.A., SILVA DIAS M.A.F. A frequência de fenômenos meteorológicos na América do Sul: uma climatologia. Anais do **XII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Foz do Iguaçu, 2002.

LEGATES, D. R., & MCCABE, G. J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, 35(1), 233–241. Doi:10.1029/1998wr900018, 1999.

LEMO C.F., CALBETE, N.O. 1996. Sistemas Frontais que atuaram no Brasil de 1987 a 1995. **Climanálise Especial**, Edição comemorativa de 10 anos. MCT/INPE-CPTEC.

MARINO, M. **Caracterização Morfo-sedimentar Da Plataforma Continental Interna da Enseada Dos Ingleses – SC**, Como Apoio à Arqueologia Subaquática. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal De Santa Catarina. Programa De Pós-graduação em Geografia, 120 p. 2006.

MÁRIO, H. F.; Franco, D.; Guimarães, S. C. **Contribuição ao estudo da dinâmica de marés e correntes na Baía de Florianópolis**. Disponível em: <<https://semengo.furg.br/images/2006/15.pdf>>. Acesso em 14/07/2022.

MAZUCHELI, J.; ACHCAR, J. A. Algumas considerações em regressão não linear. **Acta Scientiarum**. Maringá, v. 24, n. 6, p. 1761-1770, 2002.

MELO Fº. E. **Maré Meteorológica na Costa Brasileira**, Tese Professor Titular, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Rio Grande, 328 p, Abril, 2017.

MELO, E., MACHADO D. M., LISBOA R. C., ROMEU, M. A. R., Overview of tide, wind and wave conditions along the Brazilian coast for coastal engineering practice , **PIANC-COPEDEC IX**, Rio de Janeiro, Brasil, 2016.

MONTANARI, F. **Estimativa dos impactos econômicos do aumento do nível médio do mar no Município De Florianópolis/SC para o ano de 2100**. Dissertação (mestrado profissional) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial, SENAI – PR, Universität Stuttgart, 2015.

N.O.HORN FILHO; E.P. FILHO; E.FERREIRA. Diagnóstico geológico-geomorfológico da planície costeira adjacente à enseada dos Currais, Santa Catarina, Brasil. **GRAVEL** ISSN 1678-5975. Nº2 25-39. Porto Alegre/RS. Outubro, 2004.

NUNES, A. L. **Determinação das marés meteorológicas na região da Baía do Espírito Santo e sua influência na drenagem de águas continentais**. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental, Gestão em Águas Interiores e costeiras) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.

OLIVEIRA, A.S. 1986. **Interações entre Sistemas Frontais na América do Sul e Convecção na Amazônia**. INPE-4008-TDL/239.

OLIVEIRA, M. M. F. de. **Redes Neurais Artificiais na predição de maré meteorológica em Paranaguá -PR**. 149 f. Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

OLIVEIRA, R. de. **Sistema de detecção de frentes frias associadas a eventos meteorológicos de médio e alto impacto no Centro Sul da América do Sul**. Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Clima e Ambiente. Instituto Federal de Santa Catarina, 2022.

PACHECO, 2004. **ICA: Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada** - [www.ICA.ele.puc-rio.br](http://www.ICA.ele.puc-rio.br) Marco Aurélio C.Pacheco. Departamento de Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Disponível em: <[https://www.inf.ufsc.br/~mauro.roisenberg/ine5377/Cursos-ICA/MQ-intro\\_apost.pdf](https://www.inf.ufsc.br/~mauro.roisenberg/ine5377/Cursos-ICA/MQ-intro_apost.pdf)>. Acesso: 28/03/2022.

PATRICK, A. R. Use of the NCEP Mesoeta data in a water level predicting neural network. Proceedings of AMS Conference on Weather Analysis and Forecasting, 19, AMS Conference on Numerical Weather Prediction, 15, **American Meteorological Society** in press, 2002.

PUGH, D. T., 1987, **Tides, Surges and Mean Sea Level**. Great Britain, John Wiley & Sons.

RODRIGUES, L. L. G., Franco, D., Sugahara, S. CLIMATOLOGIA DE FRENTES FRIAS NO LITORAL DE SANTA CATARINA. **Revista Brasileira de Geofísica** (2004) 22(2): 135-151 © 2004 Sociedade Brasileira de Geofísica ISSN 0102-261X [www.scielo.br/rbg](http://www.scielo.br/rbg).

ROSMAN, P. C. C. **Referência Técnica SisBahia** (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental. Engenharia Costeira e Oceanográfica COPPE/UFRJ, 400p., 2020.

SPERB, R. M. Aplicação de uma rede neural temporal em um estudo de caso para previsão do nível do mar. Workshop de Tecnologia da Informação Aplicada ao Meio Ambiente – **Congresso Brasileiro de Computação**, pp. 1759-1769, 2003.

STECH, J. L. & LORENZZETTI J. A. 1992. The response of the South Brazil Bight to the passage of wintertime cold fronts. **Jour, of Geophys. Res.**, Vol. 97, N°. C6, pp. 9.507-9.520.

TRUCCOLLO, E. C. Maré meteorológica e forçantes atmosféricas locais em São Francisco do Sul - SC. 100p. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Ambiental, UFSC. Florianópolis, 1998.

E. C. TRUCCOLO, D. FRANCO AND C. A. F. SCHETTINI. The Low Frequency Sea Level Oscillations in the Northern Coast of Santa Catarina, Brazil. **Journal of**

**Coastal Research.Special.** Issue No. 39. Proceedings of the 8th International Coastal Symposium (ICS 2004), Vol, pp. 547-552 (6 pages), 2006.

TUKERIAN, K. K. **Oceans.** Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 151p., 1968.

VELLOZO, T. G., ALVES, A. R. **Características gerais do fenômeno da maré no Brasil.** Anais Hidrográficos da Diretoria de Hidrografia e Navegação, Tomo LXI, 2004.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações.** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Imprensa Universitária, 1991. 449 p.

VIEIRA, C. V., HORN FILHO, N. O., HAAGEN, C. V. D., BONETTI, C., BONETTI, J. Morphosedimentary characterization and zoning of Babitonga bay estuarine complex, Santa Catarina state. **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 62-63, p. 85-105. Editora UFPR, 2008.

VITOR, A. **Uma proposta de algoritmo genético híbrido para o problema do caixeiro viajante.** Tese de doutorado - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Exatas, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Métodos Numéricos em Engenharia. – Curitiba, 2015.

## APÊNDICE A - ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS

**Tabela 10-** Análise exploratória da velocidade máxima do vento (m/s) horária para as 7 estações.

### Estatísticas

| Variável | N     | N*   | Média  | EP Média | DesvPad | Mínimo | Q1     | Mediana | Q3     | Máximo  |
|----------|-------|------|--------|----------|---------|--------|--------|---------|--------|---------|
| ET01     | 11227 | 485  | 6,9609 | 0,0359   | 3,8062  | 0,9800 | 4,0800 | 5,8900  | 9,1700 | 25,1100 |
| ET02     | 11673 | 39   | 5,1752 | 0,0272   | 2,9370  | 0,0500 | 2,8900 | 4,6100  | 6,8600 | 19,3100 |
| ET03     | 11572 | 140  | 6,4768 | 0,0301   | 3,2385  | 0,0000 | 3,8700 | 6,1700  | 8,7700 | 22,7400 |
| ET04     | 11696 | 16   | 4,0743 | 0,0224   | 2,4274  | 0,0000 | 1,9100 | 3,8200  | 5,7800 | 16,3200 |
| ET05     | 11695 | 17   | 3,8395 | 0,0197   | 2,1282  | 0,0000 | 2,3000 | 3,5000  | 5,0000 | 17,4000 |
| ET06     | 11177 | 535  | 5,6662 | 0,0294   | 3,1061  | 0,0000 | 3,2800 | 4,9000  | 7,4500 | 21,0200 |
| ET07     | 10335 | 1377 | 2,2614 | 0,0263   | 2,6777  | 0,0000 | 0,0000 | 1,3000  | 4,1000 | 19,6000 |

Fonte: A Autora.

**Tabela 11** - Análise exploratória da direção da velocidade máxima do vento (m/s) horária para as 7 estações.

### Estatísticas

| Variável | N     | N*   | Média  | EP Média | DesvPad | Mínimo | Q1     | Mediana | Q3     | Máximo |
|----------|-------|------|--------|----------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|
| ET01     | 11227 | 485  | 159,91 | 0,975    | 103,34  | 0,000  | 67,50  | 175,50  | 247,50 | 337,50 |
| ET02     | 11673 | 39   | 150,28 | 0,939    | 101,41  | 0,000  | 45,00  | 135,00  | 247,50 | 337,50 |
| ET03     | 11227 | 485  | 159,91 | 0,975    | 103,34  | 0,000  | 67,50  | 175,50  | 247,50 | 337,50 |
| ET04     | 11696 | 16   | 136,82 | 0,957    | 103,48  | 0,000  | 45,00  | 135,00  | 202,50 | 337,50 |
| ET05     | 11708 | 4    | 173,69 | 0,808    | 87,44   | 0,000  | 90,00  | 202,50  | 225,00 | 337,50 |
| ET06     | 11177 | 535  | 145,99 | 0,838    | 88,63   | 0,000  | 67,50  | 135,00  | 225,00 | 337,50 |
| ET07     | 10335 | 1377 | 227,80 | 0,537    | 54,57   | 1,00   | 235,00 | 243,00  | 249,00 | 360,00 |

Fonte: A Autora.

**Tabela 12** - Análise exploratória da pressão atmosférica média (hPa) horária para as 7 estações. A estação ET02 não apresentou dados viáveis para o uso.

### Estatísticas

| Variável | N     | N*   | Média  | EP Média | DesvPad | Mínimo | Q1     | Mediana | Q3     | Máximo |
|----------|-------|------|--------|----------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|
| ET01     | 11393 | 319  | 1015,4 | 0,0483   | 5,15    | 998,0  | 1012,0 | 1015,0  | 1019,0 | 1032,0 |
| ET03     | 11572 | 140  | 1016,3 | 0,0491   | 5,28    | 999,8  | 1012,7 | 1015,9  | 1019,8 | 1033,3 |
| ET04     | 11696 | 16   | 1016,0 | 0,0485   | 5,24    | 999,9  | 1012,3 | 1015,4  | 1019,5 | 1032,4 |
| ET05     | 10599 | 1113 | 1016,3 | 0,0521   | 5,36    | 999,2  | 1012,5 | 1015,8  | 1019,7 | 1034,1 |
| ET06     | 11708 | 4    | 1016,0 | 0,0483   | 5,23    | 999,3  | 1012,4 | 1015,5  | 1019,5 | 1033,0 |
| ET07     | 10462 | 1250 | 1015,8 | 0,0478   | 4,88    | 999,8  | 1012,4 | 1015,3  | 1019,0 | 1030,1 |

Fonte: A Autora.