

Victor Cesar Martins de Aguiar

Variabilidade Temporal de Ressacas na Plataforma Continental Sudeste

Relatório Parcial apresentado ao Curso de Bacharelado em Oceanografia do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para conclusão da disciplina Trabalho de Graduação I.

Área de Concentração: Oceanografia física.

Orientador:

Prof. Dr. Belmiro Mendes de Castro Filho

São Paulo – SP
Junho de 2018

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Hipótese Científica e Objetivo	6
2	Dados e Métodos	7
2.1	Dados	7
2.2	Métodos	7
2.2.1	Edição de Dados	7
2.2.1.1	Reamostragem (<i>resampling</i>)	8
2.2.1.2	Preenchimento de <i>gaps</i>	8
2.2.1.3	Detecção e Correção de Valores Discrepantes	12
2.2.2	Análise de Séries Temporais	12
2.2.2.1	Análise Harmônica	12
2.2.2.2	Filtragem	13
2.2.2.3	Identificação dos Eventos de Maré Meteorológica	14
2.2.2.4	Identificação dos Eventos de Ressaca	14
2.2.2.5	Frequência e Severidade	15
2.2.2.6	Variabilidade e Tendência de Eventos	15
3	Resultados e Discussões	15
3.1	Santos	15

Lista de Figuras

1	Série de nível do mar reproduzida com os dados horários da estação de Cananéia no ano de 1955. O painel superior ilustra a maré prevista, no painel intermediário o sinal observado e no painel inferior a diferença entre o intermediário e o superior, chamado de resíduo.	1
2	Região da Plataforma Continental Sudeste, onde a batimetria local é representada pelo mapa de cores tal que profundidade inferiores à -180 metros foram mascaradas com coloração homogênea azul. As linhas cheias negras representam as isóbatas de -50, -100 e -180 metros e cada símbolo representa uma estação maregráfica, sendo, de sul para norte, respectivamente: Cananeia, Santos, Ilha Fiscal.	2
3	Representação em Diagrama de Gantt dos períodos de cada série de nível do mar (NM) onde IF representa a estação localizada na Ilha Fiscal.	7
4	Séries observadas com <i>gaps</i> inseridos artificialmente (painéis superiores) e comparação entre dados dos mesmos períodos das lacunas - linhas cheias esverdeadas - e seus respectivos modelos obtidos por previsão via SSA (<i>Forecast</i>) - linhas cheias rosáceas - (painéis inferiores). O Skill obtido é exibido no canto inferior direito de cada painel inferior. . . .	10
5	Espectros de amplitude do nível do mar observado (a) e previsto (b) da aplicação do filtro.	13
6	Espectros de amplitude da série observada de Santos antes (a) e depois (b) da aplicação do filtro.	14
7	Distribuição anual de ressacas.	16
8	Duração máxima de eventos de ressaca por ano	17
9	Distribuição sazonal de ressacas.	18
10	Distribuição mensal acumulada dos eventos de ressaca.	19
11	Distribuição mensal de durações máximas de eventos de ressaca.	20

Lista de Tabelas

- | | | |
|---|--|----|
| 1 | Comparação entre diferentes períodos considerados na SSA | 11 |
| 2 | Valores sazonais médios encontrados para a Frequência de Brunt-Väisälä e para Eq. 1. [1] | 18 |

Resumo

O nível do mar varia periodicamente e primariamente devido à ação das componentes de maré que atuam sobre ele. Entretanto, o sinal observado na costa não é somente uma soma de curvas trigonométricas, mas sim uma combinação destas com outras oscilações de períodos tanto submaregráfico quanto supramaregráfico. Um desses agentes modificadores são os ventos que, caso sejam do quadrante sul, típicos de sistemas frontais, transferem *momentum* ao oceano de tal maneira que a resposta desse sistema seja na forma de uma sobrelevação do nível do mar junto à costa. Quando há composição construtiva entre essa resposta costeira e a preamar da maré prevista, ocorre o fenômeno conhecido por ressaca. Empregando séries históricas de nível do mar obtidos entre 1946 e 2013 em três estações ao longo da Plataforma Continental Sudeste (PCSE), situada entre São Paulo e Rio de Janeiro, este trabalho tem como objetivo analisar a variabilidade temporal dos eventos de ressaca na PCSE.

Abstract

Sea level varies periodically and primarily due to tidal harmonic constituents. However, the observed signal is not just a summation of trigonometric curves, but rather a combination of those with subtidal and supratidal oscillations. Winds are one of the modifying agents that, if southerly, *i.e.*, associated with South America cold fronts passage, transfer *momentum* to the ocean such that this system responses elevating sea level along the coastal region. When a constructive composition between this coastal response and the predicted high tide occurs, the storm tide phenomenon arises. Employing sea level historical series obtained from 1946 to 2013 at three stations over the South Brazil Bight (SBB), southeastern brazilian region, this work aims to analyse temporal and spatial variability of such events in the SBB.

1 Introdução

As oscilações da superfície do mar nas regiões costeiras são devidas, principalmente, à composição de dois processos físicos que têm origens diferentes. Primeiro, as oscilações periódicas, determinísticas, geradas por forças gravitacionais do sistema Terra-Lua-Sol, conhecidas como marés. O segundo tem origem nos processos de interação oceano-atmosfera e gera oscilações não periódicas. Essa composição abrange diferentes escalas temporais devido à variação espectral do segundo processo.

Na Figura 1, por exemplo, há a representação da oscilação do nível do mar relativo em Cananéia, litoral sul de São Paulo. Nesta, o painel superior exibe a variação devido à maré prevista, ou seja, considerando somente o papel das forças gravitacionais do sistema Terra-Lua-Sol. Em seguida, no painel intermediário, é exibido o sinal observado das oscilações do nível do mar. E por último, no painel inferior, está representada a componente residual, *i.e.* não-astronômica, em geral devida aos processos de interação oceano-atmosfera.

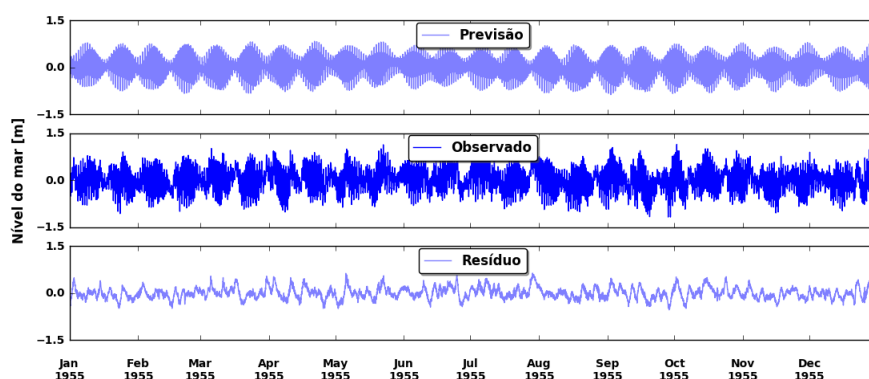


Figura 1: Série de nível do mar reproduzida com os dados horários da estação de Cananéia no ano de 1955. O painel superior ilustra a maré prevista, no painel intermediário o sinal observado e no painel inferior a diferença entre o intermediário e o superior, chamado de resíduo.

Inserir-se neste contexto o fenômeno amplamente conhecido por ressaca. No dicionário Caldas Aulete tal termo é apresentado como: "*Forte movimento das ondas do mar ao se chocarem contra o litoral*". Para a sociedade em geral, ressaca é associada a eventos de grandes ondas, mar bravio e condições de mau-tempo que causam grande destruição da orla, inundações costeiras e interrupção do tráfego marítimo. Logo, a definição apresentada por Caldas Aulete condiz com a visão pública sobre o fenômeno.

Sob a óptica da segurança pública, pode-se dizer que a difusão deste termo é de grande valia, tendo em vista que um alerta de ressaca emitido pelas autoridades competentes é entendido de igual forma pelos cidadãos. Entretanto, justamente por seu uso disseminado, grandes desinformações podem ser levadas adiante, como um caso vivenciado por esse autor após a ressaca observada ao longo da costa sudeste brasileira entre os dias 29 e 30 de outubro de 2016. Em uma conversa informal com um guarda-vidas no município costeiro de Peruíbe, em São Paulo, o mesmo relatou que a ressaca presenciada seria uma resposta do oceano frente à alteração do eixo de rotação da Terra devido a um evento de superlua ocorrido dias atrás.

Já com relação à comunidade científica, o uso do termo ressaca não apresenta um consenso amplo. Há a vertente que considera como ressaca o fenômeno como descrito pelo verbete do dicionário previamente citado, isto é, considerando o papel de ondas (p. ex. [2]), existe também o grupo que emprega o termo como sinônimo de *storm surge* – vide [3] – (e.g. [4]) e ainda há aquele que o considera como uma tradução do termo *storm tide*, descrito pela *National Oceanic and Atmospheric Administration*.

Doravante, será adotada a última interpretação que, sob este ponto de vista, em suma, define ressaca como a composição construtiva entre elevações da superfície do mar oriundas da interação oceano-atmosfera, conhecidas também por "marés meteorológicas", que neste trabalho possui o mesmo significado de *storm surge*, e elevações por marés de grandes amplitudes (sizígia). Em outras palavras,

considera-se que eventos de ressacas ocorram quando há coincidência de ventos que promovam o empilhamento de água junto à costa e a preamar de marés de sizígia.

A Plataforma Continental Sudeste (PCSE) é a área de estudo deste trabalho. Situada na costa sudeste brasileira, é limitada ao norte por Cabo Frio (22.9°S), localizado no estado do Rio de Janeiro, e ao sul pelo Cabo de Santa Marta (28.6°S), no estado de Santa Catarina. Este embaixamento apresenta um formato característico de Lua Crescente, cuja largura varia entre 70 km nas regiões distais e 200 km na porção central. A topografia de fundo é relativamente suave, com isóbatas seguindo aproximadamente a linha de costa e a quebra da plataforma variando entre 150 e 180 m de profundidade (Fig. 2) [5].

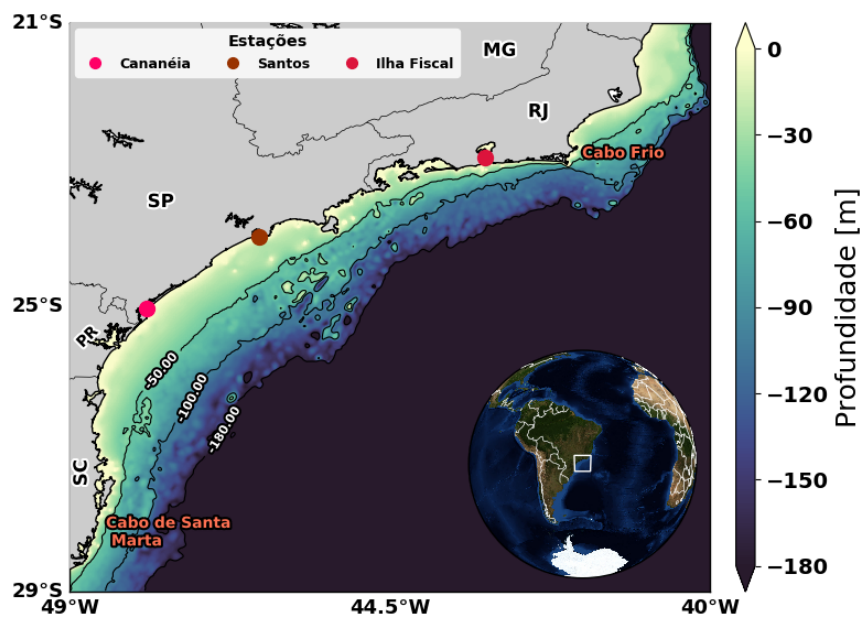


Figura 2: Região da Plataforma Continental Sudeste, onde a batimetria local é representada pelo mapa de cores tal que profundidade inferiores à -180 metros foram mascaradas com coloração homogênea azul. As linhas cheias negras representam as isóbatas de -50, -100 e -180 metros e cada símbolo representa uma estação mareográfica, sendo, de sul para norte, respectivamente: Cananéia, Santos, Ilha Fiscal.

Dos quatro estados brasileiros que margeiam a PCSE, o Estado de Santa Catarina (SC) é aquele que está localizado na porção mais meridional da área de estudo. Contando com 38 municípios costeiros, segundo o censo realizado em 2010 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população catarinense litorânea é estimada em 2 milhões e 430 mil habitantes (cerca de 39 % da população estadual). Em seguida, ao norte de SC, há o Estado do Paraná (PR). Com 7 municípios costeiros, a zona litorânea conta com uma população de duzentos e sessenta e cinco mil habitantes, perfazendo um total de, aproximadamente 2.5 % da população do estado. Em seguida, o Estado de São Paulo (SP) apresenta, ao longo de sua costa, um total de 16 municípios costeiros onde, somados, representam uma população de aproximadamente dois milhões e duzentos mil habitantes, isto é, aproximadamente 5% da população do estado. Por último, Rio de Janeiro (RJ), o Estado localizado na porção mais setentrional da PCSE, apresenta quase dez milhões de pessoas vivendo na região costeira, o equivalente à aproximadamente 65% da população do estado. Dessa forma, torna-se evidente que eventos energéticos como as ressacas podem impactar um número expressivo de cidadãos.

É fato sabido que a zona costeira brasileira apresentou, e ainda apresenta, um papel deveras significativo no processo histórico de formação nacional, seja como a porta de entrada para a armada cabralina em 1500, bem como a criação das primeiras vilas, no desenvolvimento econômico e até no estabelecimento da família Real portuguesa em território além-mar. Consequentemente, a relação sociedade - mar é simultânea ao processo de ocupação litorânea, não somente no que se refere à pesca e navegação, mas também no que concerne aos impactos naturais causados do segundo sobre o primeiro.

Neste tocante, data-se de 1541 o registro mais antigo nacional conhecido de um evento altamente energético que se abateu sobre uma região costeira, a Vila de São Vicente, e que foi reportado pela primeira vez por frei Gaspar da Madre de Deus, em 1797 ([6]). Segundo o relato do beneditino:

"Para Matriz, erigiu uma igreja, com o título de Nossa Senhora da Assunção: fêz cadeia, casa do Concelho e tôdas as mais obras públicas necessárias; foi porém muito breve a duração de seus edifícios, porque tudo levou o mar."

Mais adiante o autor relata:

"No ano de 1542, já não existia a casa do Concelho e a povoação tinha se mudado para o lugar onde hoje existe, segundo consta de alguns termos de Vereações dêsse tempo, nos quais acho que os Camaristas se congregaram na Igreja de Nossa Senhora da Praia em 1 de janeiro..."

Ambos trechos anteriores, retirados da obra do frade, não deixam dúvidas que um evento devastador ocorreu sobre a Vila de São Vicente. Tal ocorrido é abordado quase 200 anos depois pelo historiador Mário Neme ao discorrer sobre a decadência de S. Vicente e o progresso de Santos ([7]):

"Em fins de 1541 verifica-se a destruição pelas águas do mar de diversas construções da vila, entre as quais, com toda certeza, a conhecida 'casa de pedra' ou fortaleza, da qual não se volta mais a falar e não é encontrada dez anos depois por Tomé de Sousa, quando visita a capitania de São Vicente."

Posteriormente, o mesmo historiador supõe que a destruição da vila teria ocorrido devido à ação de um "maremoto". Entretanto, como apontado pelo geólogo e professor aposentado pela Universidade de Brasília, José Alberto Vivas Veloso, não há nenhum registro histórico que mencione a percepção de qualquer tremor de terra. Por conseguinte, o autor propõe que a razão mais provável tenha sido um evento de ressaca intenso ([8]). Para o mesmo, é plausível que esse tenha sido o agente destrutivo, tendo em vista que a vila, que abrigava cerca de 150 habitantes e possuía majoritariamente construções não mais avançadas que cabanas de pau a pique, era muito vulnerável à eventos como os de ressaca.

Dos casos atuais, o mais emblemático da influência de ressacas sobre as cidades litorâneas do sudeste foram os eventos ocorridos na ciclovia Tim Maia, entre os bairros de São Conrado e a Barra da Tijuca, na zona sul do RJ. Além dos dois desabamentos, um em 2016, onde culminou na morte de duas pessoas, e outro em 2018, a ciclovia é constantemente interditada. Já na cidade de Santos, apesar dos eventos recentes não registrarem vítimas, há prejuízos financeiros tanto para o setor público quanto privado. Além das perdas causadas pelas avarias nas construções junto à orla, há também aqueles associados à interrupção do tráfego marinho, especialmente com relação à atividade portuária. Como exemplo, o periódico *A Tribuna* relatou que, devido à um evento de ressaca em abril de 2016, o tráfego no canal de navegação do Porto de Santos foi paralisado por mais de trinta horas causando, assim, um prejuízo superior à US\$ 1 milhão.

Para se compreender cientificamente como esses fenômenos são formados, é necessário primeiramente avaliar a resposta do nível do mar relativo frente às forçantes atmosféricas e astronômicas.

O nível do mar junto à costa está intimamente correlacionado com a resposta oceânica frente às forçantes atmosféricas. Na PCSE, por exemplo, esta resposta pode se dar como um rebaixamento do nível do mar para as condições de "tempo bom", isto é, quando os ventos sopram majoritariamente de norte - nordeste, ou como um aumento relativo do nível do mar na região costeira devido à incursão de frentes frias, quando os ventos sopram de sul - sudoeste.

No Atlântico Sul, assim como nas outras bacias oceânicas, uma feição atmosférica de grande escala e semipermanente atua na dinâmica e clima local. Denominado Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), este sistema apresenta variações sazonais de intensidade e posição. Por exemplo, no mês de agosto ele se encontra mais intenso (1026.0 mbar) e mais próximo ao continente, e, entre dezembro e abril, está deslocado para leste e menos intenso (1021.0 mbar)[9]. Nesta estação, os ventos do quadrante leste são predominantes, tanto pela ação do ramo oeste do ASAS sobre a PCSE quanto pela formação de uma circulação de mesoescala de brisa marinha [10]. Em ambos os casos, a atuação desses escoamentos ocasiona um rebaixamento do nível do mar junto à costa.

Por outro lado, perturbações na forma de sistemas meteorológicos frontais são uma importante fonte de energia para os fenômenos costeiros, especialmente nos estudos de variação subinercial do nível do mar. Em suma, sistemas frontais são causados pela propagação de ondas de Rossby na atmosfera,

as quais propiciam o surgimento de centros de alta e baixa pressão próximos da superfície e também movimentos verticais caracterizados pelas diferenças de densidade do ar. Estas feições produzem deformações nos campos horizontais e verticais de vento e de temperatura que evoluem no tempo e no espaço, caracterizando a passagem destes distúrbios atmosféricos.

Utilizando dados de pressão ao nível médio do mar (PNM) e da altura geopotencial em 500 hPa dos meses de maio a agosto, entre 1960 e 2002, [11] avaliou os padrões sinóticos associados às incursões de frentes frias sobre o estado de São Paulo. Empregando a técnica de Padrões de Sequências Principais nos dados de PNM, o autor chegou no mesmo cenário encontrado em outros trabalhos (e.g. [12]): um anticiclone sobre a costa chilena e um ciclone sobre o Atlântico. Já a análise da primeira componente da altura geopotencial em 500 hPa revelou a presença de uma crista associada à região de alta pressão em superfície e um cavado, com eixo orientado no sentido NW - SE, com sua região central sobre o S -SE brasileiro no dia da detecção da frente fria em São Paulo.

A PCSE, por exemplo, é atingida o ano todo por frentes frias que se propagam de sul para norte, algumas vezes quase paralelamente à linha de costa, e que alteram a circulação média da seguinte maneira: (1) com a aproximação do sistema, no setor quente, a componente meridional do vento é rotacionada anticiclonicamente de nordeste para noroeste; (2) imediatamente após a passagem da frente fria, em sua retaguarda, os ventos apresentam sentido totalmente oposto ao cenário do ASAS, isto é, sopram do quadrante sul; (3) aproximadamente um dia após a incursão do sistema meteorológico os ventos voltam a apresentar o cenário semipermanente de nordeste [13].

De maneira contraintuitiva, a primavera é a estação do ano que mais apresenta entrada de frentes frias sobre a PCSE: em média entre 11 e 12 eventos [14]. Não obstante, é durante o inverno que a componente meridional dos ventos vindos de sul é mais intensa. Além disso, [15] identificou um período médio de 8 dias entre a passagem de duas frentes frias consecutivas.

[16] analisaram a resposta subinercial do nível do mar forçado por ventos na região da PCSE e indicam flutuações de baixa frequência em dois períodos distintos: predominância de perturbações entre 9 e 12 dias que se propagam em direção ao equador com velocidade entre 8 a 10 m s⁻¹ e perturbações entre 6 e 7 dias, menos intensa, que também se propagam em direção ao equador, com velocidade estimada em 10 m s⁻¹ que acompanham o deslocamento de frentes frias. Ademais, os autores apontam que tais perturbações no nível do mar em baixas frequências podem ser explicadas à partir da teoria de Ondas de Plataforma Continental, que são geradas tanto na região de estudo quanto em porções mais ao sul da PCSE.

Como demonstrado até o momento, o nível relativo do mar na PCSE é fortemente influenciado pelas condições atmosférica regionais, especialmente de acordo com qual cenário dinâmico ocorre em um determinado momento. Entretanto, a resposta do nível do mar pode também não estar em fase com a tensão de cisalhamento do vento. Isto é, há a contribuição de um vento local - onde o levantamento do nível do mar junto à costa possui uma defasagem de poucas horas - e de um vento remoto, que ocorre ao sul da estação de medição, onde a resposta da PCSE apresenta um retardo entre 10 e 15 horas [10].

Em 2003, o então professor titular da Universidade Federal de Rio Grande, Prof. Dr. Eloi Melho Filho, relatou em sua Tese um evento que demonstra muito bem a influência de perturbações remotas na PCSE ([2]). Segue abaixo o trecho extraído do mesmo:

"... as condições de mar estavam bastante severas devido à passagem de um ciclone extra-tropical na costa do Uruguai e do Sul do Brasil, o qual provocou ventos muito intensos sobre o mar naquela região. Além das ondas que bombardearam as praias que recebem a ondulação proveniente de Sul, o nível do mar na costa de Santa Catarina subiu bastante durante este evento. De acordo com as observações da velocidade de deriva da bóia (para o norte), a corrente que se desenvolveu na plataforma continental foi de uma intensidade muito forte, surpreendendo a todos. A velocidade estimada da deriva foi de cerca de 1.5 m s⁻¹."

Durante o ocorrido, o autor se encontrava ao largo da ilha de Santa Catarina e, segundo o mesmo, os ventos na região não se intensificaram. Ainda de acordo com o Prof. Dr. Eloi, o ciclone extra-tropical se moveu em direção ao oceano aberto ainda ao largo da costa uruguaia / gaúcha, sendo esta a razão pela qual as condições atmosféricas não apresentaram mudanças significativas. Dessa maneira, torna-se

claro a influência de forçantes remotas na hidrodinâmica costeira da PCSE.

O vento remoto influencia também regiões da plataforma continental média (profundidades entre 40 m e 100 m, tipicamente), e não requer grandes intensidades da componente da tensão de cisalhamento paralela à costa para que Ondas de Plataforma Continental [17] sejam geradas e se propaguem ciclonicamente ao longo da costa.

Já a resposta ao vento local é típica de regimes altamente friccionais, isto é, quando a intensidade da componente do vento paralela à costa é grande e nas pequenas profundidades da plataforma continental interna (< 40 m), onde a camada limite de fundo ocupa parte substancial da coluna de água. Quando o vento possui estrutura (variabilidade espacial) ao longo da costa, a resposta do nível do mar ocorre na forma de Onda Topográfica Aprisionada [18].

Na PCSE, ambas as formas de resposta, ao vento local e ao vento remoto, têm sido observadas. Ondas de Plataforma Continental foram primeiramente detectadas na região por [10] e [16] em variações subinerciais da altura da superfície do mar. Posteriormente, [19] observaram que a velocidade de propagação das OPCs na PCSE variam ao longo da região, sendo mais rápidas na porção sul ($10.4 \pm 0.5 \text{ m s}^{-1}$) do que no norte ($7.7 \pm 0.3 \text{ m s}^{-1}$). [20] analisaram 40 anos de dados de variação subinercial da superfície do mar medidos em Santos, em conjunto com dados de ventos e de pressão atmosférica, concluindo que eventos extremos de elevação da superfície do mar não são caracterizados por respostas às tensões de cisalhamento do vento locais, dependendo do vento remoto na região situada ao sul de Santos. [21] comprovaram a presença de ondas barotrópicas na PCSE, em continuação a processos coerentes que ocorreram na costa argentina.

[13] verificaram, através de experimentos de modelagem numérica, que a resposta pode acompanhar o deslocamento da forçante, caracterizando a importância da forçante local da tensão de cisalhamento do vento num regime altamente friccional similar à Onda Topográfica Aprisionada. [22] verificaram que na região de Ubatuba o levantamento pelo vento apresentou alta correlação com o vento local paralelo à costa. [1], analisando dados correntográficos e aplicando modelos semi-analíticos, mostraram que a resposta subinercial da PCSP ao vento sinótico pode estar aproximadamente em fase com o vento, dependendo das escalas de variabilidade temporal da tensão de cisalhamento.

Assim, essa resposta à tensão de cisalhamento do vento tem escala espacial ao longo da costa da ordem de 1000 km e escala temporal de alguns poucos dias a algumas poucas semanas.

O segundo processo físico responsável pelo fenômeno de ressaca é a modulação quase quinzenal das marés semidiurnas, que apresentam suas maiores amplitudes em períodos de Lua Cheia e Lua Nova. No jargão oceanográfico essas marés são conhecidas como marés de sizígia. Na Plataforma Continental de São Paulo (PCSP), localizada na porção central da PCSE, as alturas de preamares de sizígia podem atingir valores superiores a 1 metro ([23]). Nesta mesma região, as principais componentes semidiurnas de maré (M2 e S2) comportam-se quase como co-oscilantes com o oceano profundo, apresentando pequenas diferenças de fase ao longo da costa e elipses de correntes altamente polarizadas na direção perpendicular à costa ([24];[25]).

Os estudos de variabilidade climática de eventos de ressaca ainda são incipientes, de tal modo que grande parte das publicações se referem à variabilidade de marés meteorológicas que, com ressalvas, podem fornecer pistas sobre o quadro de ressacas. No Hemisfério Norte, empregando séries temporais de elevação do nível do mar e dados de reanálise de ventos, [26] observaram uma forte tendência positiva na frequência e severidade dos eventos de *storm surge* na porção noroeste do Mar do Norte entre os anos de 1955 e 2000.

Ademais, em um estudo conduzido por Sweet & Zervas (2011) [27] durante a temporada fria (outubro à abril) na costa Leste dos Estados Unidos, revelou que a intensidade e o número de eventos de ressaca são maiores durante eventos de El Niño considerados fortes.

Na Nova Zelândia, [28] apontam que a intensidade dos eventos de *storm surge* na região de Tauranga varia sazonalmente e em períodos decadais. Os autores ainda indicam que essa variabilidade responde às alterações atmosféricas possivelmente causadas por mudanças na frequência de tempestades ou pela distribuição regional dos sistemas de pressão. Ademais, com o emprego de ondaletas, demonstram que há componentes *quasi*-periódicos na escala de 2 - 8 anos e 8 - 32 anos que podem estar associados

às oscilações como El Niño Oscilação Sul (ENSO) e a Oscilação Interdecadal do Pacífico (IPO). Por último, assinalam que a mudança no regime de *storm surge* por volta da metade da década de 1970 pode estar associada com a alteração de fase da Oscilação Interdecadal do Pacífico.

Já na América do Sul, especificamente na região de Mar de Plata, Argentina, empregando uma série histórica de nível do mar (1956 - 2005), [29] verificaram que na última década da série temporal (1996 - 2005), houve um aumento médio de 7% no número de eventos de maré meteorológica comparativamente à cada década predecessora. Ademais, os autores também observaram um aumento na intensidade e duração dos eventos: 8 centímetros superior nas duas últimas décadas e 2 horas a mais de duração (28 hrs) do que nas três últimas décadas (26 hrs).

No Brasil, os estudos sobre ressaca em grande parte se baseiam nas publicações de noticiários. Essa abordagem, apesar de apresentar a visão da sociedade com relação ao fenômeno, é suscetível à mudanças que ocorram no veículo de comunicação, que pode dar mais ou menos enfoque em um determinado tipo de notícia.

Por exemplo, [30] empregou notícias de jornais de Santa Catarina, de *sites* especializados em assuntos marinhos e arquivos de órgãos públicos, para o levantamento de eventos de ressaca ocorridos entre os anos de 1991 e 2001 no referido estado. Segundo os autores, dos 18 casos registrados, todos apresentaram presença ou proximidade das Luas Cheia ou Nova.

De maneira similar, [31] utilizou matérias vinculadas à imprensa de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul (RS), bem como informações geradas pela Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina/Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina (EPAGRI/CIRAM), em um levantamento de ressacas, afogamentos e acidentes com embarcações ocorridos em SC e no RS entre 2009 e 2010. Segundo os autores, dos 18 eventos noticiados, 10 ocorreram durante maré de sizígia (55.5 %).

Ainda na região sul do Brasil, [32] realizou o levantamento de registros de ressaca através de reportagens de jornais *online* e impressos e por meio do Departamento Estadual de Defesa Civil do Estado de Santa Catarina. Entre o período de 2001 a 2010 a autora encontrou um total de 60 eventos registrados, donde, destes, 59% ocorreram em períodos de maré de sizígia e, em 14% dos casos, o cenário maregráfico observado era a conjuntura de maré de sizígia e perigeu lunar.

[33] empregou notícias de periódicos estabelecidos na região da Baixada Santista, no estado de São Paulo, entre os anos de 1960 e 2011, com o intuito de avaliar os padrões atmosféricos e oceanográficos associados à ocorrência do fenômeno, bem como sua variabilidade anual. Os resultados revelam que tais eventos se concentram nas estações de outono e inverno (40.4% e 36%, respectivamente), também encontrados por [20]. Além disso, as ressacas ocorreram majoritariamente durante marés de sizígia (49.4%) e em 69.7% dos casos era ano de El Niño.

Este trabalho pretende contribuir aos estudos de ressacas na região sudeste brasileira, tópico que, apesar de sua relevância, ainda apresenta lacunas, sob a óptica observacionista e sob uma definição, diferentemente dos trabalhos citados anteriormente que se baseavam em levantamentos de notícias e correlacionavam os eventos com os cenários meteo-oceanográficos encontrados no dia da observação do evento. Ademais, este trabalho pode também contribuir

1.1 Hipótese Científica e Objetivo

Define-se como hipótese deste trabalho que os eventos de ressaca na PCSE possuem variabilidade sazonal e interanual e que os eventos têm aumentado de frequência, intensidade e duração ao longo dos anos. Assim, estabelece-se então como objetivo o estudo das ressacas na costa da PCSE, analisando suas variabilidades temporais e a evolução dos fenômenos ao longo dos anos.

2 Dados e Métodos

2.1 Dados

Para a realização deste trabalho serão empregadas séries históricas de elevação nível do mar obtidas em três marégrafos distribuídos ao longo da costa dos estados de São Paulo (Cananéia e Santos) e Rio de Janeiro (Ilha Fiscal) (Figura 2).

A Figura 3 representa, por meio de um Diagrama De Gantt, o comprimento de cada série temporal a ser empregada no trabalho. Organizadas de norte (Ilha Fiscal) para sul (Cananéia), elas apresentam, respectivamente, 48, 46 e 52 anos de dados.

As distâncias ao longo da costa entre as estações de Cananéia (CN) e Santos (SA) é de aproximadamente 190 km enquanto que entre CN e Ilha Fiscal (IF) corresponde a aproximadamente 530 km. Com excessão dos períodos recentes de Cananéia e Ilha Fiscal, a taxa de amostragem de todas as outras séries é de uma hora.



Figura 3: Representação em Diagrama de Gantt dos períodos de cada série de nível do mar (NM) onde IF representa a estação localizada na Ilha Fiscal.

As séries de Cananéia, sob responsabilidade do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP), e de Ilha Fiscal, mantida pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil, são as que exibem maior tempo de medições dentre os marégrafos brasileiros. Apesar de apresentarem, respectivamente, 52 e 48 anos de dados, ambas estações possuem diversas lacunas, impedindo assim análises contínuas de longo termo sobre determinado fenômeno. Ademais, em casos como o de Santos, muitas observações não perpetuam até os dias atuais, fazendo com que análises sejam restritas à décadas passadas além de impossibilitar estudos mais longos de variabilidade, como decadais ou interdecadais.

Enquanto as séries de Cananéia e Ilha Fiscal estão disponíveis no sítio virtual do projeto *The Global Sea Level Observing System (GLOSS)*, a série de Santos foi cordialmente cedida pelo Prof. Dr. Ricardo de Camargo, do Instituto de Astronomia e Geofísica da Universidade de São Paulo, e pelo Prof. Dr. Joseph Harari, do IOUSP.

2.2 Métodos

2.2.1 Edição de Dados

Nessa primeira etapa de processamento precedente à análise de séries temporais, denominada edição de dados, serão empregados métodos para reamostragem de dados, checagem e retirada de valores errados e preenchimento de lacunas nas séries temporais.

2.2.1.1 Reamostragem (*resampling*) Para este trabalho, as frequências de amostragem serão padronizadas em 1 hora, de tal forma que é realizada uma média aritmética sobre cada intervalo a ser reamostrado.

2.2.1.2 Preenchimento de *gaps* Com exceção da série temporal de Santos, todas as outras apresentam hiatos, grandes (anos) ou pequenos (algumas horas). Levando em conta justamente esse fator, ou seja, o intervalo de duração de cada *gap* (I), será aplicada uma metodologia diferente para cada caso:

$I \leq 6$ horas: Como indicado por [34], o método de interpolação linear é o mais indicado para períodos curtos.

$6 \text{ horas} < I \leq 15$ dias: Neste intervalo, encontra-se o problema em aplicar um método adequado de interpolação. Diversas técnicas têm sido utilizadas na área de processamento de dados geofísicos para solucioná-lo [35].

Um método que tem se mostrado eficaz e poderoso é a Análise Espectral Singular (*Singular Spectrum Analysis - SSA*). A idéia básica por trás da SSA é reconstruir uma dada série Y_t a partir da soma de suas componentes principais, as quais representam sinais como tendência, comportamento oscilatório e ruídos. Além de seu papel no preenchimento de *gaps*, a SSA também pode ser empregada no alisamento de séries temporais, realização de previsões e extração de componentes sazonais.

Em suma, o método pode ser separado em dois estágios complementares, onde cada um é ainda dividido em outras duas etapas:

1. Decomposição:

- Incorporação;
- Decomposição em Valores Singulares (SVD);

2. Reconstrução:

- Agrupamento;
- Média Diagonal

Uma abordagem mais detalhada sobre cada etapa pode ser conferida em [36].

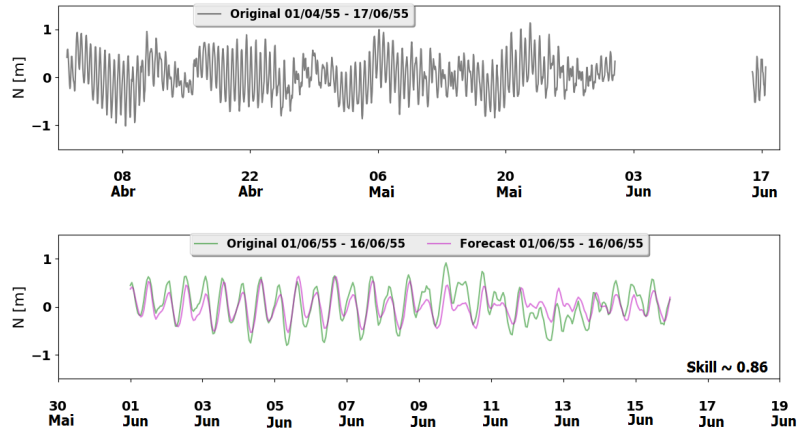
$I > 15$ dias: Como apontado por [34], é preferível trabalhar com pequenos fragmentos individuais de dados existentes do que forçar métodos de interpolação para além dos limites aceitáveis. Dessa maneira, optou-se então por não interpolar séries com lacunas maiores do que 15 dias.

O preenchimento de *gaps* por SSA neste trabalho será realizado empregando a técnica de previsão (*forecasting*), uma das ferramentas existentes no método de Análise Espectral Singular. Apesar de existir maneiras mais complexas de se adotar o *forecasting* no preenchimento de lacunas (*e.g.* [37]), neste trabalho se optou pela forma mais elementar, devido à sua simplicidade de aplicação e resultados satisfatórios obtidos, como poderá ser visto adiante.

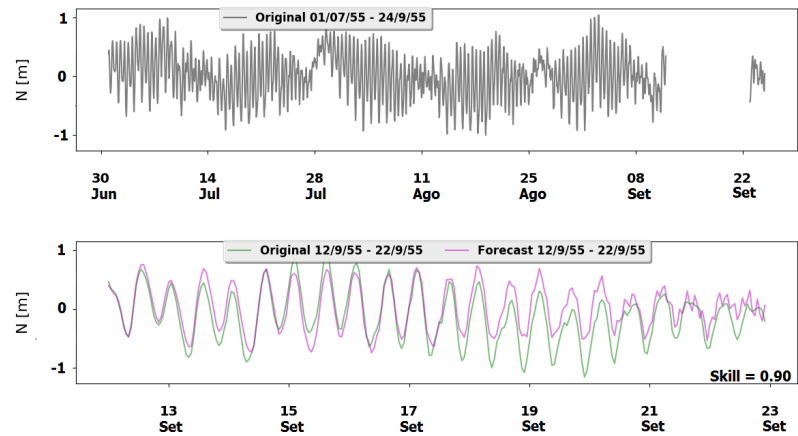
Para empregar este método foi utilizada a biblioteca pySSA, pública para uso e edição. Segundo o autor do código, o mesmo se baseou nos trabalhos da pesquisadora Nina Golyandina (*e.g.* [38]) para desenvolver a biblioteca. Um período de 2 meses precedente à cada *gap* será avaliado sob a luz da SSA para se realizar a previsão e, dessa maneira, o preenchimento das lacunas.

Tal metodologia foi aplicada aos dados do ano de 1955 da estação de Cananéia como uma forma de pré-avaliação do método. Para isso, inseriu-se lacunas artificiais com período de 15, 10 e 2 dias, em meses distintos, com o intuito de comparar a série reconstruída com os dados observados (Figura 4).

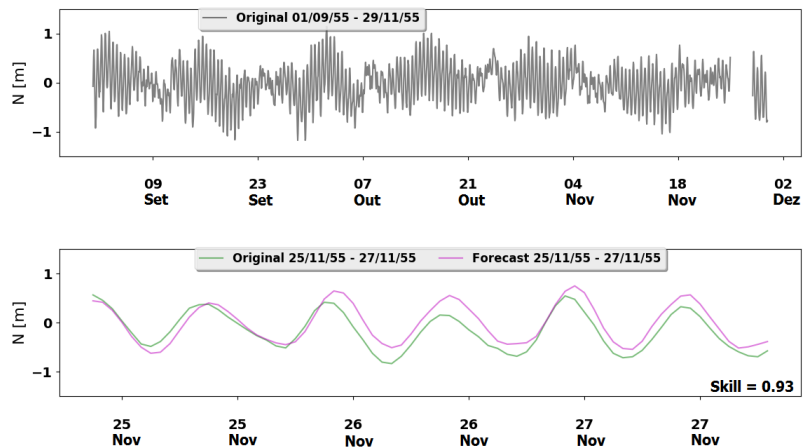
Um modo de avaliar a performance do resultado previsto com os dados observados é empregando o índice de Willmott (*Willmott Skill Score*). Utilizado nos estudos de modelagem numérica e neste trabalho denotado como Skill, o índice proposto por [39] se baseia no erro quadrático médio e varia entre 0 e 1, de tal maneira que o valor máximo (1) simboliza a concordância perfeita entre o modelo e os dados enquanto que o valor 0 representa total desacordo.



(a) Série observada com *gap* de 15 dias artificialmente inserido (painel superior) e comparação entre dados do mesmo período da lacuna - linha cheia esverdeada - e o modelado - linha cheia rosácea - (painel inferior).



(b) Série observada com *gap* de 10 dias artificialmente inserido (painel superior) e comparação entre dados do mesmo período da lacuna - linha cheia esverdeada - e o modelado - linha cheia rosácea - (painel inferior).



(c) Série observada com *gap* de 2 dias artificialmente inserido (painel superior) e comparação entre dados do mesmo período da lacuna - linha cheia esverdeada - e o modelado - linha cheia rosácea - (painel inferior).

Figura 4: Séries observadas com *gaps* inseridos artificialmente (painéis superiores) e comparação entre dados dos mesmos períodos das lacunas - linhas cheias esverdeadas - e seus respectivos modelos obtidos por previsão via SSA (*Forecast*) - linhas cheias rosáceas - (painéis inferiores). O Skill obtido é exibido no canto inferior direito de cada painel inferior.

Tal procedimento também foi realizado para as estações de Santos (SAN), nos meses de novembro, outubro e junho de 1960, e de Ilha Fiscal (IF) em março, junho e setembro de 2002. Os Skills obtidos foram de 0.78 (SAN) - 0.84 (IF), 0.91(SAN) - 0.84 (IF) e 0.95 (SAN) - 0.95 (IF) para 15, 10 e 2 dias, respectivamente. Não obstante, foi também verificado o Skill empregando 5 meses de dados precedentes ao *gap*, afim de investigar se há melhora nos resultados. O processo foi realizado para Cananéia, Santos e Ilha Fiscal para os mesmos períodos das lacunas inseridas anteriormente. O resultado pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1: Comparação entre diferentes períodos considerados na SSA

Estações	2 meses	5 meses	2 meses	5 meses	2 meses	5 meses
	15 dias	15 dias	10 dias	10 dias	2 dias	2 dias
Cananéia	0.86	0.87	0.90	0.89	0.93	0.92
Santos	0.78	0.81	0.91	0.95	0.95	0.98
Ilha Fiscal	0.84	0.92	0.84	0.89	0.95	0.98

Apesar do método apresentar bons Skills, em alguns casos foi encontrado também resultados não satisfatórios. Além do índice obtido para o *gap* de 15 dias de Santos (0.78) em 1960, no ano de 1981 de Ilha Fiscal obteve um Skill de 0.69 para o mês de março e, além disso, também foi encontrado Skill para lacuna de 10 dias (0.79) inferior à de 15 dias (0.91). Ademais, observações sugerem que a precisão do método é sensível ao regime de maré, sendo mais preciso durante os períodos de sizígia do que de quadratura e que, em geral, períodos menores são mais bem interpolados que as lacunas maiores.

Já com relação às lacunas reais, na série temporal de Cananéia foram identificados 22 *gaps* sendo 4 deles com períodos maior do que quinze dias, 2 menores do que seis horas, 13 entre sete horas e dois dias, 2 de dez dias e 1 de quinze dias. Desse total, 16 foram preenchidos com o método de SSA e 2 por interpolação linear. Já para a série temporal de Ilha Fiscal, 13 lacunas foram identificadas sendo que 6 apresentam ausência de dados maior do que 15 dias, 3 entre dois e quatro dias, 1 de oito dias e 3 entre 10 e 14 dias. Todos os 7 *gaps* foram preenchidos com o método de SSA.

Uma outra forma de se avaliar a interpolação é correlacionando o período preenchido com os dados observados nas estações vizinhas. Para isso, empregou-se a análise de correlação cruzada com *lag* ([34]).

Neste trabalho, optou-se por empregar tal técnica somente sobre valores obtidos através da interpolação por SSA. No caso das lacunas interpoladas na série de Cananéia, a correlação cruzada com *lag* foi realizada com a estação de Ilha Fiscal e os coeficientes de correlação obtidos foram separados em dois grupos: entre 7 horas e 2 dias (I), 13 eventos, e entre dez e quinze dias (II), 3 eventos. A escolha em correlacionar Cananéia com Ilha Fiscal se deve ao fato de que as interpolações só passaram a existir a partir de 1991, ano o qual já não há mais dados da estação de Santos

De modo semelhante, as lacunas preenchidas em Ilha Fiscal foram comparadas aos dados observados de Cananéia. Aqui também separou-se em dois grupos: um onde os *gaps* preenchidos variam entre dois e quatro dias (III), 3 eventos, e o segundo com as interpolações realizadas nas lacunas entre 8 e 14 dias (IV), 4 eventos.

Vale ressaltar que, para ambos os casos, a correlação cruzada com *lag* foi feita exclusivamente entre dados observados e interpolados. Em outras palavras, não houve comparação entre duas lacunas preenchidas.

O valor médio das correlações calculadas em cada situação não foi executado via média aritmética direta, mas sim realizando a transformação dos coeficientes de correlação r de Pearson para valores z , via Transformação Z de Fisher, e depois retornando o valor z médio encontrado para o r médio.

Tal técnica foi empregada pois, devido ao fato da correlação cruzada com *lag* estar sendo realizada sobre dados observados e não sobre os filtrados, obteve-se valores de correlação negativo. Logo, caso estes fossem empregados para realizar a média, não seria obtido um valor condizente.

Após a transformação abordada anteriormente, o valor da correlação médio encontrado para as interpolações de Cananéia foram 0.92 (I) e 0.74 (II), enquanto que para Ilha Fiscal se obteve 0.92 (III) e 0.81

(IV). Tais resultados demonstram, como já apontado previamente, que *gaps* menores são preenchidos mais eficientemente do que *gaps* maiores e, por último, que o método apresentou resultados satisfatórios nas interpolações.

Como última observação, vale ressaltar que devido ao fato das correlações cruzadas com *lag* terem sido realizadas com as séries observadas, o valor inferior encontrado para lacunas mais longas remete, supostamente, às interferências dos sinais existentes nas bandas subinerciais. Devido à sua menor amplitude, esses sinais possivelmente não são bem resolvidos pela técnica e, por essa razão, para longos períodos, tal erro se acumula e se torna mais evidente do que quando comparado à períodos mais curtos.

2.2.1.3 Detecção e Correção de Valores Discrepantes [40] apresentaram um procedimento objetivo baseado na sucessiva aplicação de diferenças finitas visando a detecção e correção de dados geofísicos. Para que um dado seja tomado como "errado" pelo programa desenvolvido baseado na pesquisa dos referidos autores, seu erro calculado deve ser maior que um nível de ruído pré-estabelecido o qual, para este trabalho, foi de 0.1.

O mesmo código utilizado em [10] também foi empregado nesta etapa do trabalho. Como há lacunas maiores do que 15 dias presentes na séries de Cananéia e Ilha Fiscal, ou seja, *gaps* não interpoláveis, ambas foram divididas em sub-séries contínuas.

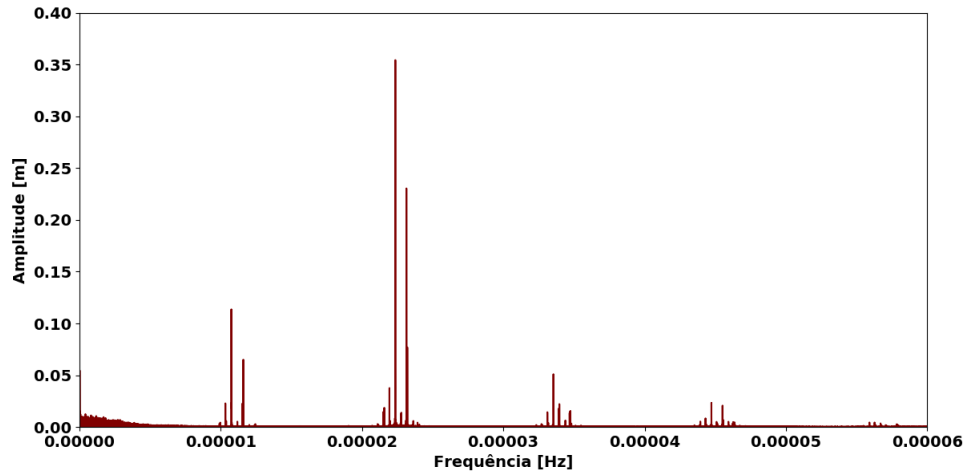
Por último, após tais procedimentos, o programa foi novamente aplicado sobre as séries corrigidas afim de verificar se as correções foram acertadamente realizadas. Para Cananéia, os dados corrigidos contabilizaram 0.58% do total da série enquanto que para Ilha Fiscal a porcentagem foi de 0.15%.

2.2.2 Análise de Séries Temporais

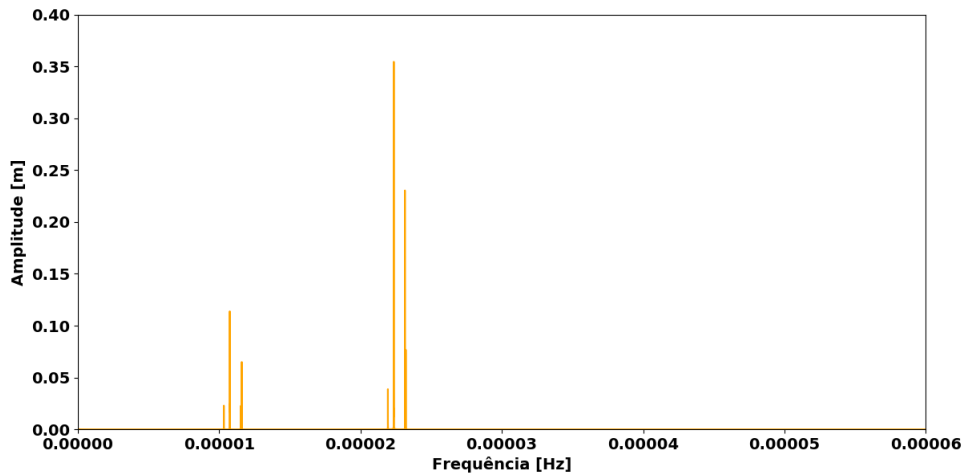
2.2.2.1 Análise Harmônica De acordo com a definição de ressacas utilizada nesse trabalho, para que os eventos sejam detectados é necessário que haja simultaneidade entre os eventos de preamares das marés de grandes amplitudes com os eventos de maré meteorológica. Para tanto, o primeiro passo necessário é determinar o sinal puramente maregráfico, o qual é obtido através de análise harmônica sobre os dados observados.

A aplicação da Análise Harmônica sobre as séries observadas será realizada empregando a versão em Python da biblioteca *Unified Tidal Analysis and Prediction*, escrita por Wesley Bowman e pública para uso. Para isso, optou-se por empregar 8 componentes de maré (Q1, O1, P1, K1, N2, S2, M2 e K2).

Após a realização da Análise Harmônica, a maré previsionada foi comparada com o sinal observado. O Skill encontrado entre as séries observada e a de maré prevista de Santos no período de 1945 - 1990 foi de 0.90. Os espectros de amplitudes no domínio da frequência (Hz) destes dois sinais podem ser observados na Figura 5.



(a) Espectro de amplitudes do sinal observado



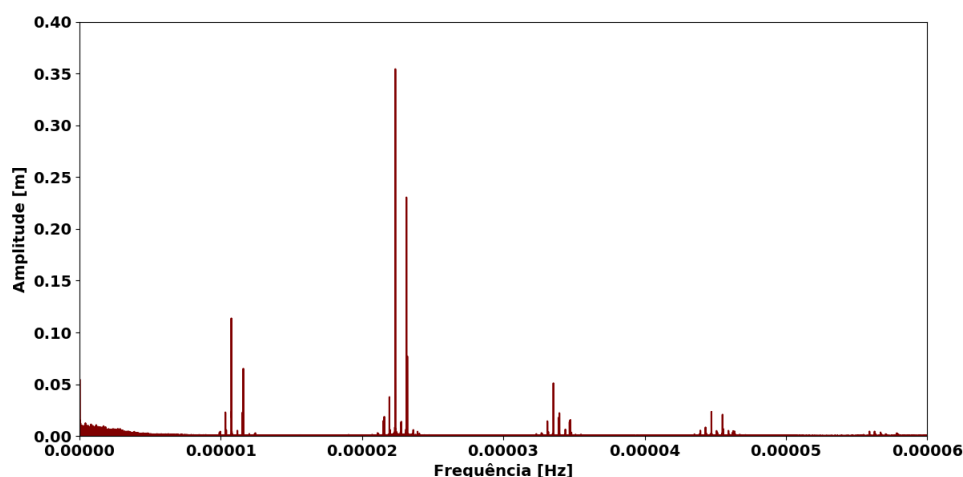
(b) Espectro de amplitudes da maré prevista

Figura 5: Espectros de amplitude do nível do mar observado (a) e previsto (b) da aplicação do filtro.

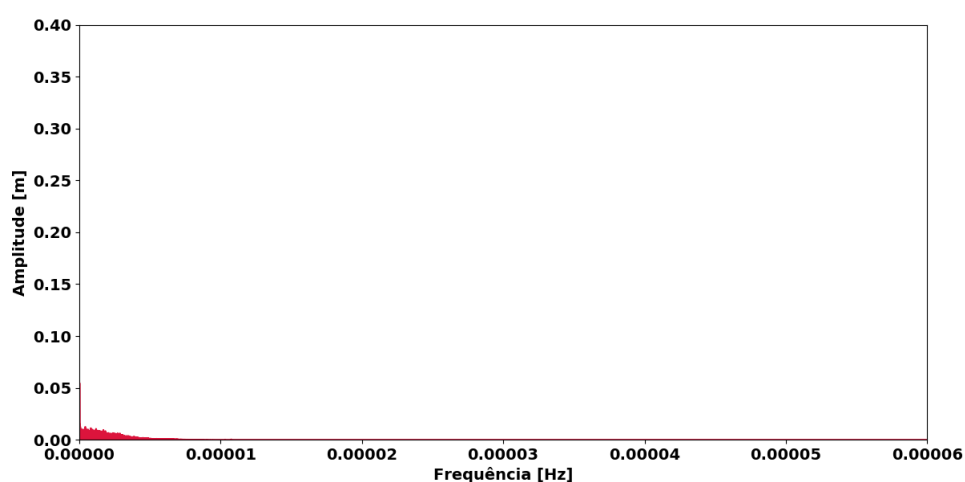
2.2.2.2 Filtragem Como os eventos de ressaca em parte se caracterizam por uma variabilidade de frequência subinercial no nível do mar, é necessário que fenômenos em escala maregráfica (12h - 24h) e de alta frequência sejam retirados da série afim de encontrar as elevações máxima de maré meteorológica. Para isso, será aplicado um filtro cosseno quadrado de Lanczos com período de corte de 40 horas e 41 pontos ($20 + 1 + 20$).

A escolha do filtro é baseada no trabalho de [41], onde se comparou diversos filtros passa-baixa e suas competências em atenuar as componentes de maré com o mínimo de efeito sobre as baixas frequências. Os autores concluíram que o filtro cosseno quadrado de Lanczos foi um dos dois melhores em realizar a tarefa. Assim como apontado por esses autores e constatado neste trabalho, uma única filtragem não retira completamente a energia das componentes diurnas, apresentando resquícios nos períodos de 26.86 horas, 25.81 horas e 23.93 horas, valores muito próximos aos das componentes Q1, O1 e K1, respectivamente ([24]).

Após a segunda filtragem, o sinal obtido a partir da diferença entre o observado e o filtrado foi comparado com a maré prevista por análise harmônica. O Skill obtido para o período de 1945 - 1990 de Santos foi de 0.97. Para esta mesma série é apresentado na Figura 6 o espectro de amplitude da série observada e a filtrada, respectivamente.



(a) Espectro de amplitudes do sinal observado.



(b) Espectro de amplitudes do sinal pós filtragem.

Figura 6: Espectros de amplitude da série observada de Santos antes (a) e depois (b) da aplicação do filtro.

A filtragem realizada promoveu resultados semelhantes às três estações. Para Cananéia e Ilha Fiscal, cerca de 76% da variância original foi retirada do sinal. Já para Santos, o valor alcançado foi levemente superior: 77%. De todo modo, tal procedimento demonstra que o sinal observado é majoritariamente composto pelas oscilações de maré [16].

2.2.2.3 Identificação dos Eventos de Maré Meteorológica Após a retirada da média e do sinal maregráfico, os eventos de maré meteorológica significativos podem ser identificados como aqueles que apresentam valores acima de dois desvios padrões [42].

2.2.2.4 Identificação dos Eventos de Ressaca Será definido como um evento de ressaca aquele que ocorrer simultaneamente durante a elevação máxima da maré de sizígia com uma maré meteorológica, ambos determinados posteriormente.

Para isto, como as marés de sizígia estão intrinsecamente correlacionadas com as fases Cheia e Nova da Lua, os pontos identificados como maré meteorológica serão sincronizados com as fases da Lua e, aqueles que estiverem dentro do período entre as fases de Lua Nova e Lua Crescente ou entre Lua Cheia e Lua Minguante serão tomados como potenciais eventos de ressaca. Para determinar as fases da Lua, será empregada a biblioteca Ephem do Python, pública para uso.

Os eventos que apresentarem duração igual ou superior à aproximadamente 24 horas serão conside-

rados eventos de ressaca, tendo em vista que necessariamente tais acontecimentos ocorreram durante ao menos uma preamar de maré de sizígia. Os episódios de maré meteorológica que apresentarem duração inferior à 24 serão avaliados individualmente e, caso seus picos ocorram inteiramente durante a baixamar de sizígia, serão desconsiderados.

2.2.2.5 Frequência e Severidade Seguindo o método proposto por [42], a frequência é então definida como a quantidade de eventos anuais ocorridos ao longo do período avaliado. Já para a severidade, será avaliada a altura total atingida pelo nível do mar durante a ocorrência do evento. Para isso, será empregado o método utilizado pelo autor referido previamente, adaptado para este trabalho, que se baseia na área total entre a curva do evento de ressaca observado e o nível zero relativo de cada série. Dessa maneira será possível também estimar a contribuição de cada fenômeno (*storm surge* e maré) no evento de ressaca.

2.2.2.6 Variabilidade e Tendência de Eventos Para verificar o aumento da frequência, duração e intensidade dos eventos será analisado, para cada caso, se há tendência positiva da série. Em outras palavras, será averiguado se a propriedade de interesse aumenta consistentemente ao longo do tempo.

Será aplicado, assim, o Teste de Mann-Kendall (MK) ([43], [44]). Este teste não-paramétrico tem como propósito avaliar se, em uma dada série temporal, há tendência monotônica estatisticamente significativa, positiva ou negativa. Duas grandes vantagens do método são a não exigência de normalidade dos dados e seu uso não ser restrito à séries temporais contínuas. Por outro lado, não é indicado empregar o teste em séries que apresentam forte sazonalidade. A hipótese nula de MK assume que os dados são independentes e identicamente distribuídos, ou seja, não há tendência na série.

Se o p -valor calculado por MK for menor do que o nível de significância (α) considerado, a hipótese nula é rejeitada. Neste trabalho, o intervalo de confiança adotado é de 95%, o que implica em $\alpha = 0.05$. Em suma, se p -valor $< \alpha$, rejeita-se a hipótese nula de que não há tendência nos dados. [45]

Caso a hipótese nula seja rejeitada, torna-se natural a tentativa de quantificar a magnitude da tendência presente. Essa estimação, caso necessária, será feita empregando o estimador de declive de Theil-Sen ([46]). Também não-paramétrico, este teste apresenta a vantagem de ser menos sensível à *outliers* e *gaps*, diferentemente da tradicional regressão linear, que requer uma qualidade superior de dados.

3 Resultados e Discussões

3.1 Santos

Inicialmente, foram detectados 409 eventos de maré meteorológica superiores à dois desvios padrões que, quando sincronizados com as marés de sizígia, resultaram em 172 ($\approx 42\%$) potenciais eventos de ressaca. Destes, 12 foram desclassificados segundo a metodologia previamente abordada, totalizando, assim, um total de 160 eventos ($\approx 39\%$). Para [33], o número de ressacas encontrados durante o período de Lua Nova ou Cheia perfazem 49.4% dos casos.

Tanto neste trabalho quanto na pesquisa previamente citada, o período entre 1961 e 1990 é simultâneo e a comparação entre os dois estudos neste intervalo geram duas observação relevantes. No estudo de [33], há registros de 17 eventos de ressaca noticiados pelos periódicos enquanto que neste trabalho o número é de 113. Ainda mais, desses 17 casos, 15 foram identificados utilizando a metodologia descrita donde, destes, 6 (35%) deles ocorreram durante maré de sizígia. Tais observações são que:

- As ressacas que atingem a costa e causam danos visíveis, ou seja, aquelas que são perceptíveis à população em geral e aos noticiários, não ocorreram majoritariamente, como o esperado, durante preamares de marés de sizígia;
- Dentre os 113 casos detectados neste trabalho no período entre 1961 e 1990, apenas 6 foram noticiados. Em outras palavras, aproximadamente 5% dos eventos foram energéticos o suficiente para serem chamados de ressaca pelos noticiários locais.

Uma análise mais detalhada revelou que, dos 11 eventos restantes registrados por [33], 8 deles ocorreram durante marés de quadratura, 1 entre quadratura e sizígia e 2 sequer tiveram uma maré meteorológica significativa para ser considerado como um potencial evento de ressaca.

Por fim, uma ressalva deve ser feita sobre esta pequena discussão comparativa entre os dois trabalhos. Como bem observado por [33], a partir do ano de 1998 um dos jornais que foi avaliado começou a noticiar ressacas de menor magnitude, culminando em um número muito maior de publicações comparado aos anos anteriores. Essa mudança se deve ao fato de que tal veículo de comunicação passou a noticiar *on line* suas notícias, diferentemente do passado, durante a fase impressa, onde se publicava eventos de ressaca somente quando havia danos ou transtornos significativos à população. Dessa maneira, o número de casos que ocorreram entre os anos de 1961 e 1990 talvez tenha sido muito maior do que se foi noticiado.

Dando continuidade, é exibido na Figura 7 a distribuição anual de ressacas. O ano que mais apresentou eventos foi o de 1980, com um total de 9 casos. Em contrapartida, nos anos de 1954 e 1977 não se detectou nenhum evento. A média encontrada foi de 3.48 e a variância de 3.99.

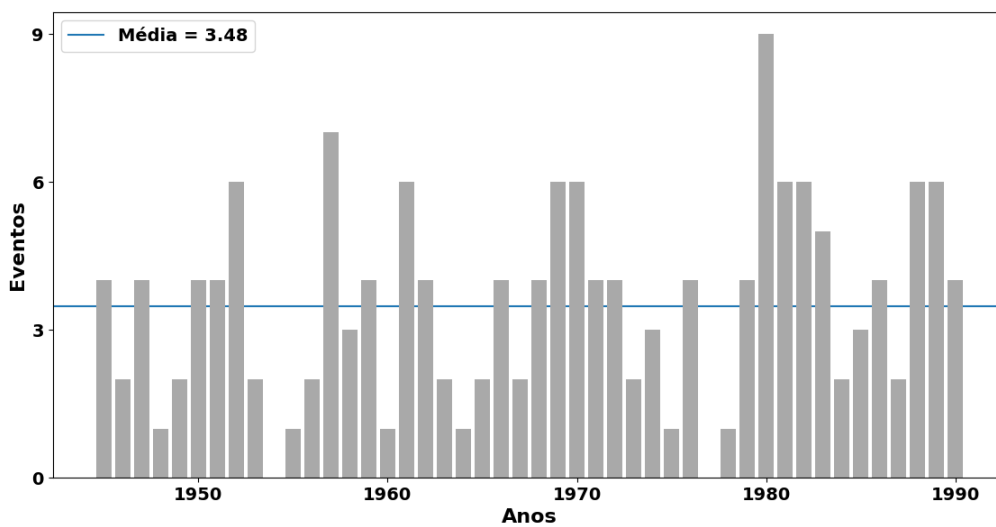


Figura 7: Distribuição anual de ressacas.

De acordo com [47], o primeiro passo para avaliar a tendência de uma série temporal é a simples análise visual. No caso da Figura 7, em um primeiro olhar, a variabilidade anual dos eventos se apresenta mais evidente do que uma suposta tendência. De fato, quando aplicado o Teste de Mann-Kendall, o mesmo apontou que a série não apresenta uma tendência monotônica positiva estatisticamente significativa. Considerando um intervalo de confiança de 0.05, O p -valor encontrado para o teste foi de 0.13.

De maneira similar, realizou-se a análise com relação à duração máxima anual dos eventos de ressaca (Figura 8). O evento mais longo ocorreu no ano de 1969, com duração total de 99 horas, seguido pelo evento de 1985, que registrou uma duração de 93 horas. A variância da série é de 521 e a média de aproximadamente 40 horas. Como pode ser observado na mesma figura, a variabilidade da série se apresenta de forma mais evidente do que uma suposta tendência.

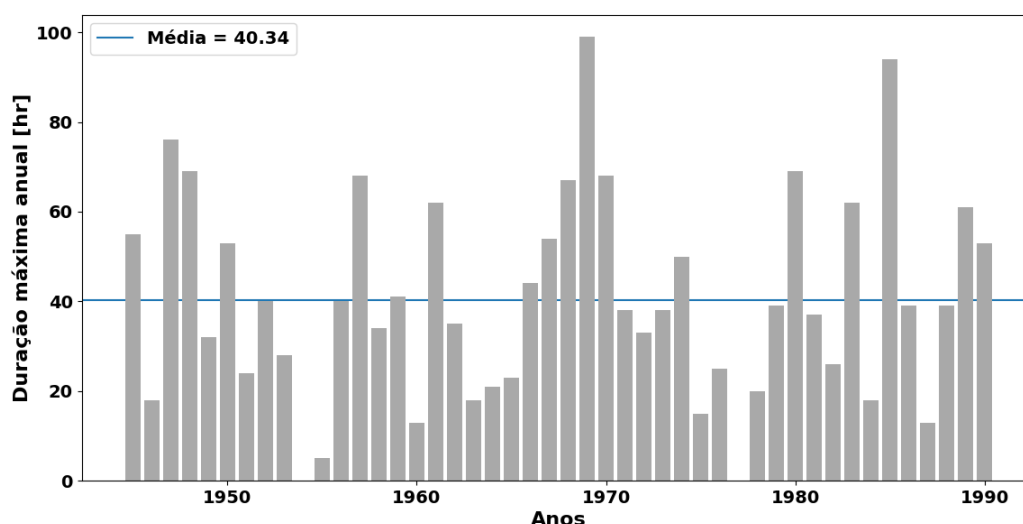


Figura 8: Duração máxima de eventos de ressaca por ano

Novamente, como na série anual de eventos (Figura 7), o MK apontou que não há tendência monotônica positiva estatisticamente significativa na série de duração máxima anual de ressacas. O p -valor encontrado foi de 0.84.

De maneira semelhante se observou para a costa leste dos Estados Unidos prevalecimento da variabilidade dos eventos de maré meteorológica sobre uma possível tendência positiva ([42] e [48]). Entretanto, por outro lado, apesar das pesquisas conduzidas na costa brasileira sugerirem que há tendência positiva considerável no número de eventos de ressaca, especialmente após o ano de 1990 ([33], [49], [50]), vale ressaltar novamente que como tais estudos se basearam no levantamento de notícias e/ou arquivos públicos, há a possibilidade de que a tendência positiva observada pelos autores previamente citados se correlacione, na realidade, com uma alteração no modo que as ressacas foram abordadas ao longo dos anos pelos próprios veículos. Em outras palavras, como apontado por [33], talvez a migração da mídia impressa para a digital possua um papel significativo no aumento de eventos registrados.

Já a Figura 9 apresenta a distribuição das ressacas por estações do ano considerando o período total da série. Como é possível observar, o outono é o período em que mais casos foram detectados, 58 (36.25%), seguido pelo inverno (48 eventos - 30%), verão (30 - 18.75%) e primavera (24 - 15%). [20] também observaram a predominância de eventos de maré meteorológica no outono (40.2%) e no inverno (30.8%), porcentagens semelhantes às encontradas neste trabalho. De modo análogo, como já apresentado anteriormente, [33] também detectou concentração dos eventos de ressaca durante o outono e o inverno, de tal modo que o primeiro, novamente, foi superior ao segundo período (40.4% e 36%, respectivamente).

Para os eventos registrados no litoral do estado de Santa Catarina, [32] também registrou predominância dos eventos na estação de outono (40%), sendo esta acompanhada pelo inverno (23%). Não obstante, a autora observa que a média da velocidade dos ventos durante a primavera é maior do que nas outras três estações e que os eventos registrados durante os meses de outono apresentaram, em média, elevação de "maré meteorológica" e maré astronômica muito semelhantes (aprox. 0.2 metros), dando à esta estação, também, como a que apresenta maiores valores de elevação observados.

Tais descobertas, apesar de não exclusivas desse trabalho, mas em concordância com as pesquisas previamente citadas, apresenta uma informação contraintuitiva que ascende o seguinte questionamento: se a primavera é a estação que há mais entradas de frentes frias e o inverno é a que exhibe maior intensidade da componente meridional dos ventos, por que o outono é aquela em que há mais eventos de ressaca?

Para responder essa pergunta, alguém poderia avaliar o problema sob à luz da estratificação sazonal, isto é, se o campo de densidade atua como um mecanismo interno de tal modo que influencie o desenvolvimento das ressacas. Entretanto, neste tocante, [1] analisaram a resposta da Plataforma Continental

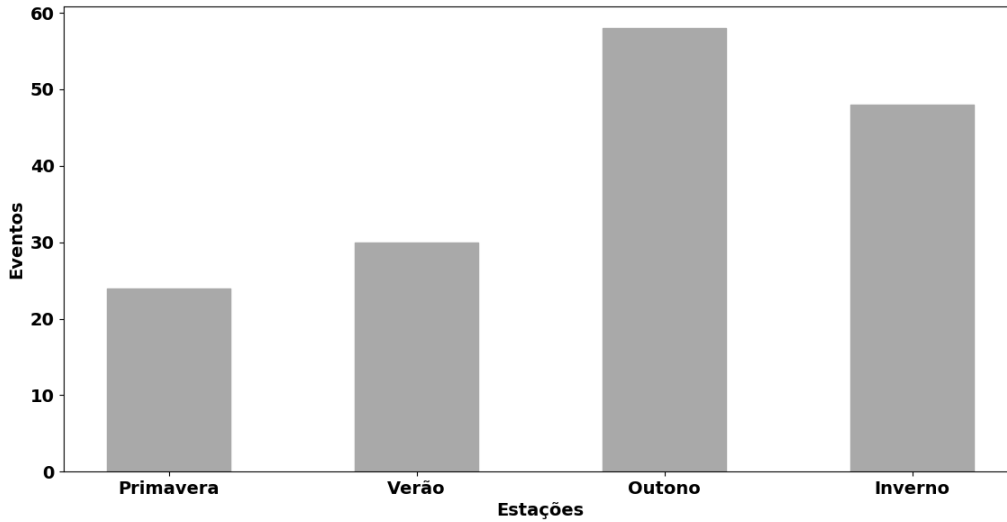


Figura 9: Distribuição sazonal de ressacas.

de São Paulo (PCSP), uma região dentro da PCSE, para ventos sinóticos. Utilizando dados hidrográficos e correntométricos, os autores aplicaram o modelo desenvolvido por [51] onde, caso a plataforma satisfaça a seguinte condição:

$$N^2 s^2 f^{-2} < 1 \quad (1)$$

onde N é a frequência de Brunt-Väisälä, s a declividade da plataforma continental e f o parâmetro de Coriolis, diz-se que tal responde barotropicamente à forçante. Os resultados encontrados são exibidos na Tabela 2.

Tabela 2: Valores sazonais médios encontrados para a Frequência de Brunt-Väisälä e para Eq. 1. [1]

Estação	$N^2 (\times 10^5 \text{ s}^{-2})$	$N^2 s^2 f^{-2}$
Inverno	0.70 ± 0.05	$(3.6 \pm 0.16) \times 10^{-4}$
Verão	1.48 ± 0.15	$(1.69 \pm 0.27) \times 10^{-4}$
Média	1.09 ± 0.10	$(2.6 \pm 0.4) \times 10^{-4}$

Apesar da estratificação durante o verão, como pode ser observado na segunda coluna da Tabela 2, esta estação, assim como o inverno, apresenta resposta barotrópica aos ventos (*Vide* terceira coluna). Tais valores são semelhantes ao estimado em (1.6×10^{-4}) por [13] para o período de inverno. Ademais, utilizando Análise de Componentes Principais, os autores observaram que essa resposta é mais significativa no interior geostrófico da Plataforma Continental Interna (PCI) e da Plataforma Continental Média (PCM) do que na Plataforma Continental Externa (PCE) onde, devido à presença da Corrente do Brasil, o primeiro modo da componente baroclínica é sobrepujante. Apesar da pesquisa ter sido realizado na PCSP, os autores relatam que os resultados podem ser estendidos à toda PCSE.

Entretanto, como apontado por [20], o motivo do outono ser a estação com mais ressacas e marés meteorológicas se deve à forte ciclogênese e intensificação de centros de baixa pressão sobre o oceano, que promovem ventos de sudoeste e que, devido à dinâmica de Ekman, atuam de modo a empilhar água junto a costa, elevando, assim, o nível relativo do mar na região.

Como exemplo, o número de eventos de ciclogêneses detectadas por [52] entre março à setembro, correspondente aos períodos de outono e inverno deste presente estudo, representam, aproximadamente, 64% do total. Tal valor é semelhante ao encontrado para as ressacas para o referido período: 67.5%. Ademais, como demonstrado por [53], o outono é a segunda estação mais ciclogênica (201 sistemas),

ficando atrás somente do inverno (211 sistemas).

Dando continuidade, a Figura 10 apresenta a distribuição mensal acumulada, isto é, a soma de todos os casos ocorridos em cada mês da série de ressaca. Aquele que apresentou maior número de eventos foi o mês de junho (23), seguido por julho (21) e abril e maio, ambos com 19. Por outro lado, novembro foi o mês em que menos se detectou ressacas (6), seguido por dezembro (7) e por fevereiro e outubro, 8 casos para cada um. A média encontrada foi de 13.3 e a variância de 31.22.

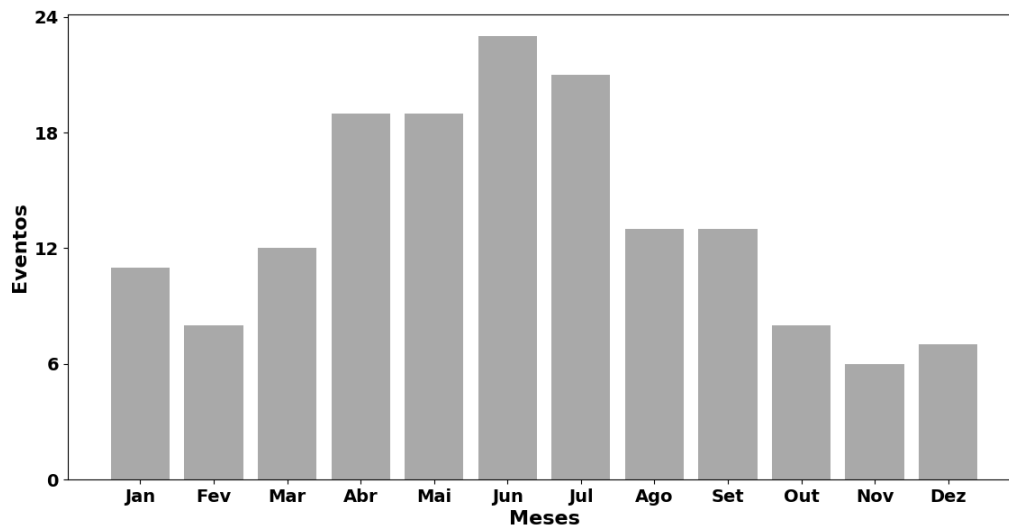


Figura 10: Distribuição mensal acumulada dos eventos de ressaca.

Novamente, como é possível observar na Figura 10, é evidente a variabilidade dos eventos de ressacas, sendo estes predominantes nos meses frios (entre março à agosto). Um resultado semelhante foi obtido por [33], com a diferença que em tal estudo o mês que mais se observou ressacas foi maio, ao invés de junho. Ademais, no estudo previamente citado, setembro foi o terceiro mês com maior registro de casos, mais expressivo, inclusive, do que junho e abril, o que não foi observado neste trabalho.

Resultados semelhantes foram obtidos por [31]. Segundo os autores, as ressacas observadas nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul entre os anos de 2009 e 2010 ocorreram preferencialmente nos meses de outono e inverno, sendo abril e maio os que apresentaram mais eventos registrados em SC, e fevereiro o mês em que mais se observou ressacas em RS. Além disso, em 2010, o mês de junho também obteve um valor expressivo na série de ressacas de RS.

Ainda na região sul brasileira, [32] observou que o mês de maio foi aquele que apresentou a maior porcentagem dos casos de ressaca ocorridos na ilha de Santa Catarina entre 2001 e 2010. Entretanto, diferentemente deste trabalho e da pesquisa anteriormente citada, os outros dois meses que mais registraram ocorrência de eventos foram setembro e outubro.

Conduzido de maneira similar ao trabalho realizado por [33], [49] também efetuaram um levantamento de eventos de ressaca registrados nos municípios do Estuário Santista (SP). A série de notícias compiladas abrangem o período de 1961 a 2011 e perfazem um total de 95 eventos registrados. Desses, 71 ocorreram durante os meses de outono e inverno, sendo maio (18) e julho (15) os que obtiveram maior destaque. Ademais, dos 95 casos observados, 46.3% ocorreram durante maré de sizígia.

Por último, [54] investigaram, também através de notícias jornalísticas, a variabilidade de ressacas no estado do Rio de Janeiro entre os anos de 1990 e 2009. Os autores observaram uma distribuição semelhante à encontrada neste trabalho: predominância dos eventos entre os meses de abril à setembro, sendo junho o mais expressivo.

Quando analisada a distribuição mensal de duração máxima de ressacas, exibida na Figura 11, pode-se observar que esta apresenta uma semelhança muito grande quando comparada à Figura 10. Junho foi o mês que apresentou o evento com maior duração (99 horas) enquanto outubro foi aquele que apresentou a menor duração máxima (36 horas). A variância da série é de 344.

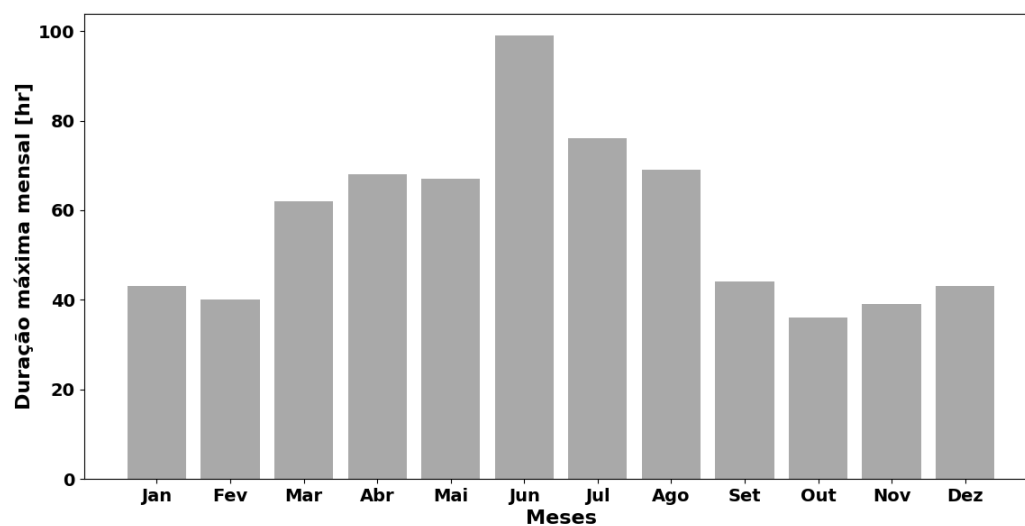


Figura 11: Distribuição mensal de durações máximas de eventos de ressaca.

Referências

- [1] Dottori M, Castro BM. The response of the São Paulo Continental Shelf, Brazil, to synoptic winds. *Ocean Dyn.* 2009;v. 59, n. 4:603–614.
- [2] Melo Fº E. Maré Meteorológica na Costa Brasileira. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Rio Grande; 2017. Tese Professor Titular.
- [3] Pugh DT. Tides, Surges and Mean Sea Level. John Wiley & Sons; 1987.
- [4] Camargo Rd, Harari J, Dias PLS. A storm surge modeling and forecast for the South-Western Atlantic Ocean. *Anais da Academia Brasileira de Ciências.* 2000;72(2):289.
- [5] Castro BM. Summer/winter stratification variability in the central part of the South Brazil Bight. *Continental Shelf Research.* 2014;89:15 – 23.
- [6] Madre de Deus FGd. Memórias para a História da Capitania de São Vicente. EDUSP; 1975.
- [7] Neme M. Notas de Revisão da História de São Paulo. Anhambi; 1954.
- [8] Veloso JAV. Tsunamis no Brasil. *Revista USP.* 2011;91:40 – 55.
- [9] Machel H, Kapala A, Flohn H. Behaviour of the Centres of Action above the Atlantic since 1881. Part I: Characteristics of seasonal and interannual variability. *International Journal of Climatology.* 1998;18:1 – 22.
- [10] Castro BM. Subtidal response to wind forcing in the South Brazil Bight during winter. University of Miami Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science; 1985.
- [11] Escobar GCJ. Padrões sinóticos associados a ondas de frio na cidade de São Paulo. *Rev bras meteorol.* 2007;22(2):241 – 254.
- [12] Vera CS, Vigliarolo PK. A Diagnostic Study of Cold – Air Outbreaks over South America. *Mon Wea Revy.* 2000;128(1):3 – 24.
- [13] Stech JL, Lorenzzetti JA. The response of the South Brazil Bight to the passage of wintertime cold fronts. *Journal of Geophysical Research.* 1992;97(C6):9507–9520.
- [14] Cavalcanti IFA, Kousky VE. Climatology of South American cold fronts. In: VII international Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, 2003, Wellington. American Meteorological Society. 2003;VII international Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography. Massachusetts, USA).
- [15] Rodrigues MLG, Franco D, Sugahara S. Climatologia de frentes frias no litoral de Santa Catarina. *Rev Bras Geof.* 2004;22(2):135–151.
- [16] Castro BM, Lee TN. Wind-forced sea level variability on the southeast Brazilian shelf. *Journal of Geophysical Research.* 1995;100(C8):16045–16056.
- [17] Gill AE, Schumann EH. The generation of long shelf waves by the wind. *Journal of Physical Oceanography.* 1974;4:83 – 90.
- [18] Csanady GT. The Arrested Topographic Wave. *Journal of Physical Oceanography.* 1978;8(1):47 – 62.
- [19] Dottori M, Castro BM. The role of remote wind forcing in the subinertial current variability in the central and northern parts of the South Brazil Bight. *Ocean Dynamics.* 2018;68(6):677 – 688.

- [20] Campos RM, 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*. 2010;25(2):175 – 184.
- [21] Filippo A, Kjerfve B, Torres Jr AR, Fernandes AM. Low-frequency variability of sea level along the Mid-Atlantic Coast of South America, in 1983. *Revista Brasileira de Geofísica*. 2012;30(1):5–14.
- [22] Valentim SS, Bernardes MEC, Dottori M, Cortezi M. Low-frequency physical variations in the coastal zone of Ubatuba, Northern Coast of Sao Paulo State, Brazil. *Brazilian Journal of Oceanography*. 2013;61(3):187–193.
- [23] Harari J, Camargo R. Simulação da propagação das nove principais componentes de maré na plataforma sudeste brasileira através de modelo numérico hidrodinâmico. *Boletim do Instituto Oceanográfico*. 1994;42(1):35–54.
- [24] Harari J, Camargo R. Modelagem numérica da região costeira de Santos (SP): Circulação de maré. *Revista Brasileira de Oceanografia*. 1994;46(2):135 – 156.
- [25] Pereira AF, Castro BM, Calado L, Silveira ICA. Numerical simulation of M2 internal tides in the South Brazil Bight and their interaction with the Brazil Current. *Journal of Geophysical Research*. 2007;112, C04009.
- [26] Butler A, Heffernan JE, Tawn JA, Flather RA, Horsburgh KJ. Extreme value analysis of decadal variations in storm surge elevations. *Journal of Marine Systems*. 2007;67:189 – 200.
- [27] Sweet WV, Zervas C. Cool-season sea level anomalies and storm surges along the U.S. East Coast: Climatology and comparison with the 2009/10 El Niño. *Mon Wea Rev*. 2011;139:2290–2299.
- [28] de Lange WP, Gibb JG. Seasonal, interannual, and decadal variability of storm surges at Tauranga, New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*. 2000;34(3):419–434.
- [29] Fiore MME, D'Onofrio EE, Pousa JL, Schnack EJ, Bértola GR. Storm surges and coastal impacts at Mar del Plata, Argentina. *Continental Shelf Research*. 2009;29:1643 – 1649.
- [30] Simó DH, Horn Filho NO. Caracterização e Distribuição Espacial das "Ressacas" e Áreas de Risco na Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil. *GRAVEL*. 2004;2:93 – 103.
- [31] Vanz A, Fernandes LG. Ressacas, Afogamentos e Acidentes com Embarcações no Sul do Brasil nos Anos de 2009 e 2010. *GRAVEL*. 2012;10(1):47 – 57.
- [32] Krueger J. Análise dos parâmetros meteorológicos e oceanográficos dos eventos de ressaca, ocorridos entre janeiro de 2001 à dezembro de 2010, no estado de Santa Catarina. UNIVALI, Itajaí, SC; 2011. Trabalho de Conclusão de Curso.
- [33] FUNDESPA. Plano básico ambiental da dragagem do Aprofundamento do Porto de Santos - Anexo - Análise Histórica dos Registros de Ressacas ocorridos na região da Baía e Estuário de Santos. FUNDESPA; 2014.
- [34] Emery WJ, Thomson RE. Data analysis methods in physical oceanography. vol. 2. Elsevier; 1998.
- [35] Kondrashov D, Ghil M. Spatio-temporal filling of missing points in geophysical data sets. *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2006;13:151 – 159.
- [36] Esquivel RM, Senna V, Gomes GSS. Previsão em séries temporais via Singular Spectrum Analysis e técnicas clássicas: Aplicações com dados meteorológicos e simulados. 58 Reunião anual da RBRAS e 15º SEAGRO. 2013;.

- [37] Mahmoudvand R, Rodrigues PC. Missing value imputation in time series using Singular Spectrum Analysis. *International Journal of Energy and Statistics*. 2016;4(1):1650005–1 – 1650005–6.
- [38] Golyandina N, Nekrutkin V, Zhigljavsky A, Tibshirani R, Reid N, Isham V, et al. *Analysis of Time Series Structure: SSA and related techniques*. Chapman & Hall/CRC; 2001.
- [39] Willmott CJ. On the validation of models. *Phys Geogr*. 1981;2:184 – 194.
- [40] Fleming HE, Hill ML. An objective procedure for detecting and correcting errors in geophysical data: 1. One-dimensional applications. *J Geophys Res*. 1982;87(C9):7312 – 7324.
- [41] Walters RA, Heston C. Removing tidal-period variations from time-series data using low-pass digital filter. *Journal of Physical Oceanography*. 1982;12:112 – 115.
- [42] Zhang K, Douglas BC, Leatherman SP. East Coast Storm Surges Provide Unique Climate Record. *EOS*. 1997;78(37):389 – 400.
- [43] Mann HB. Non-parametric tests against trend. *Econometrica*. 1945;13:163 – 171.
- [44] Kendall MG. *Rank Correlation Methods*. Charles Griffin. 1975;4th Edition.
- [45] Androulidakis YS, Kombiadou KD, Makris V, Baltikas VN, Krestenitis YN. Storm surges in the Mediterranean Sea: Variability and trends under future climatic conditions. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 2015;71:56 – 82.
- [46] Sen PK. Estimates of the regression coefficients based on Kendall's tau. *Journal of American Statistical Association*. 1968;63:1379 – 1389.
- [47] Chandler R, Scott M. *Statistical Methods for Trend Detection and Analysis in the Environmental Sciences*. Wiley; 2011.
- [48] Zhang K, Douglas BC, Leatherman SP. Twentieth-Century Storm Activity along the U.S. East Coast. *Journal of Climate*. 2000;13:1748 – 1761.
- [49] Souza CRG, Rodrigues GSR, Constantino J, Rosa EG. Eventos de ressaca e “maré alta” na Baixada Santista (SP), entre 1961 e 2011;. XV Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário – ABEQUA.
- [50] Souza CRG, Rodrigues GSR. Condições de contorno de eventos meteo-oceanográficos extremos na Baixada Santista (SP), entre 1928 e 2016;. XVI Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário – ABEQUA.
- [51] Clarke AJ, Brink KH. The response of stratified, frictional flow of shelf and slope waters to fluctuating large-scale, low-frequency wind forcing. *J Phys Oceanogr*. 1985;15:439 – 453.
- [52] Gan MA, Rao VB. Surface cyclogenesis over South America. *Monthly Weather Review*. 1991;119(5):1293 – 1302.
- [53] Reboita MS, da Rocha RP, Ambrizzi T, Gouveia CD. Trend and teleconnection patterns in the climatology of extratropical cyclones over the Southern Hemisphere. *Cli Dyn* 45: 1929. 2015;.
- [54] Klumb-Oliveira LA, Lins-de Barros F, França R, Pereira NE. Avaliação histórica do registro de ocorrência de ressacas marinhas e o comportamento de onda correspondente no litoral do Rio de Janeiro;. XV Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário – ABEQUA.

São Paulo, 22 de junho de 2018

Victor Cesar Martins de Aguiar

Prof. Dr. Belmiro Mendes de Castro Filho