

Victor Cesar Martins de Aguiar

Variabilidade Temporal de Ressacas na Plataforma Continental Sudeste

Plano do Trabalho de Graduação 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

Março de 2018

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 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 e espacial 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 at three stations over the South Brazil Bight (SBB), southeastern brazilian region, this work aims to analyze the temporal and spatial variability of such events in the SBB.

1 INTRODUÇÃO

As oscilações da superfície do mar são devidas 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 grande variação espectral do segundo processo. Sendo assim, pode-se dizer que qualquer série temporal de nível do mar registrada é composta pela soma entre o sinal mareográfico e uma componente residual devida aos processos de interação oceano-atmosfera (Figura 1).

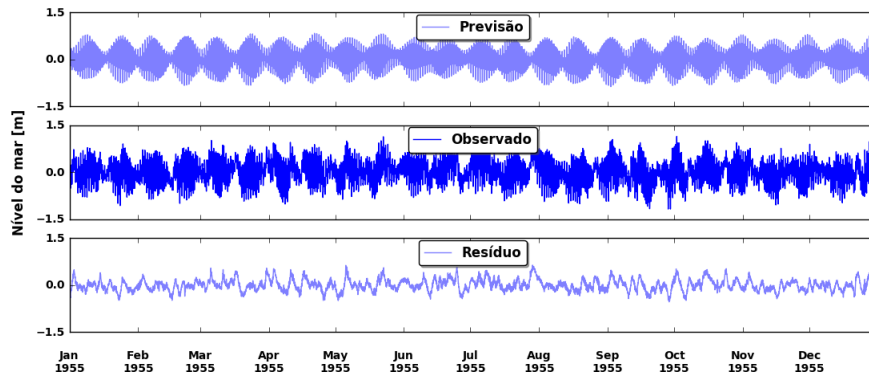


Figura 1: Representação de uma série de nível do mar reproduzida com os dados horários da estação de Cananéia no ano de 1995. O painel superior ilustra a maré prevista, no painel intermediário o sinal observado e no painel inferior a diferença entre o intermediário e o superior, chamado de resíduo.

Insere-se neste contexto o fenômeno amplamente conhecido por ressaca. Por conta de seu emprego difundido, regionalismo e até mesmo por uso equivocado, torna-se necessária uma definição científica. Neste trabalho, o emprego deste jargão se apresenta como uma tradução do termo *storm tide*, descrito pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* e internacionalmente aceito. Em suma, ressaca é a composição construtiva entre elevações grandes da superfície do mar (*storm surge*), conhecidas também por "marés meteorológicas", e preamares de grandes amplitudes (sizígia). Dessa maneira, eventos de ressacas ocorrem quando há coincidência de ventos que promovam o empilhamento de água junto à costa e a preamar de marés de sizígia.

A região de estudo é a Plataforma Continental Sudeste (PCSE). Limitada ao norte por Cabo Frio (22.9°S) e ao sul pelo Cabo de Santa Marta (28.6°S), este embaiamento 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. A quebra da plataforma varia entre 150 e 180 m de profundidade (Figura 2) [1].

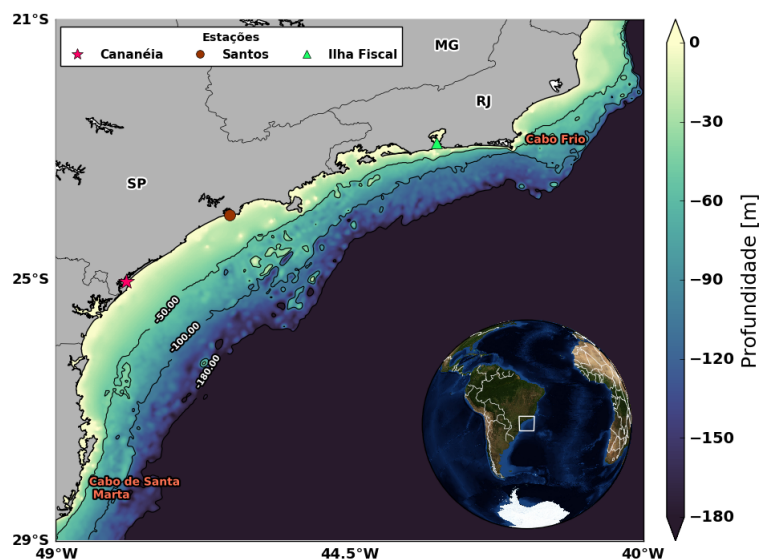


Figura 2: Região da Plataforma Continental Sudeste, onde a batimetria local é representada pelo mapa de cores tal que profundidade inferiores à -180 metros foram mascaradas com coloração homogênea azul. As linhas cheias negras representam as isóbatas de -50, -100 e -180 metros e cada símbolo representa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

O nível do mar junto à costa está intimamente correlacionado com a resposta oceânica à forçante atmosférica. 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 mb) e mais próximo ao continente, e, entre dezembro e abril, está deslocado para leste e menos intenso (1021.0 mb)[2]. 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 [3]. Em ambos os casos, a atuação desses escoamentos ocasionam um rebaixamento do nível do mar junto à costa.

Ademais, 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. 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 [4].

De maneira contraintuitiva, a primavera é a estação do ano que mais apresenta entrada de frentes frias sobre a PCSE: entre 11 e 12 eventos [5]. Não obstante, conforme verificado por [6], é durante o inverno que a componente meridional dos ventos vindos de sul é mais intensa. Além disso, o autor identificou um período médio de 8 dias entre a passagem de duas frentes frias consecutivas.

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 PCSP, as alturas de preamares de sizígia podem atingir valores superiores a 2 metros ([7]). Na larga PCSP, 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 ([8];[9]).

Os estudos de variabilidade climática de eventos de ressaca ainda são incipientes. No Hemisfério Norte, empregando séries temporais de elevação do nível do mar e dados de reanálise de ventos,[10] 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.

Já na América do Sul, especificamente na região de Mar de Plata, Argentina, empregando uma série histórica de nível do mar (1956 - 2005),[11] 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, [12] empregou notícias de periódicos estabelecidos na região da Baía e Baixada Santista, 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), corroborados e encontrados por[13]. Além disso, as ressacas ocorreram majoritariamente durante marés de sizígia (49.4%) e em 69.7% dos casos era ano de El Niño.

Sendo assim, tendo em vista os resultados apontados pelos estudos anteriores, define-se como hipótese deste trabalho que os eventos de ressaca na PCSE têm aumentado de frequência, intensidade e duração ao longo das últimas décadas e que possuem variabilidade sazonal e interanual.

Dessa maneira, estabelece-se então como objetivo o estudo das ressacas na costa da PCSE, analisando suas variabilidades temporais e espaciais.

2 DADOS E MÉTODOS

2.1 DADOS

Para a realização deste trabalho serão empregadas séries históricas de oscilação 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).

A localização das estações e a extensão de cada série temporal são observadas nas Figuras 2 e 3, respectivamente. As distâncias ao longo da costa entre as estações de Cananéia (CN) e Santos (SA) é de aproximadamente 210 km enquanto que entre CN e Ilha Fiscal (IF) corresponde a aproximadamente 580 km. Com excessão dos períodos recentes de Cananéia e de Santos, a taxa de amostragem de todas as outras séries é de uma hora.

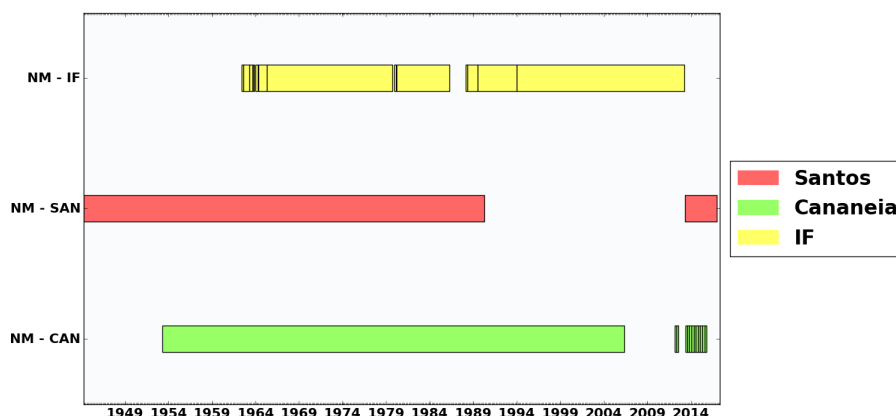


Figura 3: Representação em Diagrama de Gantt dos períodos de cada série de nível do mar (NM) onde IF representa a estação localizada na Ilha Fiscal.

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 *outliers* e/ou 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 Detecção e Correção de Valores Discrepantes [14] apresentaram um procedimento objetivo baseado na sucessiva aplicação de diferenças finitas visando a detecção e correção de dados geofísicos.

2.2.1.3 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 [15], 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 a interpolação [16].

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 independentes e interpretáveis decompostas, 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 (decomposição (I) e reconstrução (II)), onde cada um é ainda dividido em outras duas etapas, (I) - incorporação e Decomposição em Valores Singulares; (II) - reconstrução e média diagonal.

$I > 15$ dias: Como apontado por [15], 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.

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 mareográfico, o qual é obtido através de análise harmônica sobre os dados observados. Com este sinal e as componentes de maré em mãos, os períodos de preamar de sizígia podem ser identificados.

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 mareográfica (12h - 24h) e de alta frequência sejam retirados da série afim de encontrar as elevações máxima de maré meteorológica. Para isso, seguindo o método empregado também por outros pesquisadores (*e.g.* [17]), será aplicado um filtro Lanczos quadrático passa-baixa com corte em 40 horas sobre as séries observadas.

2.2.2.3 Tendência Como demonstrado por [18], a tendência de longo termo do nível médio do mar pode gerar resultados que não refletem a verdadeira informação se está ocorrendo ou não um aumento na frequência e severidade dos eventos de ressaca. Sendo assim, torna-se fundamental realizar a retirada desses valores antes de proceder às análises propostas.

2.2.2.4 Identificação dos Eventos de Maré Meteorológica Caso o resíduo apresente distribuição normal após a retirada da tendência e do sinal mareográfico, os eventos de maré meteorológica podem ser identificados como valores acima de dois desvios padrões [18].

2.2.2.5 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.

2.2.2.6 Severidade e Frequência Seguindo o método proposto por [18], 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. Quanto maior a elevação, mais severo é considerado o evento.

3 Cronograma

Fevereiro: Levantamento bibliográfico

Março e abril - Elaboração do plano de trabalho e finalização das definições metodológicas;

Abril e maio - Edição de dados;

Maio e junho - Análise de séries temporais, obtenção dos primeiros resultados e elaboração do Plano de Trabalho final.

Referências

- [1] Castro BM. Summer/winter stratification variability in the central part of the South Brazil Bight. *Continental Shelf Research*. 2014;89:15 – 23.

- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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).
- [6] Rodrigues MLG, Franco D, Sugahara S. Climatologia de frentes frias no litoral de Santa Catarina. *Rev Bras Geof*. 2004;22(2):135–151.
- [7] 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.
- [8] Harari J, Camargo R. Modelagem numérica da região costeira de Santos (SP): Circulação de maré. *Revista Brasileira de Oceanografia*. 1994;46(2):135 – 156.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Emery WJ, Thomson RE. Data analysis methods in physical oceanography. vol. 2. Elsevier; 1998.
- [16] Kondrashov D, Ghil M. Spatio-temporal filling of missing points in geophysical data sets. *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2006;13:151 – 159.
- [17] Castro BM, Lee TN. Wind-forced sea level variability on the southeast Brazilian shelf. *Journal of Geophysical Research*. 1995;100(C8):16045–16056.
- [18] Zhang K, Douglas BC, Leatherman SP. East Coast Storm Surges Provide Unique Climate Record. *EOS*. 1997;78(37):389 – 400.

Assinatura do Orientador

Assinatura do Aluno

02 de abril de 2018

Data