



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Condições meteo-oceanográficas associadas aos extremos de sobre-elevação do nível do mar em Santos/SP

Hanna Tiharu Kodama¹, Gyrlene Aparecida Mendes da Silva², Janini Pereira³

¹ Bacharel em Ciência e Tecnologia do Mar/ Universidade Federal de São Paulo. Rua Dr. Carvalho de Mendonça, 144 - Vila Belmiro, Santos – SP, Brasil. CEP 11070-102. hanna.t.kodama@hotmail.com. ² Professora Adjunta do Instituto do Mar/Universidade Federal de São Paulo. Doutora em Meteorologia. Rua Dr. Carvalho de Mendonça, 144 - Vila Belmiro, Santos – SP, Brasil. CEP 11070-102. gyrlene.silva@unifesp.br (autor correspondente) ³ Professora Associada do Instituto de Física/Universidade Federal da Bahia. Rua Barão de Jeremoabo, s/n – Ondina, Salvador – BA, Brasil. CEP 40170-115. janinipereira@ufba.br.

Artigo recebido em 18/05/2023 e aceito em 08/12/2023

RESUMO

No verão austral de 1994 a 2019, as anomalias do nível do mar em Santos/SP filtradas na frequência de corte de 28 horas apresentaram tendência linear de +0,00002 m/ano, média de 0,02382 m e variabilidade interanual. Os valores acima da média +2 desvios-padrão ocorreram entre 11 a 22 de fevereiro/2018 concomitantemente a alagamentos registrados nessa Cidade pela Defesa Civil local. Esse período, definido como o Dia 0, foi selecionado para investigação da influência do vento em superfície nesses valores. Quatro dias antes houve a presença anômala de um anticiclone transiente centrado em 49°W; 35°S e um ciclone extratropical em 34°W; 34°30'S associado a um sistema frontal orientado no sentido noroeste-sudeste desde a costa norte do Sudeste até oceano adjacente. Pela interação entre os centros de alta e baixa pressão, os ventos em superfície confluíram de 3 a 4 m/s mais intensos e com direção anômala de sul. Isso favoreceu o empilhamento seguido do aquecimento anômalo da superfície oceânica na costa de Santos/SP. No Dia 0, o anticiclone transiente se enfraqueceu migrando para noroeste em direção ao continente, enquanto o ciclone se intensificou migrando para 37°W; 34°S. Os ventos confluíram de sudoeste reforçando a sobre-elevação do nível do mar extrema na cidade. O transporte de umidade oceânica por esses ventos reduziu a pressão ao nível do mar ocasionando chuva acima da média desde 2 dias antes e durante o Dia 0 sobre Santos/SP. A metodologia apresentada pode ser aplicada operacionalmente para o diagnóstico da evolução das anomalias meteo-oceanográficas ajudando em futuros Planos Preventivos.

Palavras-chave: chuva; extremos; Santos/SP; sobre-elevação do nível do mar; transientes.

Meteo-oceanographic conditions associated with extreme sea level rise in Santos/SP

ABSTRACT

In the austral summer from 1994 to 2019 the sea level anomalies in Santos/SP filtered at the 28-hour cutoff frequency showed a linear trend of +0.00002 m/year, an mean of 0.02382 m and interannual variability. The values above the average +2 standard deviations occurred between February 11th and 22nd/2018, simultaneously with flooding registered in this City by the local Civil Defense. This period, defined as Day 0, was selected to investigate the influence of surface wind on these values. Four days before this period there was the anomalous presence of a transient anticyclone centered at 49°W; 35°S and an extratropical cyclone at 34°W; 34°30'S associated with the frontal system with a northwest-southeast orientation from the north coast of the Southeast to the adjacent ocean. The confluence of the winds by the interaction between the high- and low-pressure centers increased the wind speed to 3 to 4 m/s above mean with the southerly direction. This contributed to positive sea-level anomalies followed by anomalous heating of the ocean surface along the coast of Santos/SP. On the Day 0, the transient anticyclone weakened migrating northwestward towards the continent while the cyclone intensified migrating to 37°W; 34°S. The confluent winds by the interaction between these systems became of southwest, reinforcing the sea-level rise extreme in the city. The transport of oceanic moisture by these winds reduced sea level pressure inducing rainfall above average since 2 days before and during the Day 0 over Santos/SP. The methodology presented can be applied operationally to diagnose the evolution of meteo-oceanographic anomalies, helping in future Preventive Plans.

Keywords: extremes; rainfall; Santos/SP; sea-level rise; transients.

Introdução

De acordo com Da Silva et al. (2021): “No domínio entre 23,5°S-24,5°S; 45,5°W-46,5°W se localiza o trecho do litoral centro-norte do Estado de São Paulo com algumas das cidades mais populosas e que apresentam atividades vinculadas ao comércio (São Vicente), indústria e porto (Santos e Cubatão), turismo e pesca artesanal (Guarujá e Bertioga).” A Cidade de Santos com seus 418.608 residentes (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022) é a mais populosa e, assim como mencionado no “Plano Municipal de Contingência para ressacas e inundações” (Diário Oficial de Santos, 2017), vem sofrendo com o aumento da frequência de eventos oceânicos meteorológicos extremos, como ressacas do mar e marés altas anômalas.

O Nível do Mar (NM) é continuamente alterado pelas mais variadas forças que atuam sobre o oceano (Neves, 2005; Wyrski, 1990). A mais conhecida popularmente é a astronômica que, de maneira harmônica e previsível, causa desníveis chamados de marés astronômicas, enquanto os desníveis causados por fatores atmosféricos são somados a estes efeitos, podendo reforçá-los ou amenizá-los. Em resposta inversa ao ciclo diário da pressão atmosférica, forçante conhecida como “barômetro invertido”, o NM aumenta sob os centros de baixa pressão que atuam sobre a superfície oceânica e diminui sob os de alta pressão. Esta forçante é associada ao ciclo diário da radiação solar, ou seja, é relacionada à atmosfera e atua harmonicamente (Pugh, 1987). De maneira não harmônica, a persistência do vento em superfície na periferia dos sistemas de pressão atmosférica transfere *momentum* para o oceano gerando tensão na sua camada superficial. Pela Teoria de Ekman (Pugh, 1987; Ekman, 1962) há o transporte em 90° de massa d’água superficial pelo balanço entre o vento, a Força de Coriolis e a tensão friccional. O transporte total conhecido como Transporte de Ekman gera deslocamento de água em 90° a esquerda da direção do vento predominante no Hemisfério Sul e a direita no Hemisfério Norte. O empilhamento resulta na anomalia positiva ou sobre-elevação do NM, quanto maior a velocidade do vento, a direção paralela à costa e a pista do escoamento sobre o oceano. A variação do nível do mar pelo vento devido ao Transporte de Ekman corresponde a uma variabilidade de frequência mais baixa quando comparada ao efeito do barômetro invertido.

Na literatura há diversos estudos a respeito de fenômenos relacionados com a maré alta ou sobre-elevação do NM devido a circulações

atmosféricas atuantes na costa do Sul/Sudeste do Brasil (Pinheiro e Severo, 2023; Candella et al., 2021; De França et al., 2021.; Araujo et al., 2020; Campos et al., 2010; Machado et al., 2010; Parise et al., 2009). Mais especificamente para a Cidade de Santos, Campos et al. (2010) elaboraram a climatologia das variações extremas do nível do mar de origem meteorológica durante 1951 a 1990 sendo que os valores acima de +2 desvios-padrão, 0,38 m, foram menos frequentes no verão austral (Dez-Jan-Fev). Eles estiveram relacionados a ventos moderados abaixo de 8 m/s e de direção sudoeste, como resposta ao cavado de superfície pouco pronunciado sobre o oceano, próximo ao litoral do Sudeste do Brasil, e a alta pressão em sua retaguarda situada aproximadamente sobre o Uruguai. Durante o inverno e as estações de transição, primavera e outono, os ventos de sudoeste mostraram-se mais intensos com velocidade acima de 10 m/s, pela intensificação do cavado de superfície que variava de acordo com o posicionamento da alta pressão da sua retaguarda. Os ventos de sudoeste favoreceram o transporte de massa d’água à esquerda dessa direção e, conseqüentemente, houve empilhamento na costa sudeste brasileira concordando com a Teoria de Ekman.

O presente estudo de caso consistiu numa análise das condições anômalas relacionadas ao vento em superfície que contribuíram com os valores extremos de sobre-elevação do NM em Santos/SP numa estação do ano em que são menos propícios climatologicamente, o verão austral. A hipótese foi que esses eventos poderiam ter ocorrido conjuntamente com chuva contribuindo com os alagamentos na Cidade. A motivação do estudo também veio do interesse em contribuir com o acompanhamento de condições meteorológicas associadas à elevação do nível do mar junto à costa que é uma das referências do Plano Municipal de Contingência para ressacas e inundações (Diário Oficial de Santos, 2017).

Do “Relatório fotográfico dos meses de janeiro, fevereiro, março e abril de 2018” da Defesa Civil de Santos (2018) foram identificadas as datas em que houve alagamentos em vários pontos nessa cidade, dias 26 de janeiro e 10, 13 e 14 de fevereiro de 2018, onde alguns podem ser observados na Figura 1. O estudo utilizou técnicas que permitiram caracterizar a evolução temporal das anomalias do nível do mar durante o período climatológico de verão de 1994 a 2019 tanto as não filtradas quanto as filtradas relacionadas ao forçamento do vento em superfície. Através da detecção foi definido um

limiar para seleção dos dias com valores extremos onde se considerou as anomalias do NM acima da média mais 2 desvios-padrão da série filtrada, mas que também tivessem associadas as ocorrências de alagamentos registrados pela Defesa Civil de Santos (2018). Por fim, os mapas espaciais possibilitaram atribuir como a evolução temporal e espacial das anomalias meteo-oceanográficas estiveram associadas aos valores extremos selecionados: Tanto na média dos 4 dias que antecederam aos dias de extremos como nos dias de suas ocorrências.

Material e métodos

Dados e área de estudo

Foram obtidos dados de anomalia do nível do mar (ANM) de altimetria por satélite com resolução temporal diária e espacial de 0.25° de latitude e longitude (Ducet et al., 2000). Esses dados definidos no estudo como sendo a série não filtrada de ANM foram adquiridos da *Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store* (2018) sobre as mesmas coordenadas da Estação Maregráfica da Praticagem de Santos do Estado de São Paulo, $23^\circ 59'.5$ S; $46^\circ 18'.1$ W (Marinha do Brasil, 2017). O verão (Dez-Jan-Fev) de 1994 a 2019 foi escolhido como o período climatológico, considerando o interesse em investigar os extremos de sobre-elevação do NM em uma estação do ano em que são menos frequentes.

a)



b)



Figura 1. Fotografias dos alagamentos na Cidade de Santos/SP em 10 de fevereiro de 2018: Canal na Zona Noroeste (a); Av. Barão de Penedo no Bairro do José Menino na Orla da cidade (b). Fonte: Defesa Civil de Santos (2018).

Os demais dados obtidos para o mesmo período climatológico foram:

- Reanálises ERA5 disponibilizadas pelo *European Centre for Medium-Range Weather*

Forecasts, relativas à Pressão à Nível Médio do Mar (PNMM), velocidade e direção do vento em superfície (10m) com resolução temporal horária e espacial horizontal de 0.25° de latitude e longitude

(Hersbach et al., 2023).

- Precipitação em forma de chuva do *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data* de pluviômetros e satélite, disponibilizados pela *United States Geological Survey* e *University of California - Santa Barbara* (Funk et al., 2014). A resolução temporal foi diária e a espacial horizontal de 0.05° de latitude e longitude.

- Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do sensor orbital *Advanced Very-High-Resolution Radiometer* (Reynolds et al., 2007) fornecida pela *National Oceanic and Atmospheric Administration/National Aeronautics and Space Administration*. A resolução temporal foi diária e a espacial horizontal de 0.25° de latitude e longitude.

Metodologia

Deteção

Para a remoção das componentes harmônicas, astronômica e relativa ao efeito do barômetro invertido, foi aplicado um filtro passa-baixa descrito em Von e Zwiers (2003) que permite “passar” a baixa frequência da série temporal original e “reter” a alta frequência da mesma pela Transformada Rápida de Fourier. A filtragem foi feita através do programa *Climate Data Operators* (CDO User Guide, 2023). O domínio da frequência escolhida (frequência de corte) foi de 28 horas (Campos et. al, 2010) aplicado a série não filtrada de ANM ou série temporal original. Como resultado, a série filtrada de ANM na frequência de corte de 1 ciclo a cada 28 horas permitiu a identificação das anomalias ou desvios que foram forçados pela baixa-frequência relativa a períodos superiores a 28h, sendo possível associá-la a persistência do vento em superfície.

A sazonalidade, ou seja, o comportamento cíclico relacionado às estações do ano havia sido previamente removida quando da obtenção da série não filtrada. As tendências lineares de ambas as séries, não filtrada e filtrada, foram calculadas pelo programa *R Project for Statistical Computing* com base na reta de regressão linear pelo método dos mínimos quadrados (Wilks, 2011) expressa pela Equação 1:

$$y = a + bx \quad \text{Equação 1}$$

Sendo:

y = variável dependente (ANM);

x = variável independente (mês);

b = coeficiente angular, valor que define o aumento ou diminuição de y a cada x ;

a = coeficiente linear, valor de y quando $x = 0$.

Os coeficientes angulares (b) e linear (a) foram calculados pelas Equações 2 e 3, respectivamente, permitindo que a reta de ajuste linear minimiza-se os desvios quadrados em cada série. O período amostral usado foi de $n = 2496$ (26 verões x 96 dias, considerando os anos bissextos).

$$b = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (t_i \times Y_i^*) - \sum_{i=1}^n t_i \times \sum_{i=1}^n Y_i}{n \times \sum_{i=1}^n (t_i^2) - (\sum_{i=1}^n t_i)^2}$$

Equação 2

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i - b \times \sum_{i=1}^n t_i}{n}$$

Equação 3

Através das tendências foi identificado o comportamento de longo prazo das anomalias. Em seguida, as séries foram normalizadas, para averiguar se esses comportamentos foram fisicamente consistentes e não se deram ao acaso, pois a relação entre y e x é fortemente influenciada pela média. Em seguida, a significância estatística das retas de regressão linear foi calculada como em Da Silva et al. (2021) através do programa *R Project for Statistical Computing*. Dessa forma, para cada valor de probabilidade (*valor-p*) menor ou igual a 0,1, assumiu-se que a série apresentou confiabilidade igual ou superior a 90%.

Através desse mesmo programa, foi calculado o desvio-padrão amostral (Wilks, 2011) a partir da Equação 4, tanto para a série não filtrada quanto filtrada de ANM:

$$DP = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad \text{Equação 4}$$

Sendo:

x_i = ANM em cada dia;

$\bar{x}$ = média climatológica da ANM;

n = quantidade de tempos, 2496 (26 verões x 96 dias).

Os dias com os extremos de sobre-elevação foram definidos como Dia 0 e selecionados a partir das ANM acima da média mais 2 desvios-padrão

da série filtrada. Como critérios adicionais também se considerou que esses dias tivessem ocorrido tanto em janeiro quanto fevereiro de 2018 e apresentassem registros de alagamentos na Cidade de Santos baseado nos relatórios da Defesa Civil de Santos (2018).

Atribuição

A análise das diferentes condições ambientais anômalas que ocorreram tanto na média dos 4 dias que antecederam aos dias com extremos selecionados (Dia -4) quanto na média dos dias de extremos (Dia 0) foi realizada. Tais condições foram comparadas com aquela climatologia do mês (ou dos meses) de verão que tivesse (ou tivessem) apresentado dias com os valores extremos selecionados. Portanto, foi usado o programa *Grid Analysis and Display System* para gerar mapas espaciais de médias climatológicas e anomalias através da técnica de composição (Vasconcelos et al., 2021; Bombardi e Carvalho, 2017) que vem sendo eficaz na identificação de configurações anômalas durante determinado período de interesse. Eles serviram para interpretar como os valores extremos se relacionaram com a evolução temporal e espacial das anomalias meteo-oceanográficas sobre a região de estudo. Assim como Vasconcelos et al. (2021) e Da Silva et al. (2021) não foi calculado o teste de significância estatística das composições, pois o objetivo consistiu em interpretá-las buscando explicações físicas para a ocorrência dos valores extremos selecionados.

Os mapas das médias climatológicas do período de 1994 a 2019 foram referentes a PNMM e vento em 10m, ANM, TSM e chuva daquele mês (ou meses) de verão que tivesse (ou tivessem) apresentado dias com os valores extremos. Para gerar os mapas das anomalias dessas mesmas variáveis para o Dia -4, a média de cada uma em cada ano foi subtraída da sua respectiva média climatológica. Em seguida, o procedimento foi repetido para gerar mapas de anomalias no Dia 0.

Resultados e discussão

Na Figura 2 estão as séries das ANM da localidade de Santos: não filtrada (em cinza) e a filtrada na frequência de corte equivalente ao período de 28h (em preto). Ao longo dos verões de 1994 a 2019 os coeficientes lineares em ambas as retas de regressão foram positivos indicando que a taxa de aumento na série não filtrada foi de +0,00004 m/ano, equivalente a 1,2% da tendência anual de +0,003228 m/ano encontrada por Mateus

(2019) sobre a Bacia de Santos para o período de 1993–2018. Para a série filtrada, a taxa foi de +0,00002 m/ano, que corresponde a 0,7% da tendência anual de +0,00292 m/ano encontrada por Ruiz-Etcheverry e Saraceno (2020) sobre Oceano Atlântico Sul para o período de 1993-2017 após a filtragem dos dados para a remoção da variabilidade com períodos menores que 4 meses.

Ambas as tendências da Figura 2 tiveram 100% de confiabilidade estatística. E a partir de dezembro de 1998 houve mudança no comportamento das anomalias, ou seja, de predominantemente negativas antes desse ano para positivas nos anos seguintes. Essa mudança de fase corroborou com os estudos prévios sobre mudanças observadas nas variáveis meteo-oceanográficas tanto no Sul quanto no Sudeste do Brasil. De Oliveira et al. (2020) identificaram alterações mais pronunciadas na média anual da TSM a partir do final da década de 1990 e início de 2000 na plataforma continental numa região média de encontro entre as Correntes do Brasil e das Malvinas. Apesar de estar entre 43°S e 29°S; 48°W e 61°W, ao sul da Cidade de Santos, as alterações na TSM dessa região influenciam os sistemas transientes que podem se propagar para as regiões costeiras do Sudeste do Brasil. Coerentemente, Da Silva et al. (2021) encontraram um período semelhante no referente a mudança de fase das anomalias das variáveis meteo-oceanográficas. Segundo os autores, a variabilidade interanual e a tendência linear contribuíram com as anomalias mais acentuadas, em módulo, dos índices de extremos do litoral centro-norte de São Paulo quando comparado à influência apenas da variabilidade interanual: antes de 2000 para o total de chuva diária extrema e de ondas de frio e de 2003 para o máximo de dias consecutivos chuvosos; e depois de 1999 para o máximo da temperatura máxima e o mínimo da temperatura mínima e de 2001 para o máximo de dias consecutivos secos e de ondas de calor.

Na Figura 2, os desvios iguais ou ligeiramente iguais a 0,0m indicaram ANM em Santos/SP de valores iguais ou ligeiramente iguais ao valor do nível médio do mar local. As séries não apresentaram as variações regulares típicas dos meses de verão, pois o ciclo anual havia sido previamente removido quando da obtenção dos dados. Ou seja, os desvios irregulares se alternaram em diferentes períodos de anos caracterizando a influência da variabilidade interanual, cujas possíveis forçantes não foram investigadas no presente estudo. A média das ANM filtradas foi de $0,02382 \text{ m} \pm 0,03307 \text{ m}$. Os valores acima da

média mais 2 desvios-padrão (+0,08996 m) foram definidos como os extremos de sobre-elevação do NM por terem sido os mais positivos e menos frequentes em comparação com os demais (40 dias ou 1,7% da série). De acordo com esse limiar, nos

dias 11 a 22 de fevereiro/2018 houve extremos de sobre-elevação do NM corroborando com a presença de alagamentos registrados pela Defesa Civil de Santos (2018).

Anomalias do NM - Santos/SP (23°59'.5S; 46°18'.1W)

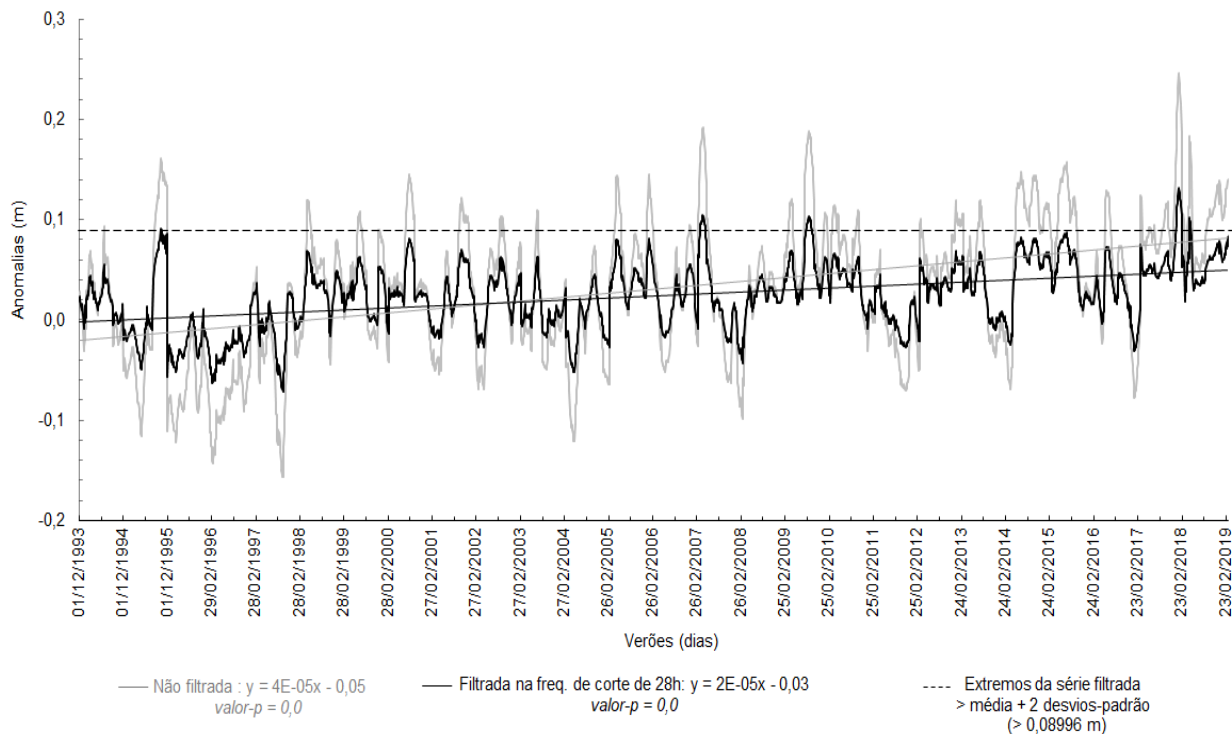


Figura 2. Séries das anomalias do nível do mar (m) durante os verões de 1994 a 2019: Não filtrada, em cinza, e filtrada na frequência de corte equivalente ao período de 28h, em preto. Os valores acima da linha tracejada foram os extremos que ficaram acima da média mais 2 desvios-padrão.

Dessa forma, os extremos mais acentuados durante dias consecutivos ocorreram entre 11 a 22 de fevereiro de 2018, definidos como os dias de extremos selecionados de interesse no estudo. Após a seleção, foram elaborados mapas da climatologia de Fevereiro durante 1994 a 2019 para as variáveis PNMM e vento em 10m, ANM, TSM e chuva (Figuras 3a-d, respectivamente); mapas das anomalias dessas variáveis durante os 4 dias que antecederam os dias com extremos selecionados, 7 a 18 de fevereiro de 2018 (Dia -4) (Figuras 4 a-d, respectivamente) e durante os dias das suas ocorrências, 11 a 22 de fevereiro de 2018 (Dia 0) (Figuras 5 a-d, respectivamente).

Em relação à climatologia de Fevereiro, notou-se a presença da Alta Subtropical do Atlântico Sul (Reboita et al., 2019; Ynoue et al., 2017) com núcleo em 7°30'W;32°30'S,

aproximadamente (Figura 3a). Climatologicamente, seu ramo oeste propiciou ventos de nordeste entre 35-45°W; 20-30°S que adquiriram direção leste-nordeste nas proximidades da costa de São Paulo. A depender da força do gradiente de pressão, essa mudança de direção foi induzida pelo escoamento ciclônico da Baixa do Chaco centrado em 20°S e 65°W, aproximadamente, que existe pelo aquecimento da troposfera pela liberação de calor latente em resposta a convecção gerada nessa área (Seluchi et al., 2003).

O deslocamento de massa d'água climatológico à esquerda dos ventos de nordeste e de leste-nordeste mencionados anteriormente corroborou com a climatologia das ANM positivas ao longo do domínio da Figura 3b, tendo os valores menos intensos próximos da linha de costa e mais

intensos em regiões mais afastadas. Como consequência, se observou a ressurgência costeira na região de Cabo Frio/RJ (De Castro Filho et al., 2015), identificada na climatologia das ANM por valores positivos menos intensos na linha de costa dessa região quando comparado ao oceano aberto. O fenômeno teve relação com a TSM climatologicamente mais fria do que no seu entorno, entre 24 a 26°C, em amarelo mais claro (Figura 3c). Os valores climatológicos de TSM entre 14°C a 28°C observados sobre o domínio em análise, diminuindo conforme o aumento da latitude é consequência da maior quantidade de energia solar interceptada pela Terra ao longo do ano na região tropical em comparação com as regiões polares (Ynoue et al., 2017; Cavalcanti et al., 2009). O gradiente de TSM observado em torno de 38°S é explicado pela interação das águas frias de sul, da Corrente das Malvinas, e mais quentes vindas do norte, da Corrente do Brasil (Castello e Krug, 2015).

Os valores máximos da climatologia de chuva em Fevereiro (Figura 3d) estiveram orientados no sentido noroeste-sudeste desde a Região Amazônica até o Sudeste do Brasil. Essas características se devem a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (Ynoue et al., 2017), principal fenômeno climático de grande escala que define o regime de chuva durante os meses de verão nessas localidades. A ZCAS também se estende até vizinhanças do Oceano Atlântico Subtropical caracterizando o seu ramo oceânico, entretanto esse ramo não pôde ser observado através do conjunto de dados utilizados no presente estudo, pois estão disponíveis apenas sobre os continentes. A umidade que organiza a ZCAS é trazida do Oceano Atlântico Tropical para dentro do continente pelos ventos alísios de nordeste da Alta Subtropical do Atlântico Norte e recebe contribuição da Amazônia pela evapotranspiração, em seguida, é transportada até o sudeste da América do Sul pelo Jato de Baixos Níveis a leste dos Andes (Cavalcanti et al., 2009). Os ventos alísios de nordeste da Alta Subtropical do Atlântico Norte, não são visualizados no domínio da Figura 3a, mas sofrem deflexão pelos Andes em latitudes tropicais para sudeste fluindo em direção a Baixa do Chaco, contribuindo com a chuva da parte continental da ZCAS (Cavalcanti et al., 2009). Durante o verão, a ASAS fica menos expandida e mais afastada da costa brasileira (Sun et al., 2017; Cavalcanti et al., 2009) assim como observado na Figura 3a, caracterizando o ramo oceânico das ZCAS. Dessa forma, o transporte de umidade do Oceano Atlântico Sul para o continente fica

favorecido influenciando também a chuva climatológica que ocorre no Sudeste do Brasil (Reboita et al., 2019) coerente com o observado na Figura 3d.

Na climatologia de chuva são notados valores máximos na faixa litorânea desde os extremos do sul do Rio de Janeiro ao norte de Santa Catarina e, sobre Baixada Santista, a média de Fevereiro ficou entre 14 a 16 mm/dia. De acordo com Seluchi e Chou (2009) a interação entre a Serra do Mar e a direção predominante dos ventos de larga escala nessa região, formam condições de instabilidade pela combinação de alta disponibilidade de umidade na baixa atmosfera com o ar quente forçado a se elevar a sota-vento da Serra. Os ventos de larga escala são os oriundos do ramo oeste da ASAS assim como notado na Figura 3a.

Quatro dias antes dos dias de extremos selecionados (Dia -4) houve atuação anômala do anticiclone e ciclone transientes centrados em 49°W;35°S e 34°W;34°30'S, respectivamente (Figura 4a). As anomalias nos centros desses sistemas foram de 3,5 hPa e -1 hPa, aproximadamente. Outro anticiclone com núcleo posicionado em 25°W;29°S e com anomalia de 2 hPa, aproximadamente, indicou que a ASAS esteve menos intensa que o anticiclone transiente (Figura 4a) e espacialmente menos distribuída em relação a sua posição climatológica de Fevereiro (Figura 3a). Isso permitiu que os ventos que fluíram da periferia noroeste do anticiclone transiente desde as latitudes mais altas, adentrassem o interior do continente. Essa configuração oposta ao que ocorre climatologicamente pode ter sido devido ao resfriamento da troposfera e consequente inibição da formação da Baixa do Chaco em 20°S e 65°W.

Na região orientada no sentido noroeste-sudeste desde a costa norte do Sudeste até o oceano adjacente, os ventos convergiram e diminuíram de intensidade, formando um sistema frontal anômalo nessa região. A frente foi originada pela interação entre a periferia do anticiclone transiente e da ASAS que equivalem a duas massas de ar com características de temperatura e umidade distintas. Da interação entre o anticiclone transiente, ou pós-frontal, e o ciclone que esteve associado ao sistema frontal foi gerada uma extensa “pista de ventos” confluentes de sul fluindo em direção à costa do centro-norte de São Paulo ao sul do Rio de Janeiro com velocidade aproximada de 3 a 4 m/s (Figura 4a).

Essa extensa “pista de ventos” favoreceu o transporte de massa d'água a sua esquerda resultando no máximo do acúmulo junto à costa,

desde o centro-norte de São Paulo ao sul do Rio de Janeiro, variando entre 0,05 a 0,2 m acima da média para Fevereiro (Figura 4b). A configuração foi coerente com o empilhamento originado pelo Transporte de Ekman (Pugh, 1987) esquematizado na Figura 9b de Da Silva (2022), enfatizando a importância da passagem do centro de baixa pressão sobre uma plataforma continental para acumular água junto à costa. Assim como explicado em Harari (2021), a barreira física do próprio continente faz com que as águas da plataforma comecem a ser empilhadas junto à costa gerando uma inclinação da superfície oceânica e, portanto, um diferencial de pressão entre a região costeira, com o nível do mar mais elevado, e a região afastada da costa, com o nível do mar rebaixado.

A subsidência, ou seja, o movimento descendente de águas superficiais mais quentes para camadas subsuperficiais por consequência do empilhamento (Harari, 2021), resultou na presença

de águas costeiras mais quentes que a climatologia desde o centro-norte de São Paulo ao Rio de Janeiro (Figura 4c). Os ventos intensos na periferia leste do anticiclone pós-frontal se deslocaram para o Sudeste do Brasil (Figura 4a) onde houve o aquecimento anormal da TSM na região costeira. Como os ventos ficaram praticamente perpendiculares à costa houve convergência do escoamento ao norte de 27°S o que pode ter contribuído com o transporte de umidade para a maior parte do Rio de Janeiro acarretando a chuva entre 2 a 12 mm/dia, acima da média, nessa localidade (Figura 4d). Enquanto isso, no litoral central de São Paulo houve um déficit de até -2 mm/dia em relação à climatologia de Fevereiro (Figura 4d), apesar de ter chovido entre 6 a 12 mm/dia nos 4 dias que antecederam os dias de extremos selecionados (figura não mostrada) consistente com o aquecimento da superfície oceânica junto a costa nesse período (Figura 4c).

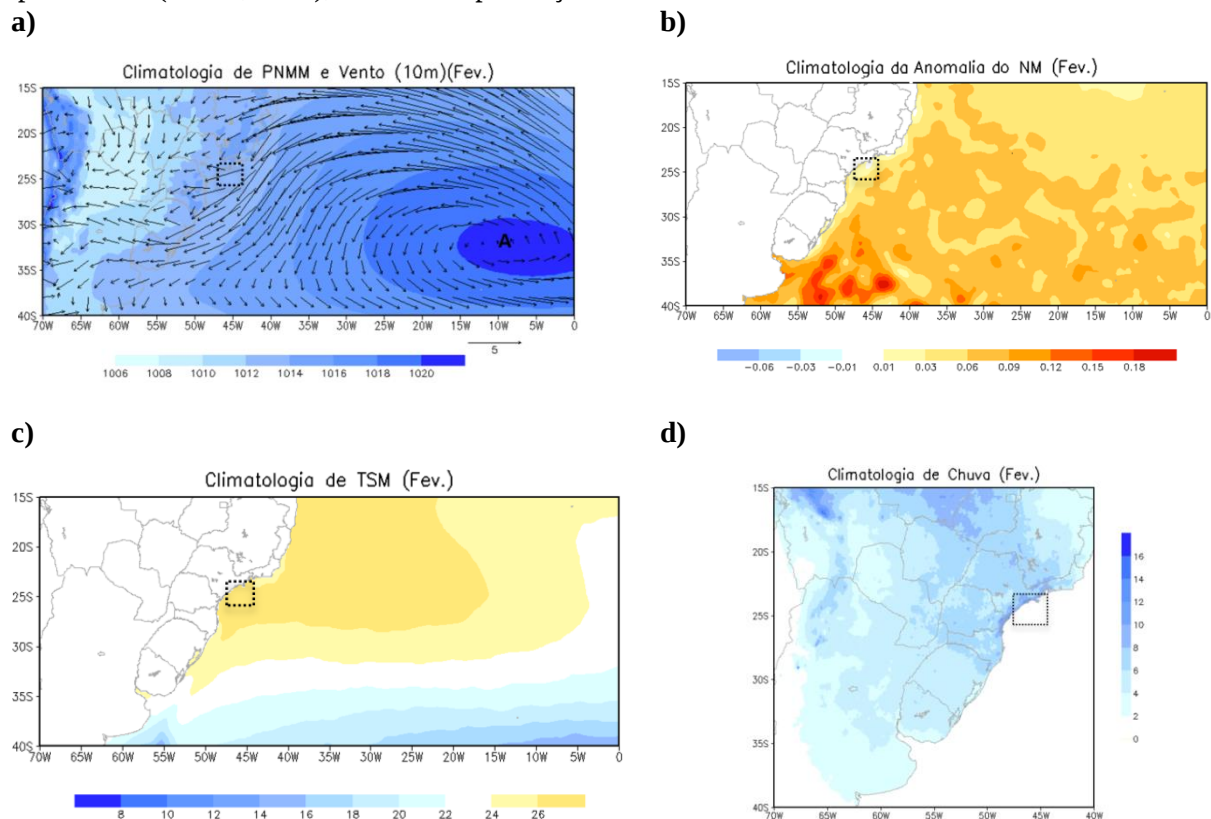


Figura 3. Mapas com as médias climatológicas do mês de Fevereiro durante 1994 a 2019: PNMM (hPa) e vento em 10m (m/s) (a); ANM (m) (b); TSM (°C) (c) e chuva (mm/dia) (d). A letra A representa o centro da Alta Subtropical do Atlântico Sul e o quadrado em pontilhado delimita a costa de Santos/SP e as vizinhanças.

Nos dias de extremos de sobre-elevação do NM (Dia 0), a anomalia no centro do anticiclone pós-frontal variou entre 2,5 a 3 hPa, ou seja, o sistema esteve mais fraco comparado ao Dia -4 (Figuras 5a e 4a, respectivamente). Possivelmente isso se deu por influência do atrito da superfície continental devido à migração desse anticiclone para noroeste. Com o deslocamento e predomínio do anticiclone transiente sobre o continente, os ventos de sul da periferia desse sistema podem ter transportado ar mais frio para interior da América do Sul, mantendo uma condição desfavorável à formação da Baixa do Chaco (Figura 5a). Ou seja, a ocorrência de extremos de sobre-elevação do NM em Santos acima de +2 desvio-padrão dependeu do enfraquecimento da Baixa do Chaco.

Parte dos ventos da periferia leste desse anticiclone transiente se manteve sobre o oceano e, pela força do gradiente de pressão, se deslocou em direção ao ciclone extratropical que esteve mais intenso comparado ao Dia -4, enquanto a outra parte migrou em direção ao sistema frontal. Com -1,5 hPa de anomalia em seu núcleo, o ciclone extratropical também migrou para noroeste com centro em 37°W;34°S (Figura 5a) o que explica a redução da PNMM sobre a costa do Rio de Janeiro em relação aos 4 dias que antecederam os dias com eventos extremos. Na região entre o anticiclone pós-frontal e o ciclone extratropical, os ventos confluíram anormalmente em função do intenso gradiente de pressão entre esses sistemas. O escoamento ganhou intensidade ficando de 4 a 5 m/s acima da média adquirindo direção sudoeste e fluindo ao longo da costa do Sudeste numa trajetória mais paralela em comparação ao Dia -4. A extensão da “pista de ventos” de sudoeste foi de 1500 km, aproximadamente, desde o Oceano Atlântico Sul passando pela costa de Santos até o Rio de Janeiro.

Ventos anormalmente intensos de sudoeste mantiveram o NM sobre-elevado desde o centro-norte de São Paulo ao sul do Rio de Janeiro (Figura 5b), porém com valores mais acentuados em relação ao Dia -4 (Figura 4b) chegando a 0.25 e 0.3 m acima da média em Santos/SP. Isso se deu em resposta a barreira limite imposta pelo continente que, nesse caso, permitiu a acumulação

de água junto à costa (Harari, 2021). Essa característica de acúmulo de águas costeiras foi reforçada pelos ventos intensos do oceano em direção ao Sudeste do Brasil e que persistiram desde os 4 dias antes do período entre 11 a 22 de fevereiro de 2018. Assim como notado na Figura 5b, em relação à climatologia de Fevereiro, os maiores desvios positivos do NM ficaram junto à costa do Sudeste do Brasil, enquanto que os menores nas vizinhanças do oceano mais afastado. Ou seja, a superfície oceânica ficou mais inclinada, forçando a diferença de pressão entre a região costeira de Santos, onde o NM se elevou de maneira extrema, e a região distante da costa, onde a elevação ficou reduzida.

A TSM permaneceu anormalmente positiva em comparação aos 4 dias que antecederam 11 a 22 de fevereiro de 2018, porém com valores ligeiramente menores próximo da costa de Santos enquanto que os maiores ocorreram no Rio de Janeiro e o oceano aberto entre 28°-42°W;18°-30°S (Figura 5c). O aquecimento da atmosfera por baixo (Ynoue et al., 2017), desde as águas mais aquecidas e durante dias seguidos, fez com que a PNMM ficasse mais baixa na costa sudeste brasileira (Figura 5a) em comparação com a situação da Figura 4a. Isso explica o porquê o sistema frontal se manteve aproximadamente estacionário sobre o Estado do Rio de Janeiro onde havia águas mais aquecidas, consequentemente, favorecendo a intensificação e deslocamento do ciclone extratropical para noroeste em relação ao Dia -4. A partir dessa configuração, esse ciclone contribuiu para com ventos de superfície mais intensos oriundos do oceano se deslocando numa trajetória mais paralela em parte da costa sudeste do Brasil comparado ao Dia -4.

A distribuição espacial das anomalias de chuva da Figura 5d foi semelhante a da Figura 4d, entretanto sobre o interior do continente incluindo o centro-norte ao centro-sul das Regiões Sul e Sudeste, respectivamente, houve aumento do volume de chuva. No que se refere às regiões costeiras, foi notado um aumento de chuva na maior parte dos Estados de São Paulo e Rio de Janeiro associado à redução da PNMM.

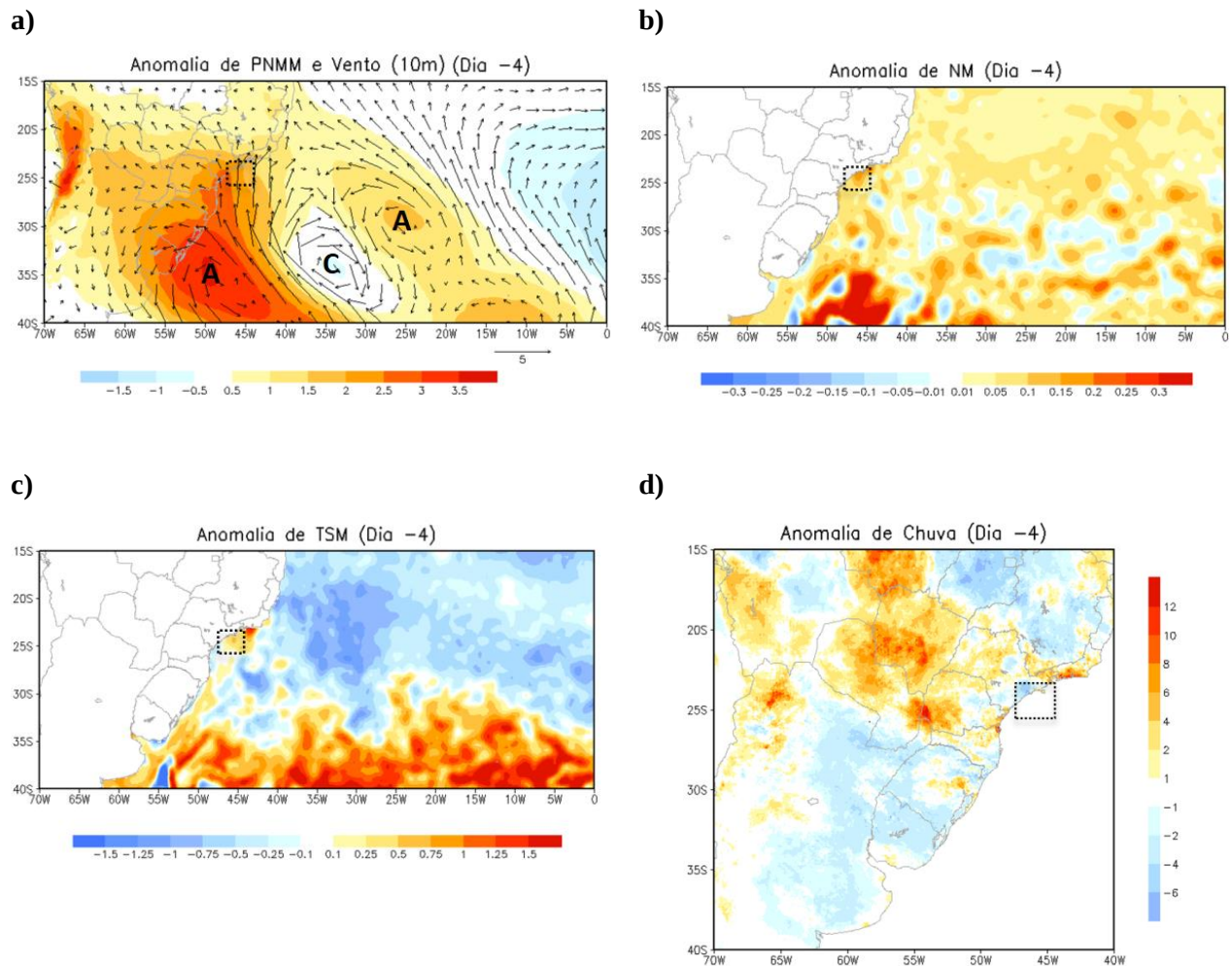


Figura 4. Mapas das anomalias durante o período de 7 a 18 de fevereiro de 2018 referente aos 4 dias que antecederam os dias com valores extremos de sobre-elevação do NM selecionados (Dia -4). As anomalias foram calculadas com relação à climatologia de Fevereiro de 1994 a 2019: PNMM (hPa) e vento em 10m (m/s) (a); NM (m) (b); TSM (°C) (c); Chuva (mm/dia) (d). Da esquerda para a direita no domínio da Figura 4a, as letras A, C e A representam os centros do anticiclone transiente, do ciclone extratropical e da Alta Subtropical do Atlântico Sul, respectivamente. O quadrado em pontilhado delimita a costa de Santos/SP e as vizinhanças.

Essa redução pode ter ocorrido pelo aumento da instabilidade atmosférica devido ao transporte de umidade oceânica da “pista de ventos” de sudoeste para essas regiões. Dessa forma, a chuva diária acima da média no Dia 0 foi consequência desse transporte originado pelos ventos intensos confluentes em superfície, da interação entre a periferia leste do anticiclone transiente e oeste do ciclone extratropical. Isso teria levado ao aumento do movimento vertical ascendente, reforçando a convergência dos ventos no sistema frontal, contribuindo para que esse ficasse aproximadamente estacionário desde a

costa norte do Sudeste até o oceano adjacente, comparado ao Dia -4. A Cidade de Santos que teve de 8 a 12 mm/dia na climatologia de chuva de Fevereiro (Figura 3a), teve de 6 a 8 mm/dia acima da média (Figura 5d) nos dias com valores extremos de sobre-elevação do NM. Além disso, já tinha chovido de 12 a 18 mm/dia acima da média nos 2 dias anteriores ao Dia 0 sobre essa cidade (figura não mostrada), o que parece ter sido favorecido pelo transporte de umidade mencionado anteriormente.

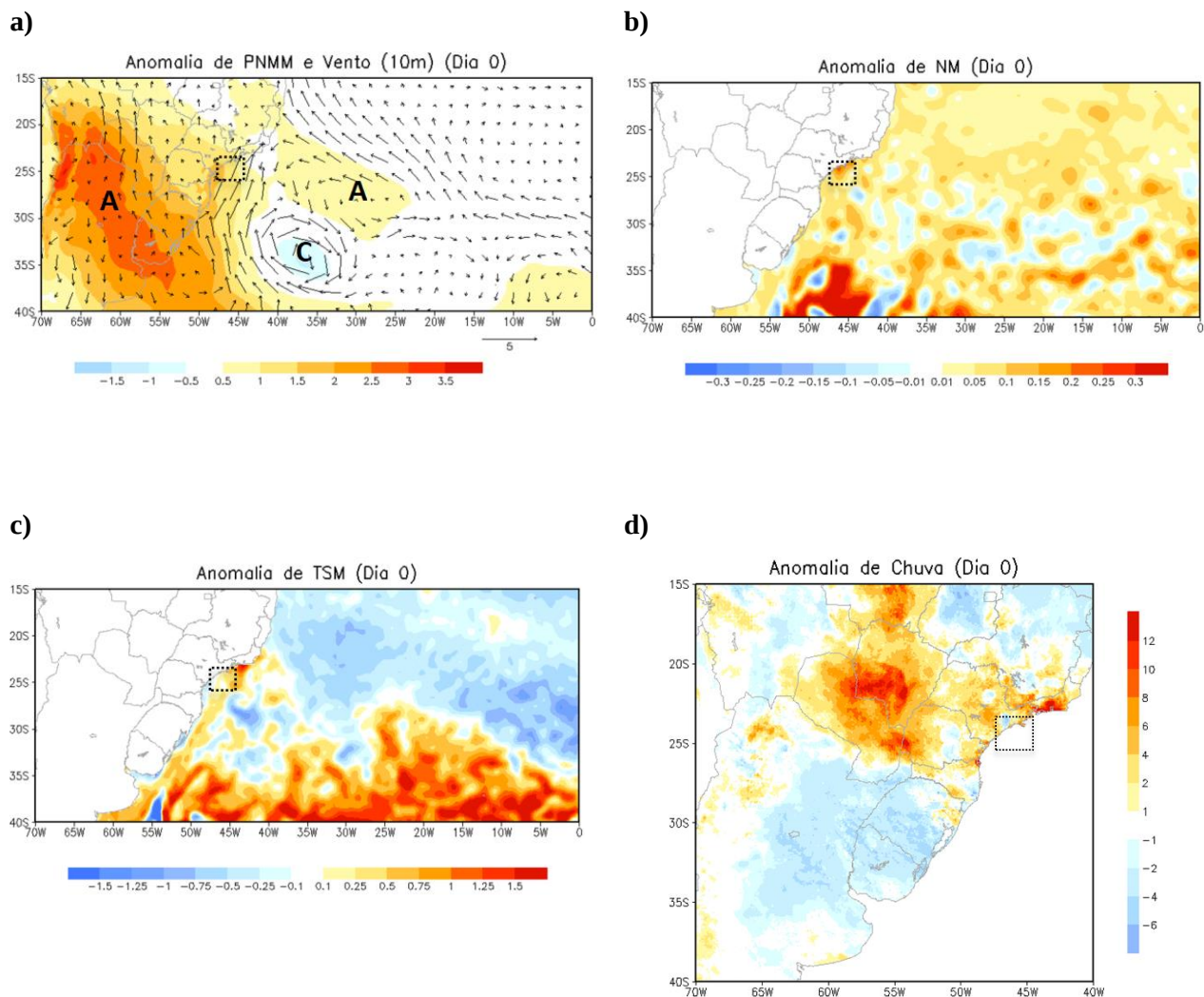


Figura 5. Assim como na figura anterior, mas para o período de 11 a 22 de fevereiro de 2018 referente aos dias com valores extremos de sobre-elevação do NM selecionados (Dia 0). Da esquerda para a direita no domínio da Figura 5a, as letras A, C e A representam os centros do anticiclone transiente, do ciclone extratropical e da Alta Subtropical do Atlântico Sul, respectivamente. O quadrado em pontilhado delimita a costa de Santos/SP e as vizinhanças.

Conclusões

O estudo investigou a contribuição do vento em superfície na elevação extrema do nível do mar em Santos. A investigação foi feita para um período dentro da estação de verão escolhida por apresentar menor frequência de ocorrência de eventos de sobre-elevação extrema dessa variável de acordo com Campos et al. (2010). Mais especificamente foi analisada a influência do vento em superfície em gerar valores extremos positivos do NM que tivessem ocorrido conjuntamente com chuva, situação que pode ter reforçado os episódios de alagamentos relatados em Defesa Civil de Santos (2018).

Inicialmente foi realizada a detecção das anomalias do nível do mar de altimetria de satélite

durante os verões de 1994 a 2019 sobre as coordenadas de 23°59'.5 S e 46°18'.1 W: A série não filtrada foi equivalente aos desvios originais e a filtrada na frequência de corte de 28 horas relacionada aos desvios forçados pelo vento em superfície. Nessa última, a filtragem serviu para detectar os desvios que não tiveram influência das forçantes regulares, a astronômica e do barômetro invertido. A série não filtrada apresentou tendência positiva e estatisticamente significativa, indicando que as anomalias do nível do mar em Santos/SP sofreram uma taxa de aumento de +0,00004 m/ano durante o verão. Para a série filtrada na frequência de corte de 28h, a taxa foi de +0,00002 m/ano, ou seja, 50% do aumento nas anomalias do nível do mar em Santos/SP foi devido à variação irregular

da atmosfera relativa ao vento em superfície associado ao Transporte de Ekman.

Apesar de o resultado ter sido para uma única estação do ano, o verão, ele reforça o sinal da tendência anual positiva de elevação no nível do mar projetada para Santos até 2100 encontrada por Marengo et al. (2017b). De acordo com De Gouveia Souza et al. (2021): “Em Santos, o pior cenário projetado para 2100, de elevação do nível médio do mar de 0,45 m, somado à cota máxima de inundação, de 1,66 metros, provocada por um evento extremo com tempo de retorno de 100 anos, já foi extrapolado em 2016, durante um evento de extremo conjugado de ressaca e maré alta anômala.” Isto significa que o sinal positivo na tendência dessa variável projetada para o clima futuro (Kirezci et al., 2020) já vem sendo observado no clima presente, mesmo durante o verão que é a estação do ano em que a sobre-elevação se torna menos favorecida climatologicamente. Os resultados também evidenciaram que o maior predomínio de anomalias positivas do nível do mar em relação às negativas ocorreu a partir de dezembro de 1998, ou seja, entre o final de 1990 e início de 2000. Isso corroborou com o período de mudanças no comportamento histórico de variáveis meteo-oceanográficas (De Oliveira et al., 2020) e meteorológicas (Da Silva et al., 2021) que impactaram no Sudeste do Brasil.

Após a análise histórica, o período entre 11 a 22 de fevereiro de 2018 foi selecionado como sendo o de interesse para o estudo por ter apresentado valores acima da média mais 2 desvios-padrão da série filtrada, 0,08996 m, durante dias consecutivos e com associação com os registros de alagamentos que constam no documento da Defesa Civil de Santos (2018). Esse período, definido como Dia 0, teve 12 dias consecutivos com acúmulo de água de maneira extrema junto à costa de Santos durante um único verão, o de 2018. Campos et al. (2010) encontraram 10 dias de verão com valores acima de +2 desvios-padrão, 0,38 m, a partir de dados filtrados da Estação Maregráfica do Porto de Santos usando a mesma frequência de corte de 28h, mas para 1981 a 1990. Assim como descrito em Ducet et al. (2000), o menor valor no NM encontrado no presente estudo pode estar relacionado às correções aplicadas na técnica de altimetria por satélite que implica em valores suavizados em comparação com dados marégrafo. Para o período climatológico de 1951 a 1990, Campos et al. (2010) identificaram 64 casos ao longo de 40 verões (média de 1,6 casos/verão),

enquanto no presente estudo houve 40 casos durante 26 verões (média de 1,54 casos/verão). Ou seja, a climatologia usada no presente estudo foi menor que a utilizada por Campos et al. (2010), mas foi relativa a um período mais recente e a média de casos por verão foi ligeiramente igual a obtida pelos autores.

Na etapa de atribuição, os resultados evidenciaram que durante os 4 dias que antecederam os dias com extremos selecionados, ou seja, entre 7 a 18 de fevereiro de 2018 (Dia -4), a Alta Subtropical do Atlântico Sul esteve espacialmente menos distribuída e a Baixa do Chaco enfraquecida em relação a climatologia de Fevereiro. Isso propiciou a presença do sistema frontal anômalo orientado no sentido noroeste-sudeste desde a costa norte do Sudeste até o oceano adjacente. Associado a essa frente, houve a presença do anticiclone transiente (ou pós-frontal) centrado em 49°W;35°S e o ciclone extratropical. E a partir da interação entre a periferia desses sistemas, foi gerada uma extensa “pista de ventos” intensos em superfície, com velocidade aproximada de 3 a 4 m/s, que confluíram adquirindo direção sul se deslocando para as costas do centro-norte de São Paulo ao sul do Rio de Janeiro. Águas costeiras mais quentes que a climatologia ocorreram, principalmente, desde o centro-norte de São Paulo ao Rio de Janeiro o que evidenciou o enfraquecimento da ressurgência climatológica nessas localidades corroborando com o estudo de Silva et al., (2023).

O aquecimento das águas costeiras esteve relacionado à subsidência, ou seja, a transferência de movimento de águas superficiais mais aquecidas para baixo na coluna de água subsuperficial por consequência do empilhamento (Harari, 2021) gerado a partir da “pista de ventos” mencionada anteriormente.

Nos dias com sobre-elevação do NM em Santos, 11 a 22 de fevereiro de 2018 (Dia 0), o anticiclone pós-frontal se enfraqueceu se deslocando para noroeste. Com sua aproximação e o predomínio sobre o continente, os ventos de sul associado a esse sistema mantiveram a Baixa do Chaco anormalmente inibida. Essa evidência indica que a elevação extrema do nível do mar em Santos dependeu do enfraquecimento da Baixa do Chaco.

O ciclone extratropical que 4 dias antes estava centrado em 34°W;34°30'S, se intensificou e se deslocou para noroeste nos dias com sobre-elevação do NM ficando centrado em 37°W;34°S. A interação entre a periferia do anticiclone transiente e do ciclone extratropical, manteve uma

intensa “pista de ventos” confluentes sobre o oeste do Oceano Atlântico Sul fluindo para a costa da costa de Santos. Entretanto, em comparação ao Dia -4, além da intensificação do escoamento, a mudança de direção de sul para sudoeste mais paralelo ao continente reforçou o empilhamento costeiro, elevando o nível do mar sobre a maior parte do Sudeste do Brasil. Isso resultou nos valores extremos do NM acima de 2 desvio-padrão da média do mês de fevereiro na localidade de Santos no Dia 0.

A chuva acima da média do mês de Fevereiro registrada em Santos/SP tanto nos 2 dias que antecederam o período com extremos selecionados quanto durante esse período, foi influenciada pela condição de atmosfera instável sobre a costa sudeste do Brasil. Condição devida a continuidade no transporte de umidade oceânica pelos ventos intensos de sudoeste que sopraram sobre águas anormalmente aquecidas pelo empilhamento extremo. O aquecimento da atmosfera a partir de águas anormalmente quentes durante dias consecutivos levou a redução da PNMM. Isso reforçou a convergência dos ventos no sistema frontal que se manteve aproximadamente estacionário desde a costa norte do Sudeste até o oceano adjacente, quando comparado ao Dia -4.

O estudo mostrou evidências de que os valores extremos de sobre-elevação do nível do mar em Santos, durante 11 a 22 de fevereiro de 2018, ocorreram juntamente com chuva acima da média. Essa ocorrência concomitante criou um ambiente mais propício para alagamentos contribuindo com os registros relatados pela Defesa Civil em vários dos dias que fizeram parte desse período. O Relatório de Operação dos Planos Preventivos da Defesa Civil (Governo do Estado de São Paulo, 2017) definiu o valor ≥ 80 mm de chuva acumulada em 72 horas como o limiar para o Estado de Atenção da Baixada Santista. Entretanto, em fevereiro de 2018 em Santos, a chuva acumulada das 72 horas do dia 13 foi de 80 mm, enquanto no dia 14 choveu 40 mm. Ou seja, nesse último dia o limiar de chuva estaria abaixo do esperado para o Estado de Atenção, mas segundo os resultados apresentados no presente estudo, houve registro de pontos de alagamento que podem ter sido reforçados pela persistência da sobre-elevação extrema do NM desde o dia 11 desse mês.

As composições de anomalias de pressão ao nível do mar e vento em 10m geradas para os 4 dias antecessores e durante os dias com elevação extrema do NM permitiram identificar algumas das principais circulações atmosféricas anômalas, tanto

sobre o interior da América do Sul quanto sobre o Oceano Atlântico Sul, responsáveis pelo aumento dessa variável em Santos/SP. Entretanto, os fatores que causam os desvios extremos do NM precisam ser continuamente estudados e previstos (Franz et al., 2021), principalmente em regiões de pouca declividade e grande densidade populacional assim como Santos. Além disso, nas composições se identificou várias circulações atmosféricas coerentes com outras identificadas em estudos prévios, mas que tiveram objetivos e períodos de análise diferentes em relação aos do presente estudo.

Em Campos et al. (2010), por exemplo, as composições de médias para os casos de extremos do nível do mar acima de +3 desvios- sobre Santos, teve a presença de um cavado vindo de sul desde dois dias antes com ventos intensos que se tornaram de sudoeste paralelos à costa de São Paulo nos dias de suas ocorrências. No estudo de caso de Machado et al. (2010), o ciclone extratropical esteve posicionado mais a sudeste em comparação a posição identificada no presente estudo para o Dia 0. Mas de maneira semelhante, o sistema de baixa pressão interagiu com o anticiclone transiente, que estava no cone sul do continente provocando o evento extremo de altura de onda acima de 6 m no dia 21 de julho de 1996 no Sul do Brasil. A confluência dos ventos entre o anticiclone e ciclone transientes resultou em uma extensa “pista de ventos” de sudoeste com mais de 3000 km causando o máximo de perfis de erosão costeira registrados em 1996 sobre a região.

O entendimento que esses estudos trazem juntamente com os resultados aqui apresentados é que, os impactos de condições meteo-oceanográficas de escala sinótica e de larga escala não ocorrem de maneira independente, pois são tanto locais quanto regionais. Desta forma, uma vez havendo o monitoramento contínuo das variáveis meteo-oceanográficas é possível entender o efeito das ocorrências extremas associadas (Moreira et al., 2023; Costa et al., 2020). Os resultados do presente estudo podem contribuir com informações científicas para futuros Planos Preventivos, a exemplo do “Plano Preventivo de Defesa Civil para erosão costeira, inundações costeiras e enchentes/alagamentos causadas por eventos meteorológicos e oceanográficos extremos como ressacas do mar e marés altas” (Diário Oficial, 2016). A metodologia apresentada aqui pode ser usada operacionalmente de maneira contínua para atualizar os limiares do nível do mar e chuva que determinam a probabilidade para alagamentos estabelecidos

nesses Planos. E, desta forma, ajudar a reduzir o impacto de eventos extremos através do conhecimento científico em benefício da Sociedade.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (Proc. 137290/2020-9), Universidade Federal de São Paulo – Campus Baixada Santista, Defesa Civil de Santos, Estação Maregráfica da Praticagem de Santos, *Copernicus Climate Change Service, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, United States Geological Survey, University of California - Santa Barbara, National Aeronautics and Space Administration*. Aos fornecedores dos softwares *Climate Data Operators; Grid Analysis and Display System; Microsoft Corporation; R Project for Statistical Computing*.

Referências

- Araujo, C. E. S., Boll, M. G., Garbossa, L. H. P., Vanz, A., Candella, R. N., 2020. Atmospherically induced large amplitude sea-level oscillations on October 29, 2019 at Santa Catarina, Brazil. *Natural Hazards*, v. 106, n. 2, p. 1581-1597. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04375-0>
- Bombardi, R. J.; Carvalho, L. M. V. D., 2017. Práticas Simples em Análises Climatológicas: Uma Revisão. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(3), 311-320. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-77863230001>
- Campos, R. M.; De Camargo, R.; Harari, J., 2010. Caracterização de eventos extremos do nível do mar em Santos e sua correspondência com as Reanálises do modelo do NCEP no Sudeste do Atlântico Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 25, n. 2, p.175-184. DOI:<https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000200003>
- Candella, R. N.; De Araujo, E. S., 2021. Meteotsunamis in Brazil: an overview of known occurrences from 1977 to 2020. *Natural Hazards*, v.106, n. 2, p. 1563-1579. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04331-y>
- Castello, J. P.; Krug, L. C. (org.), 2015. Introdução às Ciências do Mar. Editora Textos, p.493-499, Pelotas. ISBN 9788568539002. Disponível: <https://cienciasdomarbrasil.furg.br/images/livros/LivroIntroducaoCienciasDoMar.pdf>
- Acessado em: 05 set. 2022.
- Cavalcanti, I. F. De A.; Ferreira, N. J., Dias, M. A. F Da Silva; Silva, M. G. A. J. Da Silva., 2009. Tempo e clima no Brasil. Oficina de Textos, 463 p., ISBN 9788586238925.
- CDO User Guide., 2023. Climate Data Operator. Version 2.2.2, Uwe Schulzweida – MPI for Meteorology. Disponível em: <https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo/embedded/cdo.pdf>. Acessado em 25 set. 2023.
- Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store. 2018. Sea level gridded data from satellite observations for the global ocean from 1993 to present. DOI: <https://doi.org/10.24381/cds.4c328c78>.
- Costa, C.G.R.; Leite, J.R.B.; Castro, B.M., Blumberg, A. F.; Georgas, N.; Dottori, M.; Jordi, A., 2020. An operational forecasting system for physical processes in the Santos-Sao Vicente-Bertioga Estuarine System, Southeast Brazil. *Ocean Dynamics* 70, 257–271. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10236-019-01314-x>
- Da Silva, D. V., 2022. Eventos atmosféricos em escala sinótica e sua influência sobre ambientes costeiros e o mar de Plataforma Continental. *Gestão Ambiental e Sustentabilidade em Áreas Costeiras e Marinhas: Conceitos e Práticas v.2*. p. 23-41. DOI: <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.6676260>
- Da Silva, G. A. M.; Cardoso, C. De Souza; Ambrizzi, T.; De Souza, C. P.; Mendes, D.; Gomes, H. B., 2021. Detecção e atribuição das anomalias anuais dos índices de extremos de chuva e temperaturas máxima e mínima diárias sobre o litoral de São Paulo/Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(05), 3008-3043. DOI: <http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v14.5.p3008-3043>
- Defesa Civil de Santos., 2018. Relatório fotográfico dos meses de janeiro, fevereiro, março e abril de 2018. Santos. 15p.
- De Castro Filho, B. M.; Lee, T. N., 1995. Wind forced sea level variability on the southeast Brazilian shelf. *Journal of Geophysical Research*, v. 100, n. c8, p. 16045-56, 1995 DOI: <https://doi.org/10.1029/95JC01499>.
- De Castro Filho, B. M.; Pereira, A. F.; De Caroli, A.; Foloni Neto, H.; Paschoal, G. C. A.; Da Silveira, I. C. A.; Amor, C. C. (In Memoriam), 2015. Correntes e massas de água na plataforma continental. Martins, R.P., Grossmann-Matheson, G.S., editores.

- Meteorologia e oceanografia. Elsevier, Habitats, 2. 189-252.
- De França Lima, R.; De Barros, F. M. L.; Cirano, M., 2021. Análise das Condições Meteoceanográficas em Eventos de Ressaca do Mar no Litoral do Estado do Rio de Janeiro, Brasil no Período de 1948 a 2008. Anuário do Instituto de Geociências, v. 44, 41726. DOI: https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_41726.
- De Gouveia Souza, C. R.; Torres, P. H. C.; De Oliveira Brandão Campos, T. L.; Dias de Freitas, E., 2021. Extremos climáticos no litoral paulista: práticas de adaptação: Entrevista com Celia Regina de Gouveia Souza. Diálogos Socioambientais, [S. l.], v. 4, n. 11, p. 40 – 47. Disponível em: <https://periodicos.ufabc.edu.br/index.php/dialogossocioambientais/article/view/557>. Acessado em 18 ago. 2023.
- De Oliveira, M. M. F.; De Oliveira, J. L. F.; Fernandes, P. J. F.; Ebecken, N. F. F., 2020. Análise de tendências anuais e sazonais de extremos da Temperatura da Superfície do Mar próximo à costa da América do Sul no período de 1979 a 2018. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 13, n. 6, p. 2531-2552. DOI:<https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.6.p2531-2552>.
- Diário Oficial, 2016. Edita o Plano Preventivo de Defesa Civil para erosão costeira, inundações costeiras e enchentes/ alagamentos causados por eventos meteorológicos-oceanográficos extremos como ressacas do mar e marés altas. Resolução CMIL 17-610-Cedec, de 28-11-2016. Casa Militar, Poder Executivo – Seção I, 126 (222) – 3, São Paulo.
- Diário Oficial de Santos, 2017. Plano Municipal de Contingência para Ressacas e Alagamentos do Município de Santos. Atos Oficiais do Poder Executivo. Santos. Disponível em: <https://diariooficial.santos.sp.gov.br/edicoes/inicio/download/2017-07-07.pdf>. Acessado em: 02 set. 2022.
- Ducet, N.; Le Traon, P. Y.; Reverdin, G., 2000. Global high-resolution mapping of ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and -2. Journal of Geophysical Research: Oceans, v. 105, n. 8, p.19477-19498. American Geophysical Union. DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/2000jc900063>.
- Ekman, Vagn Walfrid., 1962. On the Influence of the Earth's Rotation On Ocean-currents: With a Biography of the Author. Uppsala: Almqvist & Wiksells boktr., Arkiv för Matematik, Astronomi och Fysik Bd. 2, n. 11. Disponível em: <https://hdl.handle.net/2027/mdp.39015039868792>. Acessado em 25 set. 2023.
- Franz, G., Garcia, C. A. E, Pereira, J., De Freitas Assad L.P., Rollnic, M., Garbossa, L. H. P., Turra, A. Trotte Duhá, J. R., Cirano, M., Estefen, S. F., Lima, J. A. M., Paiva, A. M., Noerbnberg, M. A., Tanajura, C. A. S. Moutinho, J. L., Campuzano, F, Pereira E, S, Lima, A. C., Mendonça, L. F. F., Nocko, H, Machado. L. Alvarenga, J. B. R., Martrins, R, P, Bock, C. S. Toste, R, Landau, L, Miranda, T, Dos Santos, F. Pellegrini, J, Juliano, M, Neves, R, Polejack, A, 2021. Coastaal Ocean Observing and Modeling Systems in Brazil Initiatives and Future perspectives. Front Mar Sci. 8: 681618.
- Funk, C. C.; Peterson, P. J.; Landsfeld, M. F.; Pedreros, D. H.; Verdin, J. P.; Rowland, J. D.; Romero, B. E.; Husak, G. J.; Michaelson, J. C.; Verdin, A. P., 2014. A quasi-global precipitation time series for drought monitoring. U. S. Geological Survey Data Series, 832, 4p., DOI: <https://doi.org/10.3133/ds832>.
- Governo do Estado de São Paulo, 2017. Relatório da Operação dos Planos Preventivos de Defesa Civil – PPDC. Operação Verão 2016-2017. Secretaria do Meio Ambiente, Instituto Geológico. São Paulo. Disponível em: https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/233/2017/11/RELAT_P_PDC_2016-2017_FINAL.pdf. Acessado em 06 set. 2022.
- Harari, J. (organizador). Vários autores., 2021. Noções de oceanografia [livro eletrônico]. 1º ed.. São Paulo: Ed. #entremarés. Instituto Oceanográfico/Universidade de São Paulo, 2021. ISBN: 978-65-995854-0-1. Disponível em: https://inserver.com.br/usp/livros/nocoas_oceanografia-baixa.pdf. Acessado em 21 ago. 2023.
- Hersbach, H.; Bell, B.; Berrisford, P.; Biavati, G.; Horányi, A.; Muñoz Sabater, J.; Nicolas, J.; Peubey, C.; Radu, R.; Rozum, I.; Schepers, D.; Simmons, A.; Soci, C.; Dee, D.; Thépaut, J-N., 2023. ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store. DOI: <https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6>.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2022. Censo 2022: População e Domicílios -

- Primeiros Resultados. Santos. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama>. Acessado em 18 ago. 2023.
- Kirezci, E.; Young, I. R.; Ranasinghe, R. et al., 2020. Projections of global-scale extreme sea levels and resulting episodic coastal flooding over the 21st Century. *Sci Rep* 10, 11629. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67736-6>.
- Machado, A. A.; Calliari, L. J.; Melo Filho, E.; Klein, A. H. D. F., 2010. Historical assessment of extreme coastal sea state conditions in southern Brazil and their relation to erosion episodes. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, 5(2), p.105-114. Disponível em: <https://repositorio.furg.br/handle/1/5101>. Acessado em 15 set. 2023.
- Marengo, J.; Muller-Karger, F.; Pelling, M.; Reynolds, C.J.; Merrill, S.B.; Nunes, L.H.; Paterson, S.; Gray, A.J.; Lockman, J.T.; Kartez, J.; Moreira, F.A.; Greco, R.; Harari, J.; Souza, C.R.G.; Alves, L.; Hosokawa, E.K.; Tabuchi, E.K., 2017b. An Integrated Framework to Analyze Local Decision Making and Adaptation to Sea Level Rise in Coastal Regions in Selsey (UK), Broward County (USA), and Santos (Brazil). *American Journal of Climate Change*, 6: 403-424. DOI: <https://doi.org/10.4236/ajcc.2017.62021>.
- Marinha do Brasil., 2017. Descrição de Estação Maregráfica. Estação: Praticagem Santos. Disponível em: https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br/chm/files/dados_de_mare/50227_-_praticagem_santos_f-41_padrao_v1-17.pdf. Acessado em 05 set. 2022.
- Mateus, A. L. M., 2019. Análise da variação do nível médio do mar na Bacia de Santos através de altimetria por satélite. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia do Mar. Universidade Federal de São Paulo – Campus Baixada Santista, Santos.
- Moreira, D. L.; Dalto, A. G.; Figueiredo JR. A. G.; Valerio, A. M.; Detoni, A. M. S.; Bonecker, A. C. T; ... & Sousa, S. H. M., 2023. Multidisciplinary scientific cruises for environmental characterization in the Santos Basin—methods and sampling design. *Ocean and Coastal Research*, 71, e23022. DOI: <https://doi.org/10.1590/2675-2824071.22072dlm>.
- Neves, C. F., 2005. O Nível Médio do Mar: Uma Realidade Física ou Um Critério de Engenharia? *Vetor*, Rio Grande, v.15, n.2, p.19-35. Disponível em: <https://periodicos.furg.br/vetor/article/view/185/11>. Acessado em 15 set. 2023.
- Parise, C. K.; Calliari, L. J.; Krusche, N., 2009. Extreme storm surges in the south of Brazil: atmospheric conditions and shore erosion. *Brazilian Journal of Oceanography*, 57(3), p. 175-188. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjoce/a/WfxcWmTHgq6pctypbZtYS9p/?format=pdf&lang=en>. Acessado em 15 set. 2023.
- Pinheiro, A.; Severo, D. L., 2023. Enchentes e inundações na Bacia do Rio Itajaí, SC, p. 85-101. Em *Desastres e água: eventos históricos no Brasil*. Organizadores: Franciele Zanandrea, Masato Kobiyama, Gean Paulo Michel, Ayan Fleischmann, Walter Collischo. Vários autores. ABRHidro, 398p, 1. ed., Porto Alegre, RS. ISBN 978-85-88686-47-2.
- Pugh, D., 1987. *Tides, Surges and Mean Sea-Level*. John Wiley & Sons Ltd. 486 p. ISBN 047191505X. Disponível em: <https://eprints.soton.ac.uk/19157/1/sea-level.pdf>. Acessado em 15 set. 2023.
- Reboita, M.S.; Ambrizzi, T.; Silva, B. A.; Pinheiro, R.F.; Da Rocha, R. P., 2019. The South Atlantic Subtropical Anticyclone: Present and Future Climate. *Front. Earth Sci.*, 7:8. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00008>.
- Reynolds, R. W.; Smith, T. M.; Liu, C.; Chelton, D. B.; Casey, K. S.; Schlax, M. G., 2007. Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature. *Journal of Climate*, v. 20, n. 22, p. 5473-5496. American Meteorological Society. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/2007jcli1824.1>
- Ruiz-Etcheverry, L. A.; Saraceno, M., 2020. Sea Level Trend and Fronts in the South Atlantic Ocean. *Geosciences*, 10, 218. DOI: <https://10.3390/geosciences10060218>
- Seluchi, M. E.; Chou S. C., 2009. Synoptic patterns associated with landslide events in the Serra do Mar, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 98(1), 67-77. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-008-0101-x>.
- Seluchi, M. E., Saulo, C., Nicolini, M., Satyamurty, P., 2003. The Northwestern Argentinean Low: A study of two typical events. *Mon. Wea. Rev.*, 132, p. 2361–2378. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2003\)131%3C2361:TNALAS%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2003)131%3C2361:TNALAS%3E2.0.CO;2).
- Silva, D. A.; Sasaki, D. K.; Dottori, M.; da Silveira, I. C. A.; Belo, W. C.; Martins, R. P., 2023. An

- inventory of salty and warm subsurface intrusions in the South Brazil Bight. *Continental Shelf Research*, v. 259, p. 104984. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2023.104984>.
- Sun X.; Cook K.H.; Vizzy E.K., 2017, The South Atlantic Subtropical High: Climatology and Interannual variability. *Journal of Climate*, 30 (2017), pp. 3279:3296. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0705.1>.
- Vasconcelos, T.M.; Da Silva, G. A. M.; Gomes, A. G.; Mendonça, J. T., 2021. Extremos negativos do nível do mar durante o inverno e a influência no mexilhão Perna perna do Costão do Marujá - Cananéia/SP. *Geociências*, v. 40, p. 245, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.5016/geociencias.v40i1.15183>.
- Von Storch, H.; Zwiers, F., 2003. *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge University Press. 474pp. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=d4573b4307d80e5b9f1845770c226759fb331023>. Acessado em 25 set. 2023.
- Wyrski, K., 1990. *Sea Level Rise: The Facts and the Future*. Pacific Science. University Of Hawaii Press, p. 1-16. Disponível em: <https://scholarspace.manoa.hawaii.edu/server/api/core/bitstreams/9f5d0615-d171-4b95-ae53-69439f7dc7f0/content>. Acessado em 15 set. 2023.
- Ynoue, R. Y.; Ambrizzi, T.; Reboita, M. S.; Da Silva, G. A. M., 2017. *Meteorologia: Noções Básicas*. Oficina de Textos, 184p, São Paulo. ISBN: 978-85-7975-263-6, eISBN: 978-85-7975-264-3.