

ANÁLISE DE TENDÊNCIA DE VARIÁVEIS METEOCEANOGRÁFICAS ESTIMADAS POR SATÉLITE NA BACIA DE SANTOS

Milton Kampel¹, Vitor G. Paiva¹, Paulo Victor M. Silva¹, Fabio Dall Cortivo¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Divisão de Observação da Terra e Geoinformática, Av. dos Astronautas 1758, SJC, SP, 12227-010, milton.kampel@inpe.br, vitor.paiva@inpe.br, pv.marçhetosilva@gmail.com, fabio.cortivo@inpe.br

RESUMO

A Bacia de Santos é a maior bacia sedimentar do Brasil e líder na produção nacional de óleo e gás, abrigando grandes portos, cidades e unidades de conservação importantes. O ecossistema marinho é sensível a mudanças de longo-prazo que podem alterar a saúde do oceano. Foram analisadas séries históricas de variáveis meteoceanográficas de superfície derivadas de dados de satélites (temperatura, vento, anomalia do nível do mar, concentração de clorofila, precipitação, radiação fotossinteticamente ativa e profundidade da camada de mistura) para determinar tendências temporais entre 1981-2022. Os resultados indicaram tendência de aumento para todas as séries consideradas. Mudanças de longo-prazo na camada superior do oceano têm impactos relevantes no habitat de inúmeras espécies. Compreender os padrões de variabilidade no oceano é importante para a sua gestão e monitoramento, assegurando seu desenvolvimento sustentável e conservação.

Palavras-chave — sensoriamento remoto do oceano, meteoceanografia, Mann-Kendall, ecossistemas marinhos, Bacia de Santos.

ABSTRACT

The Santos Basin is the largest sedimentary basin in Brazil and the leader in the national production of oil and gas, housing major ports, cities, and important conservation units. The marine ecosystem is sensitive to long-term changes that can alter the health of the ocean. Historical series of satellite-derived surface meteoceanographic variables (temperature, wind, sea level anomaly, chlorophyll concentration, precipitation, photosynthetically active radiation, and mixed layer depth) were analyzed to determine temporal trends between 1981-2022. The results indicated an increasing trend for all series considered. Long-term changes in the upper layer of the ocean have significant impacts on the habitat of numerous species. Understanding patterns of variability in the ocean is important for its management and monitoring, ensuring its sustainable development and conservation.

Key words — ocean remote sensing, meteo-oceanography, Mann-Kendall, marine ecosystems, Santos Basin.

1. INTRODUÇÃO

A Bacia de Santos é a maior bacia sedimentar *offshore* do Brasil, com uma área total de mais de 350 mil quilômetros quadrados [1]. Está localizada na margem continental sudeste, entre os Altos de Cabo Frio (23°30'S) e Florianópolis (28°00'S). Limita-se ao norte com a Bacia de Campos e ao sul com a Bacia de Pelotas, a oeste com a Serra do Mar e a leste com o limite oriental do Platô de São Paulo.

Em 2021, a Bacia de Santos seguiu na liderança da produção nacional de petróleo com 70,4% de participação, com ampliação de 4,4 pontos percentuais em relação à 2020 [2]. Nesta região encontram-se portos importantes como o de Santos, Rio de Janeiro, Paranaguá e Itajaí, grandes cidades costeiras, como Rio de Janeiro, Santos e Florianópolis, abrigando estoques de recursos marinhos importantes, entre outros aspectos socioeconômicos relevantes. Ali também se encontram diversas Unidades de Conservação, como a Reserva Extrativista Marinha do Arraial do Cabo, Área de Proteção Ambiental da Baía de Paraty e da Baleia Franca, Estações Ecológicas Tamoios e Tupiniquim, Áreas de Proteção Ambiental Marinha do Litoral de São Paulo, Parque Nacional do Superagui, Parque Estadual da Ilha do Mel, Reserva Biológica Marinha do Arvoredo, entre outras. Podemos dizer que a Bacia de Santos desempenha papel importante para os ecossistemas marinhos e ciclo do carbono no Oceano Atlântico Sudoeste [3].

Os ecossistemas marinhos são altamente sensíveis à variabilidade ambiental, especialmente às mudanças de longo-prazo causadas pelas mudanças climáticas e atividades humanas, que podem alterar marcadamente a saúde dos ecossistemas [4]. Diversos estudos indicam que a biomassa e a produção primária fitoplanctônica podem ser reduzidas com o aquecimento global, como inferido a partir de observações por satélite [5], modelos climáticos [6] e dados *in situ* [7]. No entanto, uma alta variabilidade espacial de tais mudanças também foi observada, e diferentes regiões e escalas de tempo demonstram inconsistências e resultados contrastantes [8], especialmente onde mudanças naturais e efeitos antropogênicos podem afetar significativamente o ambiente marinho [9].

Este trabalho caracteriza padrões de variabilidade temporal na superfície do mar da Bacia de Santos, margem continental sudeste brasileira. Foram analisadas séries históricas de variáveis meteoceanográficas derivadas de dados de satélites e dados de saída de um modelo numérico

para determinar tendências de longo-prazo na região de estudo, entre 1981-2022.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Dados

Para testar a hipótese de que a oceanografia das águas superficiais da Baía de Santos mudou nos últimos 20+ anos, geramos séries temporais em escala decenal de variáveis meteoceanográficas com base em observações de satélite, dados in situ e saída de modelo numérico (Tabela 1). Foram calculadas médias mensais da temperatura da superfície do

mar (TSM), vento na superfície do mar (VSM), anomalia do nível do mar (ANM), concentração de clorofila na superfície do mar (CSM), radiação fotossinteticamente ativa (RFA), precipitação (PPT) e profundidade da camada de mistura (PCM). Este trabalho é uma contribuição do Projeto Santos – Caracterização Ambiental Regional da Baía de Santos (PCR-BS) - coordenado pelo PETROBRAS.

2.2 Análise de tendência

As médias mensais foram utilizadas em uma análise de tendência pelo método não-paramétrico de Mann-Kendall [10]. O teste sazonal de Mann-Kendall baseia-se na estatís-

Variável	Fonte	Período	Resolução Espacial	Resolução Temporal
TSM	NOAA OISST v2.1	1981-2022	0,25° x 0,25° (27,75km)	24h
VSM	CCMP	1987-2022	0,25° x 0,25° (27,75km)	6h
ANM	Ssalto/Duacs	1993-2022	0,25° x 0,25° (27,75km)	24h
CSM	ESA GlobColour	1997-2022	0,036° x 0,036° (4km)	24h
PPT	GPM	2000-2022	0,1° x 0,1° (11,1km)	3h
RFA	NASA/OBPG	2002-2022	0,009° x 0,009° (1km)	24h
PCM	ECCO2	1992-2022	0,25° x 0,25° (27,75km)	24h

Tabela 1. Variáveis meteoceanográficas e respectivas fontes de dados, período, resoluções espaciais e temporais.

tica S calculada para cada estação do ano, ou período da série temporal utilizada, separadamente. Portanto, ao aplicar o método à uma série temporal (x_1, \dots, x_N) , com frequência mensal ($i = 1, 2, \dots, 12$), a estatística S é calculada separadamente para a série de cada mês (S_i , Eq. 1), ou seja, para todos os meses de janeiro de cada ano entre si, todos os meses de fevereiro entre si, e assim sucessivamente, como segue:

$$S_i = \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{j=k-1}^N \text{sgn}(x_{ij} - x_{ik}) \quad (\text{Eq.1})$$

$$\text{Onde, } S_i = \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{j=k-1}^N \text{sgn}(x_{ij} - x_{ik}) \quad (\text{Eq.2})$$

Ao somar os valores da estatística S de cada estação ou período S_i obtém-se a estatística geral S_k (Eq. 3):

$$S_k = \sum_{i=1}^M S_i \quad (\text{Eq.3})$$

Onde, M é o número das estações ou períodos contidos em cada ano. Quando o produto entre o número de estações e o número de anos é maior que 25, a distribuição de S_k aproxima-se bem de uma distribuição normal com a esperança matemática igual à soma das esperanças individuais de cada S_i , sendo zero para a hipótese nula e com a variância igual à soma de suas variâncias. Assim, S_k é padronizada (Eq.4) pela subtração de sua esperança (μS_k) e dividida pelo desvio padrão (σS_k). O resultado é avaliado pela tabela da distribuição normal padrão.

$$Z_{Sk} = \begin{cases} \frac{S_k - 1}{\sigma_{Sk}} & \text{se } S_k > 0 \\ 0 & \text{se } S_k = 0 \\ \frac{S_k + 1}{\sigma_{Sk}} & \text{se } S_k < 0 \end{cases} \quad (\text{Eq.4})$$

$$\text{Onde, } \sigma_{Sk} = \sqrt{\sum_{i=1}^M (n_i/18)(n_i - 1)(2n_i + 5)} \quad (\text{Eq.5})$$

E n_i = número do dado na posição i . A hipótese nula é rejeitada em um dado nível de significância (α) se $|Z_{sk}| > Z_{crit}$, onde Z_{crit} é o valor da distribuição normal com a probabilidade de exceder $\alpha/2$.

Para estimar a magnitude de uma tendência, Hirsch et al. [10] sugerem utilizar o estimador *Sen's slope*, i.e., a magnitude da tendência é expressa pela inclinação da tendência que significa mudança da série por unidade de tempo.

$$d_{ijk} = (x_{ij} - x_{ik}) / (j - k) \quad (\text{Eq.6})$$

Sendo que para cada par $(x_{ij} - x_{ik})$, $i = 1, 2, \dots, M$, $1 \leq k < j \leq n_i$. O estimador de inclinação sazonal é a mediana dos valores de d_{ijk} .

3. RESULTADOS

Os resultados das análises de tendência sazonal de Mann-Kendall indicaram tendências positivas (de aumento) para todas as séries históricas consideradas no estudo (Tabela 2,

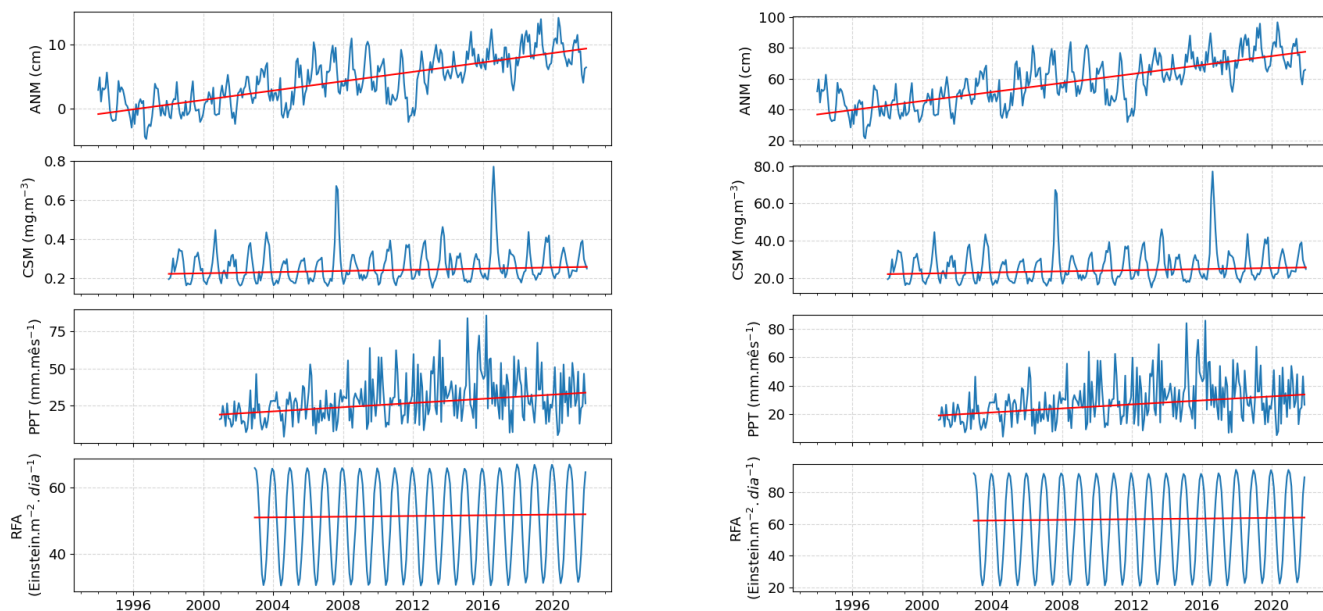


Figura 1. Séries históricas (médias mensais) da temperatura da superfície do mar (TSM), vento na superfície do mar (VSM), profundidade da camada de mistura (PCM), anomalia do nível do mar (ANM), concentração de clorofila na superfície do mar (CSM), precipitação (PPT) e radiação fotossinteticamente ativa (RFA) da Baía de Santos (azul) e retas de tendência (vermelho).

Figura 1). Os testes para verificação de tendência resultaram em p-valores significativos (< 0,05 ou 95%) para todas as variáveis aqui consideradas.

Variável	Tendência decenal
TSM	0,30 °C
VSM	0,25 m.s ⁻¹
ANM	3,60 cm
CSM	0,02 mg·m ⁻³
PPT	7,03 mm·mês ⁻¹
RFA	0,52 E·m ⁻² ·d ⁻¹
PCM	3,40 m

Tabela 2. Taxas de variação decenal da análise de tendência sazonal das variáveis meteoceanográficas.

4. DISCUSSÃO

Quantificar as tendências e a variabilidade da TSM é de fundamental importância para entender as mudanças no clima da Terra [11]. A variabilidade dominante da TSM na área de estudo é sazonal [12], mas também há uma tendência multidecadal de aumento da TSM devido ao forçamento do sistema climático por gases do efeito estufa [13]. A variabilidade da TSM advém de vários mecanismos com diferentes escalas de tempo. A variabilidade interanual da TSM em um determinado local tende a ser maior em alguns meses do ano do que em outros, também diferindo regionalmente [14].

Parte da variabilidade da TSM é fortemente modulada por ciclos sazonais da profundidade da camada de mistura, que são impulsionados por mudanças ao longo do ano na irradiância solar (incluindo RFA) e processos de mistura forçados pelo VSM [11]. A PCM mais rasa nos períodos de verão representa uma capacidade térmica efetiva do oceano relativamente menor e uma sensibilidade maior da TSM à variabilidade no forçamento atmosférico.

Mudanças na TSM e na RFA estão muitas vezes conectadas [4]. Um aumento na RFA pode levar a um aumento na TSM pelo aquecimento solar. No entanto, o aumento da TSM pode causar aumento na cobertura de nuvens e consequente diminuição da RFA. O aumento das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera provenientes de atividades humanas retém calor, causando desequilíbrio no balanço de energia da Terra e mudanças no sistema climático [13]. O oceano armazena 90%+ deste desequilíbrio e seu aquecimento leva ao aumento da estratificação vertical, expansão térmica e aumento do nível do mar.

Variações na topografia da superfície do oceano fornecem uma medida do conteúdo de calor, variabilidade de vórtices de mesoescala e processos relacionados à circulação geostrofica [15]. A série temporal da ANM na área de estudo, mostra uma tendência de aumento gradual que pode estar relacionada ao aquecimento oceânico e um possível aumento da atividade anticiclônica em mesoescala associada à Corrente do Brasil [16].

A profundidade da camada de mistura tem uma influência importante na atividade biológica da área de estudo [17]. A PCM aumenta no inverno devido à ação do vento na superfície do mar e processos de mistura

convectiva, diminuindo no verão devido à maior irradiância e VSM mais fraco. Esses processos afetam o *timing* e intensidade do *bloom* fitoplanctônico, com importantes implicações ecológicas.

Mudanças no clima oceânico estão associadas a mudanças em variáveis biológicas como a CSM [5]. O aumento da estratificação no oceano pode ser associado à diminuição na PCM [18]. Temperaturas mais quentes tendem a aumentar a clorofila celular do fitoplâncton, enquanto o aumento da irradiância ou diminuição da disponibilidade de nutrientes tendem a reduzir. Dependendo da magnitude de cada fator, a CSM muda [5]. Em certos casos, um aprofundamento da PCM pode aumentar o transporte vertical de nutrientes, levando a um aumento potencial da CSM. Mas há evidências em alguns locais, que o aumento da velocidade do vento é dominante em relação ao aumento da estratificação associada ao aquecimento, levando ao aumento da CSM. O aumento do VSM na área de estudo é consistente com o aumento observado em grande parte do oceano [15].

Compreender a vulnerabilidade da precipitação às mudanças climáticas é de importância crítica para a sociedade em geral [19]. Boa parte da precipitação é alimentada pela umidade proveniente da evaporação no oceano. A evaporação oceânica é determinada por padrões de circulação oceânica, fatores externos e *feedbacks* climáticos que forçam a TSM (p.ex., irradiância, aerossóis e gases do efeito estufa). A crescente contribuição oceânica ao ciclo hidrológico global está relacionada ao aumento da umidade de origem oceânica à medida que a TSM aumenta. Diversos estudos reportam que a precipitação e evaporação devem aumentar tanto nos continentes quanto no oceano em um cenário de aquecimento global. Desta forma, o papel relativo do oceano no ciclo hidrológico global aumenta à medida que as temperaturas globais aumentam.

5. CONCLUSÕES

Quantificar as tendências e variabilidades de variáveis meteoceanográficas e biológicas é de fundamental importância para entender as mudanças climáticas. Entender as tendências regionais é importante para informar sobre possíveis estresses para os organismos marinhos. As mudanças ao longo de décadas apresentam uma série de desafios para a gestão e utilização dos recursos marinhos. Com base em séries históricas derivadas de dados de satélites, dados *in situ* e modelo numérico foi possível determinar tendências positivas de longo-prazo na Bacia de Santos, entre 1981-2022. Entretanto, a interpretação desses resultados também deve levar em conta as incertezas inerentes aos dados e aos métodos de análise.

8. REFERÊNCIAS

- [1] L.S. Souza, G.N.C. Sgarbi. Bacia de Santos no Brasil: geologia, exploração e produção de petróleo e gás natural. *Boletim de Geologia*, 41(1):175-195, 2019.
- [2] ANP. Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural. SDP, 136, 46p., 2022.
- [3] A.C.O. Carvalho, et al. The southwestern South Atlantic continental shelf biogeochemical divide. *Biogeochemistry*, 159:139-158, 2022.
- [4] Y. Bai et al. Changes in the Ecological Environment of the Marginal Seas along the Eurasian Continent from 2003 to 2014. *Sustainability*, 10(3):635, 2018
- [5] M.J. Behrenfeld et al. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature*, 444:752-755, 2006
- [6] T.K. Steinacher et al. Projected 21st century decrease in marine productivity: A multi-model analysis. *Biogeosciences*, 7, 979-1005, 2010
- [7] D.G. Boyce et al. Global phytoplankton decline over the past century. *Nature*, 466:591-596, 2010
- [8] D.A. Siegel et al. Regional to global assessments of phytoplankton dynamics from the SeaWiFS mission. *Remote Sens. Environ.*, 135:77-91, 2013
- [9] M. Kahru, B.G. Mitchell. Ocean color reveals increased blooms in various parts of the world. *EOS Trans. AGU*, 89:170, 2008
- [10] R.M. Hirsch, J.R. Slack, R.A. Smith. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resources Research*, 18(1): 107-121, 1982
- [11] C.E. Bulgin, C.J. Merchant and D. Ferreira. Trends, variability, and persistence of sea surface temperature anomalies. *Scientific Reports*, 10:7986, 2020
- [12] M.M. Pacheco et al. Evolution of physical and biological patterns along the tropical and South Atlantic western boundary: A satellite perspective. *JGR Oceans*, 127(3):e2021JC017714, 2022
- [13] L. Cheng et al. Another Record: Ocean Warming Continues through 2021 despite La Niña Conditions. *Adv. Atmos. Sci.*, 39:373-385, 2022
- [14] V. Chaidez et al. Decadal trends in Red Sea maximum surface temperature. *Scientific Reports*, 7:8144, 2017
- [15] F.E.Muller-Karger et al. Natural variability of surface oceanographic conditions in the offshore Gulf of Mexico. *Progress in Oceanography*, 134:54-76, 2015
- [16] L. Calado, A. Gangopadhyay and I.C.A. Silveira. Feature-oriented regional modeling and simulations (FORMS) for the western South Atlantic: Southeastern Brazil region. *Ocean Modelling*, 25:48-64, 2008
- [17] M. Kampel et al. Caracterização e análise ambiental da Bacia de Santos com base no processamento de campos oceânicos superficiais estimados por satélites. *Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, p0711:3596-3603, 2015.
- [18] P.K. Dunstan et al. Global patterns of change and variation in sea surface temperature and chlorophyll a. *Scientific Reports*, 8:14624, 2018
- [19] K.L. Findell et al. Rising temperatures increase importance of oceanic evaporation as a source for continental precipitation. *Journal of Climate*, 32(22):7713-7726, 2019

AGRADECIMENTOS: Ao Projeto PETROBRAS Santos (PCR-BS), Agência Nacional do Petróleo (ANP) e IBAMA.