



Anomalias do nível do mar na costa do Rio Grande do Sul, Brasil (1993–2020): altimetria por satélite

Pedro Henrique Razzia Lira^{1*}, Venisse Schossler², Jefferson Cardia Simões³, Francisco Eliseu Aquino⁴

¹Licenciado em Geografia, Centro Polar e Climático, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. (*Autor correspondente: pedro.lira@ufrgs.br)

²Doutora em Geociências, Centro Polar e Climático, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

³Doutor em Glaciologia, Centro Polar e Climático, Professor da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

⁴Doutor em Geociências, Centro Polar e Climático, Professor da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

Histórico do Artigo: Submetido em: 23/03/2023 – Revisado em: 17/04/2023 – Aceito em: 12/06/2023

RESUMO

As zonas costeiras encontram-se suscetíveis a inúmeros riscos devido a sua localização na interface entre o mar e o continente. Muitos desses perigos estão associados a elevação do nível do mar sobre essas áreas, muitas vezes por consequência de eventos climáticos extremos. Em um planeta com o clima em mudança é fundamental caracterizar as diferentes regiões costeiras para entender as mudanças a que estarão submetidas. Esse estudo pretende quantificar as médias anuais de anomalias do nível do mar (SLA) na costa do Rio Grande do Sul (RS) entre os anos de 1993 e 2020. Para isso utilizamos dados de altimetria por satélites pós-processados pelo software X-TRACK (CTOH/LEGOS). Após a obtenção, organização e análise dos dados, foram calculadas as médias anuais da série histórica que demonstraram que até 2009 os valores eram negativos. A partir de 2010 os dados se tornaram positivos em uma escala ascendente. Nota-se também que 2020 é o ano com a variação positiva mais elevada. Dessa forma, podemos afirmar que os dados de satélite e o produto pós processado do X-TRACK são uma excelente alternativa para estudo do nível do mar regional em um país com poucos marégrafos e boias disponíveis.

Palavras-Chaves: Altimetria, dinâmica costeira, mudanças climáticas, X-TRACK.

Sea level anomalies on the coast of Rio Grande do Sul, Brazil (1993–2020): satellite altimetry

ABSTRACT

Coastal areas are susceptible to numerous risks due to their location on the interface between the sea and the continent. Many of these hazards are associated with rising sea levels over these areas, often as a result of extreme weather events. On a planet with a changing climate, it is essential to characterize the different coastal regions to understand the changes they will be subjected to. This study aims to quantify the annual averages of sea level anomalies (SLA) on the coast of Rio Grande do Sul (RS) between the years 1993 and 2020. For this, we used altimetry data from satellites post-processed by the X-TRACK software (CTOH/LEGOS). After obtaining, organizing and analyzing the data, the annual averages of the historical series were calculated, which showed that until 2009 the values were negative. From 2010 the data became positive on an ascending scale. It is also noted that 2020 is the year with the highest positive variation. Thus, we can state that satellite data and the post-processed product of X-TRACK are an excellent alternative for studying regional sea level in a country with few tide gauges and buoys available.

Keywords: Altimetry, coastal dynamics, climate changes, X-TRACK.

Lira, P. H. R., Schossler, V., Simões, J. C., Aquino, F. E (2023). Anomalias do nível do mar na costa do Rio Grande do Sul, Brasil (1993–2020): altimetria por satélite. *Meio Ambiente (Brasil)*, v.5, n.2, p.30-36.



1. Introdução

As zonas costeiras estão entre as regiões mais populosas do mundo. Localizadas na interface entre a terra e o mar, essas áreas estão expostas a riscos naturais. Conforme Marti et al. (2021), condições climáticas extremas, como ciclones, tempestades e inundações associadas a mudanças do nível do mar são alguns dos principais transtornos que a população litorânea deve enfrentar. Logo, as mudanças climáticas provavelmente agravarão muitos problemas que os ambientes costeiros já enfrentam: erosão da linha de costa, inundações costeiras, poluição da água, estresse e danos à biodiversidade costeira (Harley et al., 2006).

Resolver as questões associadas a elevação do nível do mar resultante das mudanças climáticas é um dos maiores desafios sociais deste século. De acordo com o Relatório Especial do IPCC sobre Oceano e Criosfera em um Clima em Mudança (2019), o nível médio global do mar aumentou 17 cm ao longo do século XX e esse fenômeno está se acelerando (Dangendorf et al., 2019; IPCC, 2019). Além disso, é notório que o nível do mar não aumenta uniformemente. Quanto menor a escala, mais o nível do mar e a exposição a riscos costeiros dependem de fatores além do clima (IPCC, 2019).

Por esse motivo, aprimorar os sistemas de observação e modelagem é essencial para melhor compreender e prever o comportamento do oceano costeiro (Liu et al., 2015). Melhorias na disponibilidade e qualidade dos dados de altimetria em águas rasas trabalham para esse objetivo (Vignudelli et al., 2011). A altimetria por satélite monitora as variações da topografia da superfície do mar a partir do espaço há décadas. Os dados de altimetria coletados através de satélites, tornaram-se um elemento muito importante na observação do sistema oceânico sendo utilizados para entender a dinâmica costeira. Atualmente, é uma das principais fontes de dados para sistemas e serviços operacionais de oceanografia, como: monitoramento oceânico, modelos de previsões e gestão das mudanças climáticas (Birol et al., 2017).

Desde o final da década de 1980 a medição altimétrica dos oceanos via sensores orbitais se tornou possível, no entanto, os radares e o processamento de dados foram otimizados para oceanos abertos, enquanto as medições do nível do mar em ambientes costeiros enfrentavam problemas que degradavam a precisão dos dados, dificultando o processamento e a interpretação deles (Birol et al., 2017). Contudo, nos últimos anos, houve um grande progresso em instrumentos de altímetro, algoritmos de processamento e correções (Vignudelli et al., 2011; Passaro et al., 2014; Verron et al., 2015; Pascual et al., 2015; Cotton et al., 2015).

Para contornar os problemas, inúmeros projetos foram financiados por agências espaciais para melhorar os produtos convencionais de altimetria de radares orbitais sobre áreas costeiras e águas continentais. Conjuntamente a isso, um algoritmo de pós-processamento especificamente adaptado para recuperar dados de altimetria em mares marginais foi desenvolvido no LEGOS (Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiale). Este software, denominado X-TRACK, é hoje operado rotineiramente no Centro de Topografia do Oceano e Hidrosfera (CTOH, Serviço Francês de Observação dedicado a estudos de altimetria por satélite) e grande parte do arquivo de dados de altimetria foi reanalisada (Birol et al., 2017).

Logo, o presente estudo visa calcular as médias anuais das anomalias do nível do mar no Rio Grande do Sul, entre os anos de 1993 e 2020. Com isso, podemos ilustrar padrões e desenvolver um melhor conhecimento sobre as tendências da dinâmica costeira no sul do Brasil. A organização desse trabalho dar-se-á pela sua estratégia metodológica que contará com os materiais e métodos aplicados; pela discussão dos resultados que apresentará uma visão geral deles; e pelas considerações finais que fecharão o trabalho abordando suas principais contribuições.

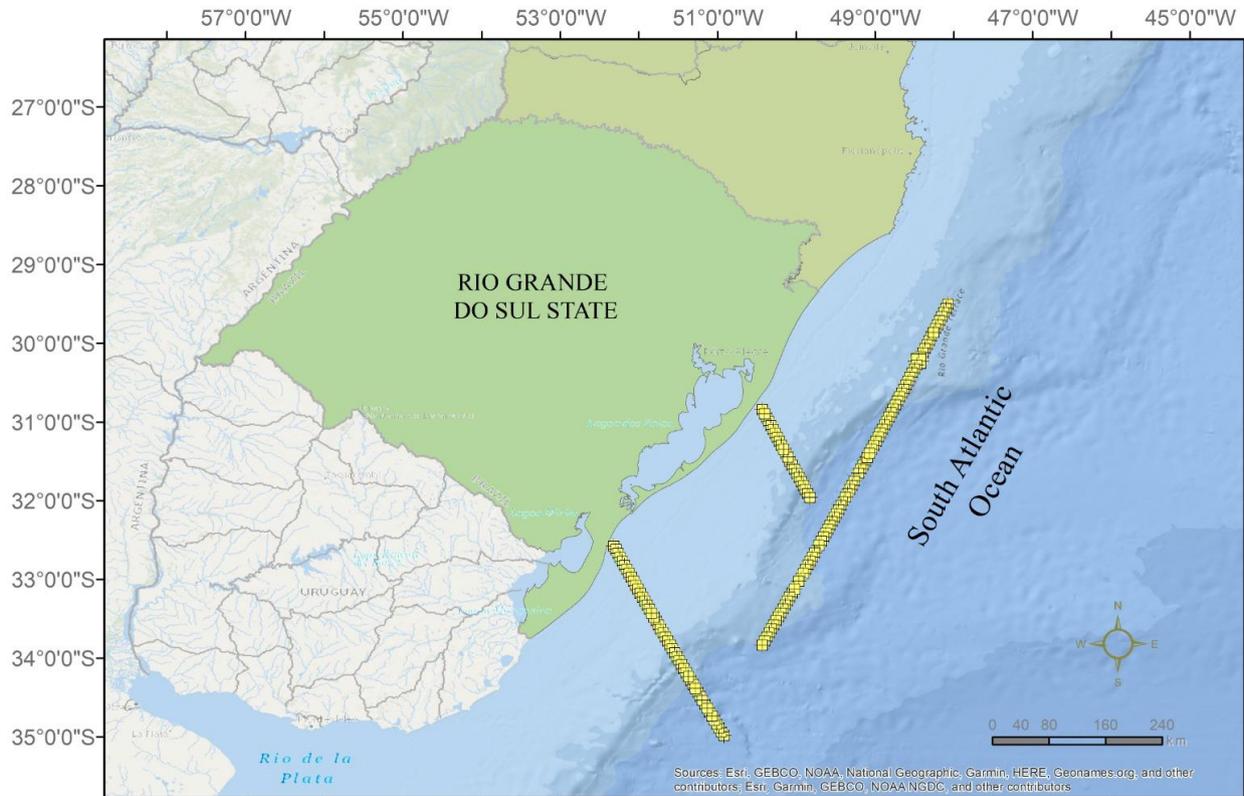
2. Material e Métodos

O software X-TRACK, desenvolvido pelo LEGOS, utiliza um algoritmo de pós-processamento que reexamina os dados altimétricos da costa corrigindo a interferência de obstáculos que esses levantamentos encontram como a interação do radar com a superfície sólida do solo e correções geofísicas – partículas

suspensas na atmosfera, barômetro reverso, efeitos de vento e maré, variações do nível do mar, entre outros (Birol et al., 2017).

Para a realização desse trabalho, foram utilizados dados de satélite produtos das missões orbitais do Topex/Poseidon e Jasons-1, Jason-2 e Jason-3 que, posteriormente, foram corrigidas pelo X-TRACK. As anomalias do nível do mar são projetadas em trilhas de referência com um intervalo espacial de aproximadamente 7 km entre os pontos. Dessa forma, se obteve os registros das medições de altura da superfície do mar coletados entre 1993 e 2020 junto a plataforma continental adjacente ao litoral do estado do Rio Grande do Sul (28°S-35°S; 48°W-54°W).

Figura 1 – Distribuição das trilhas de satélite obtidas a partir do software XTRACK.



Fonte: Schossler (2023)

Para o estudo, foram utilizadas 190.763 medições obtidas em 1004 ciclos entre 1993 e 2020. Esses dados altimétricos foram coletados de 187 pontos ao longo de 3 trilhas de referência que o satélite percorre na costa gaúcha. Posteriormente, esses dados foram organizados em planilhas com o intuito de gerar as médias altimétricas de cada ano para cada uma das trilhas do satélite que, em seguida, seriam integradas gerando uma média geral das variações do nível do mar para toda a região costeira do Rio Grande do Sul.

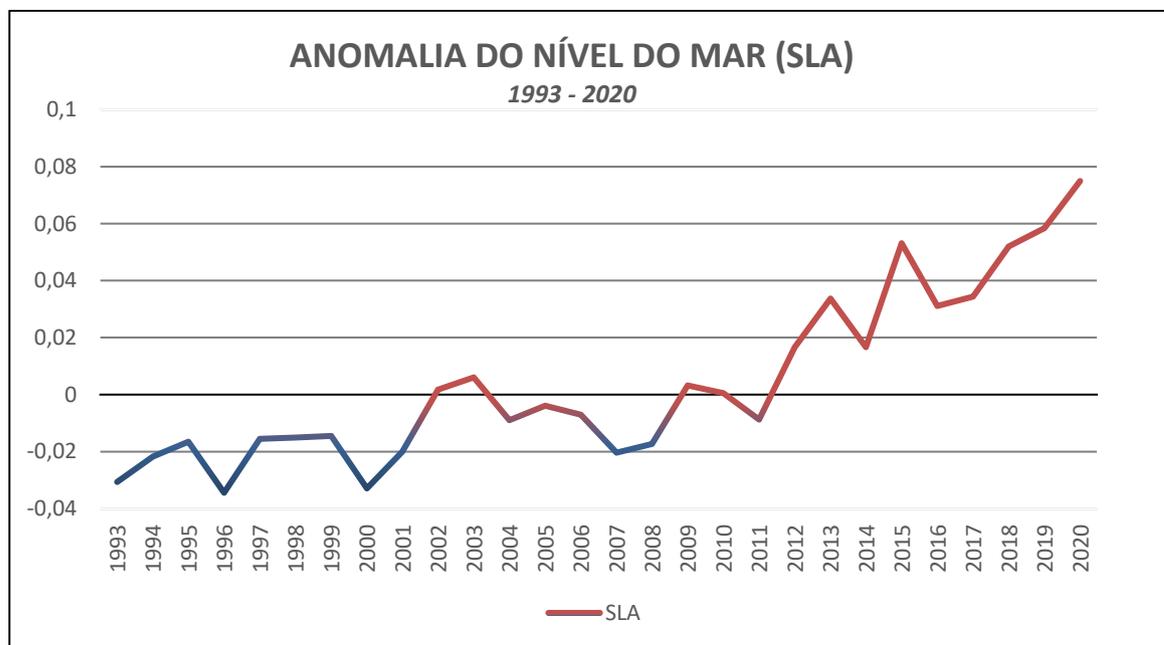
3. Resultados e Discussão

O processo chamado “retracking” (Gommenginger et al., 2011; Passaro et al., 2015; Wang & Ichikawa, 2017; Xu et al., 2018) tornou possível utilizar dados de nível do mar significativamente mais válidos nas zonas costeiras usando o reprocessamento adaptado das medições baseadas em altimetria para extrair uma estimativa

robusta do 'alcance' dos ecos do radar. Desse modo, conseguimos obter uma melhor compreensão do comportamento da altimetria marinho-costeira regional nos últimos anos, podendo desenvolver diversos estudos sobre suas dinâmicas, contrapondo-as com fatores climáticos e geomorfológicos.

Assim, utilizando os dados processados pelo X-TRACK e, posteriormente, fazendo as médias dos pontos e ciclos, obtemos as médias anuais de SLA para a região do litoral do RS, entre os anos de 1993 e 2020. Na Figura 1 podemos observar variações do Nível do Mar majoritariamente negativas no período de 1993 a 2009 e positivas de 2010 a 2020. Desde 2012 observamos um padrão ascendente nas médias anuais das anomalias, gerando questionamentos sobre essa tendência na região estudada.

Figura 2 – Variações do nível do mar na costa do Rio Grande do Sul entre 1993 e 2020.



Fonte: Schossler; Lira (2022).

Uma série de processos de pequena escala de origem oceanográfica e hidrológica, específicos das áreas costeiras, podem de fato modificar a taxa de elevação do nível do mar perto da terra: por exemplo, talude continental e correntes de plataforma, mudanças nas características das ondas, entrada de água doce dos rios em estuários etc. (Woodworth et al. 2019). Todavia, sistemas com escala global também podem influenciar diretamente diferentes áreas costeiras, como: vento, gradientes de pressão, circulação atmosférica e correntes oceânicas.

Stammer et al. (2013) destaca que os processos que levam a mudanças no nível do mar em escala global estão relacionados com mudanças na massa total (conteúdo de água doce) e/ou volume (conteúdo de calor) dos oceanos, mas também estão associados a deformações geométricas do fundo do mar. Em escalas regionais, o nível do mar também pode ser afetado por mudanças nas circulações atmosférica e oceânica, bem como por processos sólidos da Terra, ou seja, deformações em grande escala das bacias oceânicas e variações no campo de gravidade do planeta mais o solo local.

Assim, o nível do mar costeiro pode diferir significativamente do nível do mar em oceano aberto em uma ampla gama de escalas temporais. Em termos de tendências, o nível do mar em oceano aberto resulta essencialmente de processos que afetam o nível médio do mar global como a expansão térmica média do

oceano, derretimento do gelo terrestre e mudanças no armazenamento de água terrestre. Já na costa, além dessas contribuições, variações locais em outros processos podem causar mudanças adicionais de pequena escala no nível do mar em escalas interanuais a decadais, como efeitos de ressurgência, redemoinhos, ondas geradas pelo vento e ondulações, correntes da plataforma, mudanças na densidade da água relacionadas com o escoamento dos rios (Gouzenes et al., 2020).

As mudanças na temperatura e na salinidade do oceano (chamadas de efeitos termostéricos e halostéricos, respectivamente) também afetam o nível do mar por meio das mudanças associadas na densidade e no volume. No entanto, o estresse do vento é o principal fator de mudanças na massa e na altura estérica (termóstérica mais halostérica) através de numerosos processos dinâmicos (por exemplo: Transporte de Ekman, ondas planetárias e ressurgência costeira). Essas mudanças estão diretamente relacionadas a modos climáticos acoplados de variabilidade, como o El Niño/Oscilação Sul (ENSO), Oscilação Decadal do Pacífico, Oscilação do Atlântico Norte, Dipolo do Oceano Índico e Modo Anular Sul (Stammer et al., 2013).

Logo, mudanças associadas do nível do mar estérico em relação à média global em diferentes bacias oceânicas são atribuídas ao aquecimento diferencial e ao resfriamento de várias camadas oceânicas e processos físicos associados, como feedbacks de superfície e mistura lateral e vertical ou processos advectivos (Yin et al. 2010). Portanto, a mudança do nível do mar na costa pode não ser apenas uma extrapolação das tendências regionais do nível do mar que são fornecidas pelos produtos padrão de altimetria oceânica (Marti et al., 2021).

4. Considerações finais

Os estudos sobre o nível do mar são extremamente necessários para o entendimento das dinâmicas do oceano visando as perspectivas das mudanças climáticas. Por isso, podemos ressaltar que o método utilizado nesse trabalho facilita a obtenção de dados de nível do mar com maior resolução espacial, já que o software X-TRACK fornece dados com ótimas resoluções, permitindo estudos em escalas regionais maiores.

Levando em conta fatores que influenciam nas dinâmicas oceânicas, a altimetria por satélite permite a correção dos erros pré-processados, simplificando o trabalho a apenas levantamentos estatísticos. Assim, estudar o nível costeiro dos mares com sensores orbitais permite levar em conta dados de áreas mais extensas, sobrepondo a precisão de marégrafos. Além disso, o método dispõe de menores chances de registrar problemas com janelas temporais sem dados por decorrência de falhas nos sensores.

No que diz respeito à estimativa dos constituintes das marés, o processador X-TRACK permite que o erro residual atinja o nível equiparado ao de dados oceânicos profundos. Essas observações de marés, além de dados de marégrafos totalmente validados, seriam valiosas no futuro para restringir modelos de maré de mares costeiros e marginais com assimilação de dados.

Para circulação oceânica costeira modelo, graças aos produtos aprimorados do X-TRACK, o orçamento de erro do altímetro é reduzido nas regiões costeiras e a dinâmica costeira de escalas meso e micro agora é observável nas medições do altímetro. Este resultado promissor abre caminho para um monitoramento operacional do ambiente costeiro, proporcionando uma melhoria geral da representação em escalas curtas em modelos costeiros (Roblou et al., 2007).

5. Agradecimentos

Nesse espaço, vale agradecer aos colegas e amigos do Laboratório de Climatologia (NOTOS) e do Centro Polar e Climático (CPC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul; ao INCT da Criosfera; ao CNPq e FAPERGS. Que juntos, sigamos na construção de uma ciência brasileira forte e de qualidade.

6. Referências

- Birol, Florence. et al. (2017). Coastal applications from nadir altimetry: example of the x-track regional products. **Advances In Space Research**, 59, 4.
- Cotton, P.D. et al. (2015). Improved oceanographic measurements from SAR altimetry: results and scientific roadmap from the ESA Cryosat plus for oceans project. **Sentinel-3 for Science Workshop**, Venice, Italy.
- Dangendorf, Sönke et al. (2019). Persistent acceleration in global sea-level rise since the 1960s. **Nature Climate Change**, 9, 9, 705-710.
- Gommenginger, C. et al. (2010). Retracking Altimeter Waveforms Near the Coasts. **Coastal Altimetry**, 61-101.
- Gouzenes, Y. et al. (2020). Coastal Sea Level rise at Senetosa (Corsica) during the Jason altimetry missions. **Ocean Science: Discussions**, 3, 1-33.
- Harley, Christopher D. G. et al. (2006). The impacts of climate change in coastal marine systems. **Ecology Letters**, 9, 2, 228-241.
- IPCC. (2019). **IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate**. eds H.-O. Poörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, et al.
- Lebbe, Théophile Bongarts, et al. (2019). Designing Coastal Adaptation Strategies to Tackle Sea Level Rise. **Frontiers in Marine Science**, 8.
- Liu, Y., Kerkering, H., Weisberg, R. H. (2015). **Coastal Ocean Observing Systems**. Elsevier (Academic Press), London, UK, 461.
- Marti, Florence et al. (2021). Altimetry-based Sea level trends along the coasts of Western Africa. **Advances In Space Research**, 68, 2.
- Pascual, Ananda et al. (2015). Assessing SARAL/AltiKa Data in the Coastal Zone: comparisons with hf radar observations. **Marine Geodesy**, 38, 1, 260-276.
- Passaro, Marcello et al. (2014). ALES: a multi-mission adaptive subwaveform retracker for coastal and open ocean altimetry. **Remote Sensing Of Environment**, 145, 173-189.
- Passaro, M. et al. (2015). Annual sea level variability of the coastal ocean: the baltic sea: north sea transition zone. **Journal Of Geophysical Research: Oceans**, 120, 4, 3061-3078,
- Roblou, L. et al. (2007). X-track, a new processing tool for altimetry in coastal oceans. **2007 Ieee International Geoscience And Remote Sensing Symposium**, 1, 1, 1-5.
- Stammer, D. et al. (2013). Causes for Contemporary Regional Sea Level Changes. **Annual Review Of Marine Science**, 5, 1, 21-46.

Verron, Jacques et al. (2015). The SARAL/AltiKa Altimetry Satellite Mission. **Marine Geodesy**, 38, 1, 2-21.

Vignudelli, S., Kostianoy, A. G., Cipollini, P., Benveniste, J. (2011). **Coastal Altimetry**. Springer. ISBN 978-3-642-12796-0.

Xu, Xi-Yu et al. (2018). Evaluation of Coastal Sea Level Offshore Hong Kong from Jason-2 Altimetry. **Remote Sensing**, 10, 2, 282.

Wang, X.; Ichikawana, K. (2017). Coastal waveform retracking for Jason-2 altimeter data based on along-track echograms around the Tsushima Islands in Japan. **Remote Sens.** 9, 762-773.

Woodworth, Philip L. et al. (2019). Forcing Factors Affecting Sea Level Changes at the Coast. **Surveys In Geophysics**, 40, 6, 1351-1397.

Yin, J. J., Griffies, S. M., Stouffer, R. J. (2010). Spatial variability of sea level rise in twenty-first century projections. **J. Clim.** 23, 4585–607.