

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

JULIA GABRIELA DOS SANTOS SILVA

**As evidências do Impacto de 4 Anos dos Ciclos ENOS nos comportamentos de alto custo
de Baleia-franca-austral (*Eubalaena australis*)**

ALFENAS/MG

2025

JULIA GABRIELA DOS SANTOS SILVA

As evidências do Impacto de 4 Anos dos Ciclos ENOS nos comportamentos de alto custo de Baleia-franca-austral (*Eubalaena australis*)

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso: Bacharelado em Ciências Biológicas da Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Instituto de Ciências da Natureza.

Orientador: Rogério Grassetto Teixeira da Cunha

Coorientador: Eduardo Pires Renault Braga

ALFENAS/MG

2025

JULIA GABRIELA DOS SANTOS SILVA

As evidências do Impacto de 4 Anos dos Ciclos ENOS nos comportamentos de alto custo de Baleia-franca-austral (*Eubalaena australis*)


O Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Ciências Biológicas pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração

Aprovada em: 08 de dezembro de 2025

Prof. Dr. Rogério Grassetto Teixeira da Cunha

Assinatura:


Universidade Federal de Alfenas

Documento assinado digitalmente
 **ROGERIO GRASSETTO TEIXEIRA DA CUNHA**
Data: 09/12/2025 09:34:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Esp. Jerônimo Schmidt Machado Sanches

Assinatura:


Eutheria Soluções Sustentáveis e Educação

Documento assinado digitalmente
 **JERONIMO SCHMIDT MACHADO**
Data: 09/12/2025 11:06:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ma. Thaise Lima de Albernaz

Instituto Australis

Assinatura:

Documento assinado digitalmente
 **THAISE LIMA DE ALBERNAZ**
Data: 09/12/2025 23:17:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

ALFENAS/MG

2025

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Central

Silva, Julia Gabriela dos Santos.

As evidências do Impacto de 4 Anos dos Ciclos ENOS nos comportamentos de alto custo de Baleia-franca-austral (*Eubalaena australis*) / Julia Gabriela dos Santos Silva. - Alfenas, MG, 2025.

22 f. : il. -

Orientador(a): Rogério Grassetto Teixeira da Cunha.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas) - Universidade Federal de Alfenas, Alfenas, MG, 2025.

Bibliografia.

1. Comportamento. 2. El Niño. 3. La Niña. 4. Eubalaena australis. 5. Krill. I. Cunha, Rogério Grassetto Teixeira da , orient. II. Título.

AGRADECIMENTOS

Felizmente, sempre tive uma família unida, companheira e que me apoia, devo muito aos meus avós, pais, tios e primos; todos, sem exceção, contribuíram para que tudo isso fosse possível. Porém, em especial à minha avó Regina, minha mãe Roberta e aos meus tios Roger e Thiago, que, ao longo da minha vida, me ensinaram que, se existe um sonho, ele deve ser conquistado; me ensinaram que quando se faz com amor e carinho, tudo dá certo e foi assim que se tornaram os maiores apoiadores dos meus sonhos. Sem eles, eu não teria chegado até aqui. Assim como a espiritualidade, com meus Orixás e guias que me cuidam e guardam, abrindo meus caminhos e me ensinando a caminhar.

Gostaria de agradecer à Lívia, minha melhor amiga, que enfrentou comigo todas as minhas fases e loucuras, que sempre foi um porto seguro e nunca, nem por um segundo, me deixou desistir. Às meninas, Eduarda, Giovanna e Giulia, que com conversas diárias e alguns encontros mensais, faziam com que a vida corrida e cansativa se tornasse mais bonita e leve. Aos meus amigos do 'biolivres', Bruno, Gabs e todos que fizeram parte de algum momento da minha graduação, todos me mostraram a vida de uma forma diferente, e cada um com sua cultura, costume e criação, se tornaram minhas companhias e distração. Às minhas irmãs de santo, Luana, Jaqueline e Marina, que me deram suporte e me acolheram nos melhores e piores momentos.

À Atlético Primata, que ao longo de 3 anos me trouxe pessoas incríveis, me ensinou a liderar. Ao meu namorado, Lucas, que, com sua paz e calma, conseguiu me tranquilizar nos momentos mais difíceis do final da graduação, me fazendo enxergar o futuro com esperança e amor.

Aos meus orientadores, Rogério e Eduardo, pela paciência, disposição e ensinamentos ao longo dessa pesquisa. À Universidade Federal de Alfenas pela oportunidade de aprendizado e por ser meu "lar" por 5 anos. Ao Instituto Australis, pela oportunidade de trabalhar com baleias e por me ceder os dados necessários para pesquisa.

E, principalmente, à Biologia, por me dar a honra de estudar e trabalhar com algo tão lindo e valioso.

RESUMO

O objetivo deste estudo foi analisar a influência dos ciclos ENOS (*El Niño* e *La Niña*) na taxa de comportamentos de alto custo de baleias-francas austrais (*Eubalaena australis*) na costa de Santa Catarina, investigando a defasagem temporal desse impacto. A análise estatística não paramétrica utilizou dados de monitoramento terrestre de 2015 a 2024, padronizando a taxa de comportamento por tempo de esforço. Foram testadas hipóteses com defasagens de 1,5 e 4 anos, sendo o Modelo de Lag Longo (4 anos) o único validado estatisticamente, tanto para a redução de atividade (vales) associada ao *El Niño* quanto para o aumento (picos) associado à *La Niña*. Os anos de 2020 e 2023, ocorridos quatro anos após eventos de aquecimento, demonstraram taxas de atividade significativamente inferiores, refletindo uma estratégia de economia energética devido à baixa disponibilidade de krill no forrageamento prévio. Este resultado confirma que o *time lag* de 4 anos, alinhado à via oceânica lenta de propagação climática, é o principal fator determinante da condição energética da espécie na área reprodutiva. A capacidade preditiva do modelo estabelece que o *El Niño* cria vales e a *La Niña* cria picos de atividade, permitindo, por exemplo, projetar o próximo período de vulnerabilidade (vale) para a temporada de reprodução de 2028 (baseado no *El Niño* finalizado em 2024). A pesquisa justifica, portanto, a necessidade de reforçar a gestão e proteção da espécie durante os anos de estresse nutricional previsível.

Palavras-chave: *Eubalaena australis*; *El Niño*; *La Niña*; Krill; Comportamento.

ABSTRACT

This study aimed to analyze the influence of ENOS cycles (*El Niño and La Niña*) on the rate of high-cost behaviors of Southern Right Whales (*Eubalaena australis*) off the coast of Santa Catarina, investigating the temporal lag of this impact. The statistical analysis utilized non-parametric methods on terrestrial monitoring data from 2015 to 2024, standardizing the rate of behavior per unit of effort. Hypotheses with temporal lags of 1.5 and 4 years were tested, with the Long-Lag Model (4 years) being the only one statistically validated, both for the reduction in activity (troughs) associated with *El Niño* and for the increase (peaks) associated with *La Niña*. The years 2020 and 2023, occurring four years after warming events, demonstrated significantly lower activity rates, reflecting an energy-saving strategy due to the low availability of krill in previous foraging. This result confirms that the 4-year time lag, aligned with the slow oceanic pathway of climate propagation, is the principal determining factor of the species' energetic condition in the reproductive area. The model's predictive capability establishes that *El Niño* creates troughs and *La Niña* creates peaks in activity, allowing, for example, to project the next period of vulnerability (trough) for the 2028 reproductive season (based on the *El Niño* finalized in 2024). The research, therefore, justifies the need to reinforce the management and protection of the species during predictable years of nutritional stress.

Keywords: *Eubalaena australis*; *El Niño*; *La Niña*; Krill; Behavior.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. MATERIAIS E MÉTODOS	11
2.1 DADOS COMPORTAMENTAIS	11
2.2 DADOS SOBRE A DISPONIBILIDADE POPULACIONAL DO KRILL	11
2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA	13
3. RESULTADOS	14
4. DISCUSSÃO	15
5. CONCLUSÃO	18
REFERÊNCIAS	19

1. INTRODUÇÃO

O krill (*Euphasia spp.*), pequeno crustáceo encontrado nas águas do Oceano Atlântico, principalmente na área da Geórgia do Sul (ATKINSON *et al.*, 2004; TRATHAN & MURPHY, 2003), compõe a dieta de diversas espécies marinhas, incluindo a baleia-franca-austral (*Eubalaena australis*) (FIELDING *et al.*, 2014; SEYBOTH *et al.*, 2016). Este crustáceo tem sua abundância e distribuição diretamente influenciadas por fatores como a extensão do gelo marinho, a temperatura dos oceanos e a disponibilidade de fitoplâncton (ATKINSON *et al.*, 2004; FIELDING *et al.*, 2014; WING *et al.*, 2021).

Dois fenômenos climáticos com potencial de influenciar as populações de krill são os chamados *El Niño* e *La Niña* que, juntos, constituem um ciclo chamado de *El Niño* Oscilação Sul (ENOS ou ENSO, em sua sigla mais conhecida em inglês (TRENBERTH, 1997). O *El Niño* corresponde ao aquecimento das águas de grande parte da bacia do Oceano Pacífico, em especial na região centro-sul (TRENBERTH, 1997) e influencia diretamente as anomalias na temperatura da superfície do mar (TSM) pacífico. Já a *La Niña* corresponde à fase oposta desse ciclo, caracterizada pelo resfriamento anômalo das águas superficiais no Oceano Pacífico Equatorial, apresentando temperaturas abaixo da média climatológica (TRENBERTH, 1997). Essas anomalias podem se propagar para outras bacias oceânicas, ainda que com diferentes intensidades, por meio de conexões do sistema meteorológico (SEYBOTH *et al.*, 2016. No Atlântico Norte, por exemplo, observa-se que o aquecimento das águas do Pacífico, causado pelo *El Niño*, também é acompanhado de aquecimento; já no Atlântico Sul, essa interação não ocorre com a mesma frequência e intensidade (MALHI *et al.*, 2006).

A influência desse fenômeno, originado no Oceano Pacífico, propaga-se também até o Oceano Antártico, chegando através de duas vias, com defasagens temporais distintas: uma via atmosférica rápida, pela qual ventos podem transportar águas quentes para o Oceano Antártico com uma defasagem de 5 a 8 meses, e uma via oceânica mais lenta, através da Corrente Circumpolar Antártica, que pode levar até 3 anos para manifestar seus efeitos (MEREDITH *et al.*, 2004; TRATHAN *et al.*, 2003). Essa influência climática, uma vez estabelecida, desencadeia uma cascata de efeitos ecológicos em áreas de alimentação cruciais, como a Geórgia do Sul, provocando a diminuição do gelo marinho (GERMISHUIZEN *et al.*, 2024) e a alteração nas correntes marítimas, resultando no declínio do fitoplâncton (ATKINSON *et al.*, 2004; WEIMERSKIRCH *et al.*, 2018). Essas variáveis, por sua vez, impactam direta e negativamente a disponibilidade de krill (ATKINSON *et al.*,

2004), já que o gelo marinho constitui seu habitat ideal de desenvolvimento (HILL *et al.*, 2013) e o fitoplâncton é sua principal fonte de alimento (FIELDING *et al.*, 2014). Este cenário de menor disponibilidade de presas afeta diretamente os predadores, como a baleia-franca-austral (SEYBOTH *et al.*, 2016). Enquanto o *El Niño* está associado a uma menor biomassa de krill, a sua fase oposta, *La Niña*, está ligada a anomalias de temperatura de superfície do mar mais frias. Estas condições mais frias são conhecidas por favorecerem a abundância de krill (MARRARI *et al.*, 2008), criando condições de forrageamento potencialmente mais ricas para as baleias. No entanto, a relação entre os fenômenos climáticos (como o ENOS) e a disponibilidade local de krill na Geórgia do Sul é complexa (TRATHAN *et al.*, 2021). Dados recentes de biomassa ou captura de krill são, portanto, essenciais para validar os padrões observados e compreender a verdadeira resposta dos predadores (OWEN *et al.*, 2024).

A *Eubalaena australis* (DESMOULINS, 1822), comumente chamada de baleia-franca-austral, é um mamífero marinho que pertence à Ordem Cetacea e à Subordem Mysticeti. Esses animais possuem barbatanas ao longo de todo aparelho bucal, fazendo com que sua alimentação seja de forma filtradora, consumindo krills (*Euphasia* spp.), copépodos, entre outros pequenos animais e algas, disponíveis em regiões polares (ROWNTREE *et al.*, 2008). Uma das áreas de forrageamento dessa espécie, especialmente para as populações que se reproduzem no Brasil e na Argentina, são as ilhas Geórgia do Sul (FIELDING *et al.*, 2014; SEYBOTH *et al.*, 2016). No entanto, estudos recentes, incluindo aqueles conduzidos na Plataforma Patagônica, indicam que essas baleias utilizam uma variedade de locais de alimentação que se estendem ao longo do Atlântico Sudoeste, como locais de forrageamento suplementar, incluindo o consumo de copépodes nessas áreas mais ao norte (DAVIS *et al.*, 2020). Durante o forrageio, para que elas obtenham energia suficiente através de organismos tão pequenos, é necessário que consumam em torno de uma tonelada e meia de recursos por dia (LOCKYER, 1986). Esta estratégia energética as classifica como “*capital breeders*” (CHRISTIANSEN *et al.*, 2023; LOCKYER, 1986). Isso significa que, para sustentar toda a migração e o período de jejum no inverno e primavera, elas dependem inteiramente das reservas energéticas acumuladas nas áreas de forrageamento durante o verão. O estoque dessa energia é o que cobre os altíssimos custos da migração, gestação e, principalmente, da lactação, quando estão na costa brasileira (GROCH *et al.*, 2023). Esse período de jejum e de longas distâncias exige um enorme controle energético das fêmeas (CHRISTIANSEN *et al.*, 2023; VERMEULEN *et al.*, 2023). A eficiência desse acúmulo de energia é, portanto, o fator crítico

que determina sua sobrevivência e o sucesso reprodutivo subsequente (THOMAS, 1984; SEYBOTH *et al.*, 2016).

E essa reprodução ocorre em um ciclo trienal característico: parto e amamentação no primeiro ano, descanso no segundo e uma nova reprodução no terceiro (LEAPER *et al.*, 2006), com os filhotes nascendo no primeiro ano do ciclo seguinte. As baleias-francas-austrais fêmeas realizam migrações trienais para as costas gaúcha e catarinense no primeiro ano de seus ciclos como uma adaptação evolutiva para maximizar a sobrevivência dos filhotes. Os filhotes nascem com uma camada de gordura relativamente pequena (apenas 10 cm, comparado aos 40 cm de um adulto) (GROCH *et al.*, 2023), o que pode dificultar sua sobrevivência em águas geladas como as da Antártica. Dessa forma, a migração ocorre para que as baleias consigam parir seus filhotes em segurança nas enseadas gaúchas e catarinenses, protegidos contra o frio e de predadores (KLINOWSKA, 1991). As baleias-francas-austrais permanecem pela costa brasileira por aproximadamente 3 meses (GROCH *et al.*, 2023), período em que alimentam seus filhotes com aproximadamente 200 litros de leite por dia, e é durante esse período que ocorre o desenvolvimento de comportamentos cruciais, como o salto e batidas de caudas e nadadeiras, por meio da observação e interação com a mãe (CHRISTIANSEN *et al.*, 2023; GROCH *et al.*, 2023). Estes comportamentos são ferramentas essenciais para a comunicação, especialmente entre mães e filhotes (THOMAS & TABER, 1984), e para a interação com outros grupos (Kenney, 2009). Essas ações, no entanto, demandam alto custo energético, principalmente em baleias lactantes (CHRISTIANSEN *et al.*, 2023) e a quantidade de alimento disponível no momento de forrageamento no ano anterior pode interferir nos comportamentos expressos por elas posteriormente (SEGRE *et al.*, 2020; VERMEULEN *et al.*, 2023). Assim, o acúmulo de energia durante o forrageamento é um determinante crítico não apenas para a migração em si, mas também para todo o investimento reprodutivo.

Neste contexto, este trabalho teve como objetivo investigar se os ciclos ENOS afetam indiretamente os comportamentos de baleias-francas-austrais (*Eubalaena australis*) através da variação populacional de krill, e investigar a defasagem temporal desse impacto, caso ele seja encontrado. A métrica utilizada para este fim foi a taxa de comportamentos de alto custo energético, padronizada por tempo de esforço amostral. Dessa forma, hipotetizamos que o padrão de atividade das baleias-francas-austrais é significativamente influenciado por ciclos ENOS (*El Niño* e *La Niña*), seguindo um *time lag* dominante de 4 anos. Se esta hipótese for confirmada, tanto a interação mãe-filhote quanto alguns métodos de defesa estarão sujeitos a flutuações previsíveis. Assim, prevemos que a taxa de comportamentos de alto custo

energético será significativamente menor em anos sob influência do *El Niño* e maior em anos sob influência da *La Niña*, o que será testado pela análise dos *time-lags* curtos e longos. Este estudo se torna de grande importância para a preservação da espécie, pois justifica a necessidade de reforçar a gestão de atividades humanas na zona costeira para proteger uma população vulnerável ao estresse nutricional (KENNEY, 2009; KLINOWSKA, 1991), caso encontrado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 DADOS COMPORTAMENTAIS

O Instituto Australis, responsável pelo Projeto Franca Austral (ProFRANCA¹), disponibilizou os dados de monitoramento terrestre dos anos de 2015-2018 e 2020-2024, das enseadas de Itapirubá Sul e da Ribanceira, em Imbituba-SC, relacionados ao comportamento da baleia-franca-austral utilizados neste trabalho. O ProFRANCA realiza três tipos de monitoramento desta espécie nas enseadas de Santa Catarina: terrestre, embarcado e aéreo. Os dados do monitoramento terrestre têm como objetivo compreender o comportamento e a distribuição das baleias-francas-austrais. As coletas ocorrem diariamente, das 7h às 17h, durante os meses de agosto a novembro. A partir de pontos fixos em terra, os pesquisadores realizam varreduras (*scans*) a cada 30 minutos com o auxílio de binóculos (12x50) para localizar e registrar a posição dos grupos de baleias. Uma vez que um grupo é avistado, inicia-se uma sessão de observação focal com duração de até 50 minutos, no qual um único grupo é observado continuamente. Durante esta sessão, são registradas as frequências de todos os eventos e estados comportamentais de superfície exibidos, como saltos, batidas de cauda, batidas de nadadeira, exposição de cabeça, entre outros (GROCH *et al.*, 2023).

2.2 DADOS SOBRE A DISPONIBILIDADE POPULACIONAL DO KRILL

Como, a principal série temporal de dados sobre a densidade de krill na Geórgia do Sul (FIELDING *et al.*, 2014) foi descontinuada em 2013, não seria possível seu uso para os nossos anos de estudo (2015-2024). Embora tenha encontrado dados de captura de krill mais recentes (OWEN *et al.*, 2024), estes não constituem uma série temporal contínua e padronizada que cubra integralmente o período deste estudo, o que também não permitiu que fossem aplicados nos modelos estatísticos de defasagem temporal, sendo assim, utilizados na

discussão para uma comparação qualitativa com os picos e vales de atividade observados. Dessa forma, optei por usar o Índice Oceânico *Niño* (ENOS), como o principal indicador das condições climáticas que afetam o krill. Assim, foram testados os times *lags* de 1,5 e 4 anos (conforme descrito abaixo).

2.3 ANÁLISE DOS DADOS

Para analisar a influência da variação na disponibilidade de krill sobre a expressão de comportamentos de alto custo energético em baleias-francas-austrais, primeiro padronizei os dados comportamentais, removendo as linhas vazias (sem dados), organizando as ordens das colunas e padronizando a nomenclatura. Para iniciar as análises estatísticas, agrupei os dados das 2 enseadas com o objetivo de obter um único resultado regional.

O número de observações, esforço amostral e frequência de comportamentos variaram muito ao longo dos anos. Assim, para que esses dados fossem utilizados de forma balanceada e padronizada, compensando por estas diferenças, utilizei a taxa de comportamento por tempo de esforço, em que a frequência total de determinado comportamento é dividida pelo tempo de observação acumulado no mesmo período, garantindo que os dados sejam comparáveis, mesmo com uma diferença de esforço amostral ao longo dos anos.

Os anos registrados de aquecimento das águas não coincidem temporalmente com os anos de diminuição visível da abundância de krill, que, por sua vez, também não impactam imediatamente a condição corporal das baleias (LEAPER *et al.*, 2006). Este efeito em cascata ocorre com uma defasagem temporal (*time lag*), que incorporei e testei nos modelos estatísticos. Para uma avaliação mais completa, considere as duas vias citadas na introdução. É preciso considerar que as baleias-francas-austrais possuem um período de gestação de aproximadamente um ano e se alimentam antes de migrarem para as enseadas avaliadas. Assim o comportamento observado nas enseadas, quando elas já se alimentam pouco, irá refletir as condições do seu forrageamento do ano anterior. Dessa forma, para analisar as possíveis influências da variação da disponibilidade de krill sobre o comportamento dessa espécie, adotei um defasagem total de 1,5 ano para as vias rápidas (de 5 a 8 meses), e, para as vias lentas, uma defasagem de 4 anos, contados a partir do último mês de um evento climático.

A variável dependente para a análise de variação interanual foi a taxa total anual de atividade, obtida somando as frequências dos cinco comportamentos de alto custo energético (Salto, Batida de cauda, Batida de cabeça, Batida de nadadeira e Rolar) e aplicando a

padronização por tempo de esforço amostral. Os anos de observação foram classificados em categorias de "pico" (alta atividade esperada) e "vale" (baixa atividade esperada), definida antes da análise com base nas premissas oceanográficas do ciclo ENOS e transporte de krill.

Para os "vales" (consequência de uma provável baixa disponibilidade de krill), selecionei os eventos de *El Niño* ocorridos em 2015/2016 e 2018/2019 (NOAA, 2025). Assim, para a defasagem de 1,5 anos (Modelo 1 - Lag curto), as reduções comportamentais eram esperadas para os anos de 2018 e 2021. Já para a defasagem de 4 anos (Modelo 2 - Lag longo), os anos de impacto esperados são 2020 e 2023. Para os "picos" (consequência de uma provável alta disponibilidade de krill), considere os eventos de resfriamento (*La Niña*) ocorridos em 2010-2012, 2017-2018 e o início do evento triplo em 2020 (NOAA, 2025). O Modelo 1 (Lag Curto - 1,5 anos) previa picos nos anos de 2017 e 2022. O Modelo 2 (Lag longo - 4 anos) previu aumentos de atividade para os anos de 2015, 2016, 2021 a 2024.

2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para a realização dos testes estatísticos e confecção dos gráficos, utilizei a linguagem R (R CORE TEAM, 2024), executada através do ambiente de desenvolvimento integrado RStudio (POSIT TEAM, 2024).

Para determinar se existiria uma diferença estatística geral na taxa de atividade ao longo dos 9 anos, apliquei o teste de Kruskal-Wallis. Como o resultado indicou uma diferença global significativa ($p < 0,05$), prossegui com o teste de comparações par a par de Wilcoxon (com correção de Bonferroni). Este passo permitiu identificar quais anos específicos apresentaram níveis de atividade estatisticamente distintos entre si.

Para testar se o padrão de atividade é influenciado pelos eventos climáticos, os anos foram classificados como "Normais" (sem impacto previsto) e "Pós-Impacto" (englobando tanto os picos quanto os vales previstos). As taxas de comportamentos de alto custo energético destes dois grupos foram comparadas utilizando o Teste de Wilcoxon-Mann-Whitney (unilateral). Este teste é não-paramétrico e foi escolhido por ser robusto para comparar as medianas dos dois grupos. Com uma hipótese direcional, ou seja, prevíamos que o "pós-impacto" teria uma taxa de atividade diferente (maior ou menor) em relação ao "normal", optamos pela modalidade unilateral.

3. RESULTADOS

A análise de variação interanual na taxa de atividade de alto custo por tempo de esforço (Figura 1) revelou um padrão de flutuação interanual distinto ao longo dos 10 anos de observação, com evidente oscilação nas taxas de atividade.

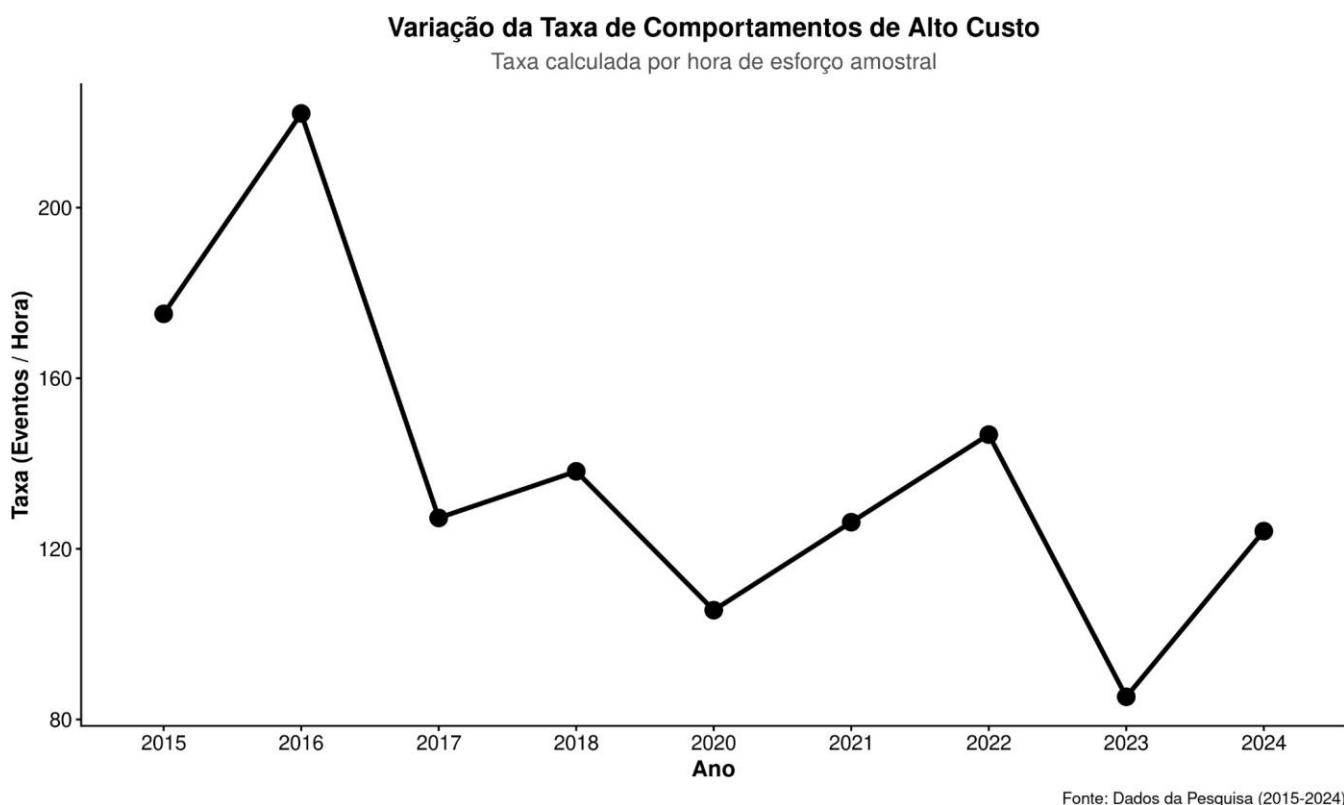


Figura 1. Variação anual da taxa de comportamentos de alto custo energético por baleias-francas-austrais na região costeira de Santa Catarina (Brasil) entre 2015 e 2024. A taxa é expressa em eventos por hora de esforço amostral, representando a frequência total dos cinco comportamentos de interesse (BC, BCB, BOR, BP, BUP e EC) dividida pelo tempo acumulado de observação em cada ano.

O teste de Kruskal-Wallis confirmou que essa variação ao longo dos anos é estatisticamente significativa ($H = 46.8$, $p < 0.001$). Para identificar quais anos diferiram entre si, os testes *post-hoc* de comparações múltiplas (Wilcoxon pareado, com correção de Bonferroni) indicaram que os anos classificados como "vales" (especialmente 2023) apresentaram taxas de atividade significativamente inferiores à maioria dos outros anos (Tabela 1).

Comparação (Par de Anos)	Valor-p Ajustado (p.adj)	Resultado
2016 vs 2023	< 0.001*	Significativo
2015 vs 2023	< 0.001*	Significativo
2016 vs 2017	0.0383 *	Significativo
2018 vs 2023	0.0018*	Significativo
2021 vs 2023	0.0044 *	Significativo
2022 vs 2023	0.0152*	Significativo

Tabela 1: Resultados das comparações múltiplas entre as taxas anuais de comportamento de alto custo energético de baleias-francas-austrais na costa de Santa Catarina (2015–2024), obtidos pelo teste **Wilcoxon** pareado com correção de Bonferroni. **Nota:** O símbolo (*) indica diferença estatística significativa ($p < 0,05$). Apenas os pares de anos que apresentaram diferença significativa foram listados; os demais pares não apresentaram diferenças estatísticas.

A análise para testar as defasagens temporais revelou que o Modelo 1 (Lag curto - 1,5 ano), que testava a hipótese da via oceânica rápida, não apresentou diferença estatisticamente significativa na taxa de atividade entre os grupos de anos previstos para impacto e os anos normais (Teste de Wilcoxon-Mann-Whitney, $W = 4850$, $p = 0.42$). Este resultado levou à invalidação da defasagem de 1,5 ano como preditora do comportamento de alto custo.

Em contrapartida, para a hipótese do *El Niño* (redução de atividade), o Modelo de Lag Longo revelou-se significativo ($W = 2093,5$; $p < 0.0001$). Os anos de 2020 e 2023, ocorridos quatro anos após os eventos de aquecimento, apresentaram taxas de atividades menores que os anos considerados normais.

Simultaneamente, a hipótese da *La Niña* (aumento da atividade) também foi confirmada. O grupo dos anos influenciados pela produtividade de 4 anos anteriores (2015, 2016, 2021, 2022 e 2024) apresentou taxas de atividade significativamente maiores aos demais anos tomados em conjunto ($W = 4599,5$; $p < 0.001$). Este resultado valida o modelo de lag longo, englobando os reflexos dos eventos de 2010-2012, 2017-2018 e ao início do evento de 2020.

4. DISCUSSÃO

Era esperado que em anos após eventos climáticos do ciclo ENOS os indivíduos de baleia-franca-austral apresentassem menos comportamentos de alto custo após uma defasagem temporal que fizesse sentido biológico, devido a influência desses fenômenos na disponibilidade de krill. Com a análise de variação interanual, o Modelo de Lag longo (4 anos) foi validado para região sul do Brasil, corroborando a influência dos ciclos ENOS no modo de vida desses indivíduos. Para que este sinal biológico fosse isolado da variação no

esforço de amostragem, foi necessário utilizar a taxa de comportamento por tempo de esforço, com essa padronização foi possível detectar influência climática de forma confiável.

O sucesso do Modelo de Lag longo se alinha com a literatura da “via oceânica lenta” (TRATHAN & MURPHY, 2003), descritas anteriormente. Essa defasagem representa o tempo necessário para que as anomalias de temperatura do Oceano Pacífico se propaguem e impactem a produção de krill no Oceano Antártico e no forrageio das baleias-francas-austrais. Embora a Plataforma Patagônica também seja utilizada como área de alimentação suplementar (DAVIS *et al.*, 2020), a forte validação do Lag Longo sugere que a produtividade do krill antártico é o fator determinante para a alocação energética necessária ao ciclo reprodutivo trienal (GROCH *et al.*, 2023).

Em contrapartida, o Modelo 1 (Lag Curto de 1,5 ano), que testava a hipótese da via oceânica rápida e dos impactos imediatos, não foi validado nas análises de variação interanual. Essa ausência de significância sugere que, embora o sinal climático possa se propagar rapidamente (em 5 a 8 meses), o tempo pode ser insuficiente para gerar uma mudança na disponibilidade de krill na área de alimentação de magnitude tal que altere drasticamente as reservas energéticas da baleia-franca-austral, ou que essa propagação resulte em um efeito menos intenso e crônico que não atinge o limiar de detecção no comportamento reprodutivo da espécie.

A não validação do Lag Curto, portanto, reforça a importância da defasagem de 4 anos como importante fator influenciando a alocação energética das fêmeas. A falha do modelo rápido indica que a condição corporal das fêmeas, que é o que determina a expressão de comportamentos de alto custo na enseada (como um reflexo do sucesso reprodutivo), está intrinsecamente ligada à produtividade do krill Antártico e à via lenta de propagação oceanográfica. Ou seja, apenas o acúmulo de energia resultante de condições favoráveis ou desfavoráveis resultante de fenômenos climáticos após um longo prazo de defasagem temporal (4 anos) é capaz de gerar um sinal biológico visível no comportamento reprodutivo e parental da espécie.

As análises demonstram que os fenômenos do *El Niño* e da *La Niña* são processos complementares, e que operam sob o mesmo *time lag* de 4 anos. A hipótese da redução de atividade de comportamentos de alto custo energético (*El Niño*) foi confirmada com os anos de 2020 e 2023, se alinhando com os 4 anos de defasagem esperados após os anos dos eventos de aquecimento (2015/2016 e 2018/2019). A queda nos comportamentos de alto custo pode ser interpretada como uma estratégia de reserva energética, em que os indivíduos em má condição corporal priorizam funções essenciais, como, no caso das mães, a

amamentação.

Essa interpretação encontra paralelos com outros estudos, como nos trabalhos de Vermeulen *et al.* (2019; 2023). A pesquisa desses autores iniciou com um censo aéreo realizado em 2018, na África do Sul. O relatório técnico deste censo (VERMEULEN *et al.*, 2019) documentou a má condição corporal das fêmeas reprodutoras e seus impactos diretos (menor taxa de natalidade e maiores intervalos de gestação). Para investigar a causa dessa deterioração, os mesmos autores publicaram uma análise mais detalhada (VERMEULEN *et al.*, 2023), que demonstrou que o declínio acentuado na condição corporal observado em 2018 era uma consequência direta do baixo sucesso de forrageamento ocorrido quatro anos antes, após o evento *El Niño* de 2015/2016.

Além disso, a hipótese do aumento de atividades de alto custo energético causados pela *La Niña* também foi validada, já que o grupo de anos influenciados por essa anomalia com uma defasagem temporal de 4 anos (2015, 2016, 2021, 2022 e 2024) apresentou taxas de atividade superiores aos outros anos. Ao separar e validar ambos fenômenos, é possível concluir que o *El Niño* cria "vales" e a *La Niña* "cria" os picos de atividade, e ambos são previsíveis por meio de um *time lag* de 4 anos. O teste de *post-hoc* (Tabela 1) reforça essa conclusão, demonstrando que o vale extremo (2023) é diferente estatisticamente de todos os anos de pico, validando que a redução da atividade é um evento significativo e distinto das flutuações anuais normais.

Portanto, o modelo de lag longo, estabelece uma capacidade preditiva para os próximos ciclos de monitoramento. A validação do *time lag* de 4 anos permite antecipar que eventos de *El Niño* resultarão em baleias com menores condições corporais na costa catarinense 4 anos após o evento. Neste sentido, e aplicando o modelo ao cenário climático recente (*El Niño* finalizado em 2024, conforme NOAA), projeta-se que o próximo período de "vale", com redução na taxa de atividades de alto custo, ocorrerá na temporada de reprodução de 2028, após 4 anos de picos esperados (2024-2027), causados pela *La Niña* prolongada de 2020 a 2023. Este vale deverá se seguir por novo pico, em 2029, devido a uma nova *La Niña*, iniciada em setembro de 2025 (NOAA, 2025). Essa capacidade preditiva é vital para a Gestão da Área de Proteção Ambiental (APA) da Baleia Franca, permitindo o direcionamento de esforços de fiscalização e proteção nos momentos em que a população se encontra mais vulnerável ao estresse nutricional, reforçando a importância do monitoramento climático para a conservação marinha.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho buscou investigar como os ciclos ENOS afetam indiretamente os comportamentos dos indivíduos de baleia-franca-austral através das alterações na disponibilidade de krill. Ao confirmar uma defasagem temporal de 4 anos (modelo de lag longo), foi possível afirmar que essas anomalias na temperatura do mar são capazes de alterar as taxas de comportamentos de alto custo dessa espécie, devido provavelmente a uma baixa condição corporal e de reserva energética.

REFERÊNCIAS

- ATKINSON, A. et al. Long-term decline in krill stock and increase in salps within the Southern Ocean. **Nature**, v. 432, p. 100-103, 2004.
- BEST, P. B. Seasonality of reproduction and the length of gestation in southern right whales *Eubalaena australis*. **Journal of Zoology**, v. 232, p. 175-189, 1994.
- BEST, P.; MATE, B. Coastal and offshore movements of southern right whales on the South African coast revealed by satellite telemetry. In: **MEETING OF THE INTERNATIONAL WHALING COMMISSION**, 60., 2008. *Anais...* [S.l.: s.n.], 2008.
- CHILDERHOUSE, S.; DOUBLE, M. C.; GALES, N. Satellite tracking of southern right whales (*Eubalaena australis*) at the Auckland Islands, New Zealand. **IWC Scientific Committee**, SC/62/BRG19, 2010.
- CHRISTIANSEN, F. et al. Energy expenditure of southern right whales varies with body size, reproductive state and activity level. **Journal of Experimental Biology**, v. 223, n. 5, 2023.
- CUMMINGS, W. C. Right Whales, *Eubalaena glacialis* (Muller, 1776) and *Eubalaena australis* (Desmoulins, 1822). In: RIDWAY, S. H.; HARRISON, R. (eds.). **Handbook of Marine Mammals**. Volume 3: The Sirenians and Baleen Whales. [S.l.]: Academic Press, 1985. p. 275-304.
- DAVIS, R. P. et al. Southern right whale foraging movements in the South-west Atlantic Ocean: an acoustic and satellite tracking study. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, v. 523, p. 151276, 2020.
- EVANS, P. G. H. Morphometrics and growth of right whales. In: BROWNELL JR., R. L. BEST, P. B.; PRESCOTT, J. H. (Ed.). **The Right Whales: The Right Whale to Save**. [S.l.]: [s.n.], 1987. p. 3-6. (Referência corrigida como Capítulo de Livro).
- FIELDING, S. et al. Interannual variability in Antarctic krill (*Euphausia superba*) density at South Georgia, Southern Ocean: 1997–2013. **ICES Journal of Marine Science**, v. 71, n. 9, p. 2578-2588, 2014.
- GERMSHUIZEN, M.; VICHI, M.; VERMEULEN, E. Population changes in a Southern Ocean krill predator point towards regional Antarctic sea ice declines. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 25820, 2024.
- GROCH, K. R. et al. **Apostila Programa de Estágio/Voluntariado**. Imbituba: ProFRANCA, 2023. p. 7-84.
- HILL, S. L. et al. Potential Climate Change Effects on the Habitat of Antarctic Krill in the Weddell Quadrant of the Southern Ocean. **PLOS ONE**, v. 8, n. 7, 2013.
- HOFFMEYER, M. S. et al. Planktonic food and foraging of *Eubalaena australis*, on Peninsula Valdés (Argentina) nursery ground. **Revista de Biología Marina y Oceanografía**, v. 45, n. 1, p. 131-139, 2010.

KENNEY, R. D. Right Whales *Eubalaena glacialis*, *E. japonica*, and *E. australis*. In: PERRIN, W. F. et al. (eds.). **Encyclopedia of Marine Mammals**. [S.l.]: Academic Press, 2009. p. 962-972.

KLINOWSKA, M. **Dolphins, porpoises and whales of the world**. The IUCN Red Data Book. Gland, Switzerland; Cambridge, U.K.: IUCN, 1991.

LEAPER, R. et al. Global climate drives southern right whale (*Eubalaena australis*) population dynamics. **Biology Letters**, v. 2, n. 2, p. 289-292, 2006.

LIN, Y. et al. Predicted changes in the distribution of Antarctic krill in the Cosmonaut Sea under future climate change scenarios. **Global Change Biology**, v. 28, n. 4, p. 1326-1342, 2022.

LOCKYER, C. Body weights of the Southern Right Whale *Eubalaena australis*. **Report of the International Whaling Commission (Special Issue 10)**, p. 241-267, 1986.

MALHI, Y.; PHILLIPS, O. L. Global climate change: The role of the Amazon rainforest. **Nature**, v. 439, p. 321-328, 2006.

MARRARI, M. E. et al. ENSO impacts on zooplankton community structure in the seasonal ice zone: The Antarctic Peninsula. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 55, n. 3-4, p. 325-338, 2008.

MEREDITH, M. P. et al. On the interannual variability of ocean temperatures around South Georgia, Southern Ocean: forcing by El Niño/Southern Oscillation and the Southern Annular Mode. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 51, n. 12-13, p. 1435-1454, 2004.

MEYER, B. et al. Penguins and Seals Transport Limiting Nutrients Between Offshore Pelagic and Coastal Regions of Antarctica Under Changing Sea Ice. **Frontiers in Marine Science**, v. 7, 2020.

MOSCATO, F. et al. Improving performances of biomimetic wings with leading-edge tubercles. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 2384, n. 1, p. 012028, 2022.

MURPHY, E. J. et al. Climatically driven fluctuations in Southern Ocean ecosystems. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 274, n. 1629, p. 3057-3067, 2007.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). **Cold & Warm Episodes by Season**. College Park, MD: Climate Prediction Center, 2025. Disponível em: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml. Acesso em: 7 out. 2025.

OWEN, K. A. et al. At-sea distribution of marine predators around South Georgia during austral winter, with implications for fisheries management. **Polar Biology**, v. 47, p. 663-679, 2024.

PATENAUDE, N. J. **Demographic and genetic status of right whales at the Auckland Islands, New Zealand**. 2002. Tese (Doutorado) - University of Auckland, Auckland, 2002.

POSIT TEAM. **RStudio: Integrated Development Environment for R**. Boston, MA: Posit Software, PBC, 2024. Disponível em: <http://www.posit.co/>. Acesso em: [INSERIR DATA DE ACESSO] (Obrigatório pela ABNT).

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: [INSERIR DATA DE ACESSO] (Obrigatório pela ABNT).

REID, K. et al. Population changes in a Southern Ocean krill predator point towards regional Antarctic sea ice declines. **Global Change Biology**, v. 27, n. 17, p. 4024-4037, 2021.

ROWNTREE, V. et al. Foraging behaviour of southern right whales (*Eubalaena australis*) inferred from variation of carbon stable isotope ratios in their baleen. **SC/60/BRG23 presented to the IWC Scientific Committee, Santiago, Chile**, 2008.

SEGRE, P. S. et al. Energetic and physical limitations on the breaching performance of large whales. **Royal Society Open Science**, v. 7, n. 9, 2020.

SEYBOTH, E. et al. Southern Right Whale (*Eubalaena australis*) Reproductive Success is Influenced by Krill (*Euphausia superba*) Density and Climate. **Scientific Reports**, v. 6, p. 28205, 2016.

SPITZ, J. et al. Cost of Living Dictates what Whales, Dolphins and Porpoises Eat: The Importance of Prey Quality on Predator Foraging Strategies. **PLOS ONE**, v. 7, n. 11, p. e50096, 2012.

THOMAS, P. O.; TABER, S. M. Mother-infant interaction and behavioral development in southern right whales, *Eubalaena australis*. **Behaviour**, v. 88, n. 1/2, p. 42-60, 1984.

TRATHAN, P. N. et al. Enhancing the ecosystem approach for the fishery for Antarctic krill within the complex, variable, and changing ecosystem at South Georgia. **ICES Journal of Marine Science**, v. 78, n. 6, p. 2065-2080, 2021.

TRATHAN, P. N.; MURPHY, E. J. Sea surface temperature anomalies near South Georgia: Relationships with the Pacific El Niño regions. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 108, n. C4, p. 8075, 2003.

TRENBERTH, K. E. The definition of el nino. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 12, p. 2771-2778, 1997.

VERMEULEN, E. et al. Decadal decline in maternal body condition of a Southern Ocean capital breeder. **Scientific Reports**, v. 13, 3228, p. 1-12, 2023.

VERMEULEN, E.; WILKINSON, C.; THORNTON, M. **Report of the 2018 South African southern right whale aerial surveys**. Technical Report. Mammal Research Institute Whale Unit, University of Pretoria, 2019.

WHITEHEAD, H.; PAYNE, R. New techniques for measuring whales from the air. **Report to the US Marine Mammal Commission, MMC-76/22**. 36 p., 1981.

WING, S. R. et al. Penguins and seals transport limiting nutrients between offshore pelagic and coastal regions of Antarctica under changing sea ice. **Ecosystems**, v. 24, n. 5, p. 1203-1221, 2021.