



DESOXIGENAÇÃO OCEÂNICA: AVALIAÇÃO DE PROJEÇÕES FÍSICO-QUÍMICAS E IMPACTOS ECOLÓGICOS A PARTIR DE MODELAGEM OCEANOGRÁFICA

Théo L. Rabelo¹; Augusto Stürmer Ferrarese¹; Paola Del Vecchio¹.

*1. Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Vieira da Cunha.
23000012@liberato.com.br*

Palavras-Chave: Simulações, hipóxia, Python.

Introdução

A dissolução de gases em líquidos é descrita essencialmente pela lei de Henry, formulada em 1803. Todavia, a determinação da concentração de saturação não é, por si só, suficiente para descrever a dinâmica do oxigênio dissolvido no oceano. O fluxo efetivo desse gás - isto é, sua taxa real de dissolução e redistribuição - depende de processos adicionais que o equilíbrio termodinâmico, sozinho, é incapaz de considerar, incluindo advecção por correntes marítimas, trocas gasosas mediadas por turbulência na interface ar-mar, difusão e produção e consumo biológico no interior da coluna d'água (DEUTSCH et al., 2011). Esses mecanismos atuam de forma acoplada e em múltiplas escalas espaciais e temporais. Nesse contexto, para uma representação formal da dinâmica, torna-se necessário integrar as formulações físico-químicas clássicas a modelos dinâmicos capazes de representar a variabilidade ambiental, permitindo uma descrição mais realista da distribuição de oxigênio dissolvido em sistemas oceânicos. A própria dificuldade na contabilização de tantas variáveis, por si só, já reforça a validade de diferentes modelos e formas de interpretação de dados, como argumentam Matear e Hirst (2003):

As grandes diferenças na resposta da circulação às mudanças climáticas dominam a diferença na redução global de oxigênio até 2100 prevista por essas simulações. [...] O desenvolvimento de conjuntos de dados para avaliar as mudanças previstas na intensidade da circulação de retorno é essencial para gerar confiança nas previsões futuras (MATEAR; HIRST, 2003).

No entanto, não se limitando a motivações puramente teóricas, o projeto foi escolhido visando o conhecimento dos impactos do aquecimento oceânico no Mar Territorial Brasileiro no que diz respeito à dissolução e ao fluxo de oxigênio. O nível de O_2 na água é um dos principais indicadores de qualidade marinha, pois tal parâmetro está presente em quase todos os processos químicos e biológicos d'água, sendo essencial para a sobrevivência da maioria dos organismos marinhos (MATEAR; HIRST, 2003). A questão ganha ainda mais importância ao recordar-se de que uma desoxigenação relevante ocorreu nos últimos 50 anos em oceanos tropicais e existe a tendência de que se intensifique por séculos, resultando em prejuízos



ecológicos e econômicos (KEELING; KÖRTZINGER; GRUBER, 2010). Ainda de acordo com Keeling, Körtzinger e Gruber (2010), regiões costeiras são particularmente vulneráveis, pois concentram elevada produtividade biológica e sofrem influência simultânea de fatores físicos, químicos e antrópicos. No entanto, apesar da relevância e da familiaridade com a situação problema, ainda existem lacunas na compreensão integrada dos mecanismos que controlam a distribuição e o consumo de oxigênio dissolvido, especialmente em níveis regionais onde há carência de dados precisos (BREITBURG et al., 2018), como no litoral brasileiro.

Matear, Hirst e Mcneil (2000) já demonstraram a possibilidade de utilização conjunta de programas de circulação oceânica e de processos físico-químicos em nível regional para o Ártico. Ademais, Pereira (2012) apresentou opções de interpretação para as diferentes concentrações de oxigênio em estuários ao longo do Brasil - caracterizados como ecossistemas costeiros de menor escala, mas com grande complexidade-, evidenciando os fatores hidrodinâmicos e biogeoquímicos majoritariamente responsáveis. Considerando o exposto, torna-se pertinente a adoção de abordagens baseadas em modelagem integrada, testando-se diferentes representações em conjunto a interpolações coerentes ao espaço de estudo - devido à grande diversidade do litoral brasileiro (OLIVEIRA et al., 2002).

Outro ponto é a linguagem de programação a ser utilizada. Considera-se mais adequado para os devidos fins o emprego de Python como código fonte. Este tem se consolidado na literatura científica como meio de tratamento eficaz para grandes blocos de dados (MILLMAN; AIVAZIS, 2011), a exemplo deste projeto. Neste contexto, o uso de Python possibilita maior reprodutibilidade, flexibilidade metodológica e precisão na simulação de diferentes processos simultâneos (HARRIS et al., 2020). Por meio de bibliotecas como NumPy e Pandas, aumenta-se a capacidade de análise, visualização e manipulação de dados multidimensionais (HARRIS et al., 2020; MCKINNEY, 2010), relevantes para uma modelagem oceanógrafa.

Assim, a presente pesquisa caracteriza como problema a seguinte questão:

“É possível, através de modelagem matemático computacional, correlacionar o aumento global de temperatura e outras variáveis ambientais visando o desenvolvimento de um software de predição e quantificação do oxigênio dissolvido no oceano ao longo do litoral brasileiro?”

Ao passo que toma por objetivo o desenvolvimento de um software, em Python, capaz de quantificar e prever as variações na concentração de oxigênio na costa brasileira, baseando-se na integração de variáveis físico-químicas, físicas, biogeoquímicas e espaciais.

Material e Métodos

A metodologia baseou-se na consideração do máximo de efeitos interferentes no oxigênio. Porém, não há uma única referência com a abrangência e a resolução suficientes para realizar as previsões propostas. Assim, foi necessário partir de dois modelos que, combinados, pudessem fazer a análise desejada. São eles o GLORYS12V1 (COPERNICUS MARINE SERVICE, 2024) e o CESM2 em SSP245 (HAMM et al., 2020). A pesquisa foi fragmentada em advecção, difusão, troca ar-mar e bioquímica, como apresenta-se respectivamente.



São utilizados dados de velocidades de massas de água do GLORYS12V1, para uma reconstrução histórica do oceano. Posteriormente, calculam-se operadores para descrever como anomalias climáticas anuais de larga escala afetam cada uma dessas células, utilizando regressões lineares matriciais com multiplicadores lagrangeanos. É feita, então, uma extrapolação até o ano de 2100, utilizando janelas móveis de 8 anos. Segue-se a utilização de dados do CESM2-WACCM para uma extrapolação até o ano de 2100 das velocidades. Escreve-se, por último, um código de sistema de troca advectiva por faces de células adjacentes.

São usados os coeficientes de difusão turbulenta isopícnais e diapícnais, já projetados anualmente até 2100, oriundos do CESM2. Aplica-se, utilizando a equação de viscosidade turbulenta de Smagorinsky (1963) e o número de Schmidt turbulento, a conversão dos coeficientes para a grade do GLORYS12V1. As variáveis de taxa de deformação e malha são obtidas da etapa advectiva. Traçam-se os vetores isopícnais a partir da densidade potencial de cada célula do GLORYS12V1, calculada com temperaturas e salinidades do próprio modelo e recebendo adições de variações das respectivas células do CESM2. Constrói-se então, um sistema de troca difusiva análogo ao anterior, mas com trocas através de arestas também, permitindo tratar superfícies isopícnais inclinadas.

A troca gasosa foi representada conforme Wanninkhof, (1992). Ao passo que a concentração de saturação de oxigênio foi parametrizada conforme Garcia e Gordon (1992). Velocidades de ventos a 10 metros da superfície d'água, utilizadas na primeira representação, originam-se do ERA5 (módulo do GORYS12V1). O trabalho com essas variáveis segue lógica análoga às de massas de água.

Foi considerada a produção de oxigênio inteiramente da fotossíntese, ao passo que o consumo se deu por respiração celular e nitrificação. Foi utilizada a variação de fósforo inorgânico dissolvido devido a processos bioquímicos para estimar os deltas de oxigênio na fabricação e quebra de matéria orgânica, com proporções estequiométricas variáveis por localidade, conforme Tanioka et al. (2022). Para a nitrificação, precisou-se resolver o ciclo do nitrato em uma equação de advecção-difusão-reação, onde consideraram-se também os fenômenos de desnitrificação, troca bentônica e assimilação do composto. Os resultados que se encontravam na grade do CESM2 foram interpolados para a do GLORYS12V1 assumindo-se continuidade espacial suficiente.

Resultados e Discussão

A reconstrução histórica e a projeção das correntes oceânicas exigiram o tratamento de aproximadamente 100 GB de dados em arquivos NetCDF, dos acervos Copernicus Marine Service e Pangeo. Na inspeção de arquivos, constatou-se incompatibilidade entre divisões espaciais, ordenamento de dados e nomenclatura. A correção contou com conversão de coordenadas e associação por pertencimento de células do GLORY 12V1 a uma macro-célula do CESM2. Devido ao processamento massivo, decidiu-se recortar a região geográfica de estudo ao sul do Brasil, entre as longitudes de 58°O e 45°O e as latitudes de 36°S e 22°S, , profundidade limite de 500m. Cada ponto da grade GLORYS12V1 (7.185 pontos na área de



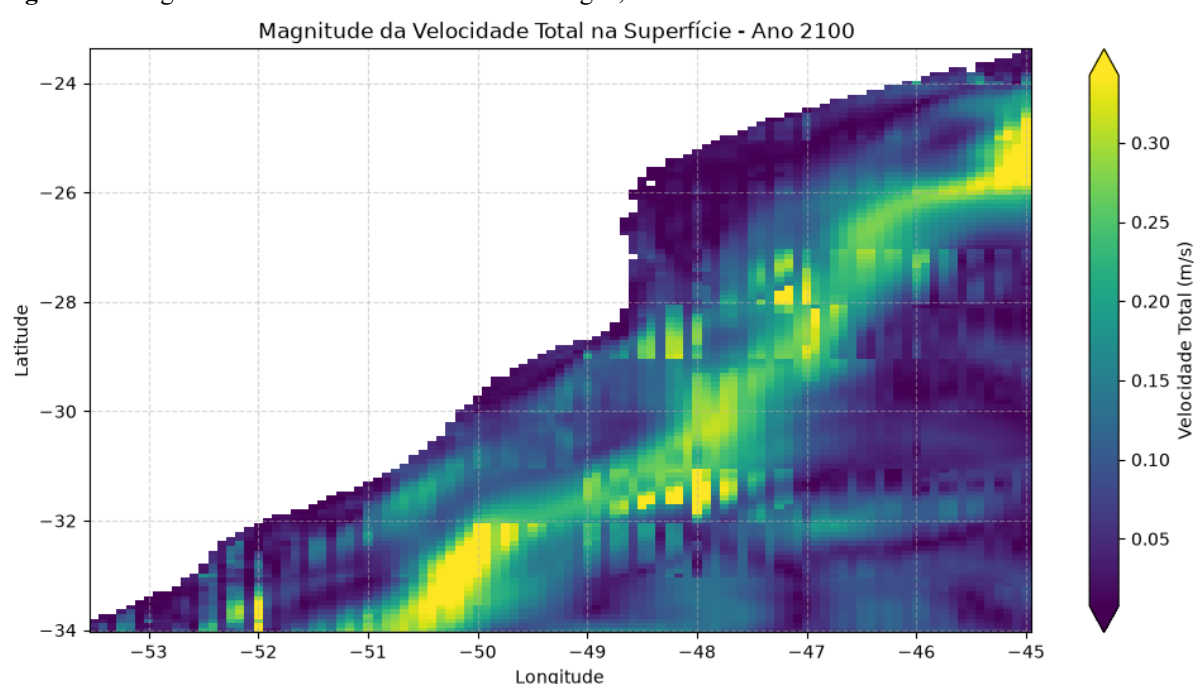
estudo) foi testado às fronteiras definidas. O resultado foi um mapeamento onde cada célula do CESM2 atua como “agregador” para aproximadamente 124 sub-células de alta resolução. O código fora escrito exigindo compreensão total de ambos domínios, resultando em erros de fronteiras pelo não uso de máscaras de terra do CESM2. Após correção por espelhamento de NaN do GLORYS12V1, o modelo híbrido contou com 96 mil células. No cálculo de velocidades horizontais das macro-células com “uo” e “vo” do GLORYS12V1 foi considerada a conservação da quantidade de movimento baseada no volume das células (densidade assumida constante por células em mesma profundidade). Com isso, calcularam-se os operadores de transferência para todo domínio temporal disponível (1993 até 2025). Em teste de janela temporal móvel para regressão, o ótimo correspondeu a 8 anos. O teste de uso de intercepto na função mostrou-se ineficiente. Ressalta-se a necessidade do último, considerando multiplicadores lagrangeanos apenas no coeficiente angular das funções. O parâmetro de regressão foi calibrado no ótimo de 1. A decomposição dos operadores indicou predominância dos termos de influência direta, responsáveis por 84,31% da variabilidade, enquanto os termos de acoplamento responderam pelos 15,69% restantes. Cerca de 83% dos operadores apresentaram R^2 superior a 0,3 no domínio, sendo mais de 41% superiores a 0,7. Calculou-se a norma de Frobenius média para verificar convergência à matriz identidade, resultando em 0,2953.

A segunda regressão linear para avaliação da evolução temporal dos operadores apresentou RMSE médio em “uo” e “vo” de 0,0462 e 0,0563 m/s, respectivamente (convertido pela magnitude das componentes velocidade médias). Nos testes de correspondência de erros, obteve-se mediana de 1.96 com Durbin-Watson e 0,45 com Ljung-Box, indicando forte independência. Assim, para média de 30 anos, conforme padrão oceanográfico de mudanças climáticas, ambos RMSE localizaram-se próximos a 1 cm/s. Ressalta-se que fora testado o uso de regressões simbólicas em lugar de lineares. Todavia, pelo tempo de execução médio de 2,5 minutos por célula, com 20 combinações em notebook com 12Gb de RAM, a pesquisa limitou-se aos resultados anteriores. Nesse contexto, uma alternativa foi a aplicação de limitantes físicos em cada anomalia temporal anual sobre as velocidades históricas. A estrutura combinou quatro critérios. O primeiro foi o limitante de proximidade da costa, baseado na relação com a plataforma continental, restringindo respostas espúrias em regiões sensíveis à extrapolação estatística. O segundo ponderou o operador pelo R^2 , reduzindo a influência daqueles com menor capacidade explicativa. Os demais atuaram sobre a evolução das correntes: o limitante angular restringiu alterações excessivas na direção do vetor velocidade, enquanto o limitante de intensidade controlou variações desproporcionais em sua magnitude. Assim, as informações estatísticas dos operadores foram mantidas sob restrições físicas. Quando esses limitantes removiam intensidade de fluxo, esta era redistribuída para células receptoras, preservando a conservação mássica. A mediana redistribuída das anomalias totais por célula foi próxima a 10%. Por outro lado, as velocidades verticais tiveram trabalho simples, devido à correspondência de níveis (variação de profundidade entre variáveis sempre inferior a 5m para os primeiros 100m

de coluna de água e maior distinção inferior a 30m, próxima aos 500m de profundidade). Como definição de níveis, escolheu-se o do GLORYS12V1, padronizando a localização das células anteriores e interpolando-se linearmente as velocidades projetadas até 2100 dos 33 níveis do CESM2.

Apresenta-se, para visualização, o mapa gerado (Figura 1) do módulo das velocidades de massas água para o ano de 2100, na superfície:

Figura 1 – Magnitude das velocidades de massas de água, 2100.

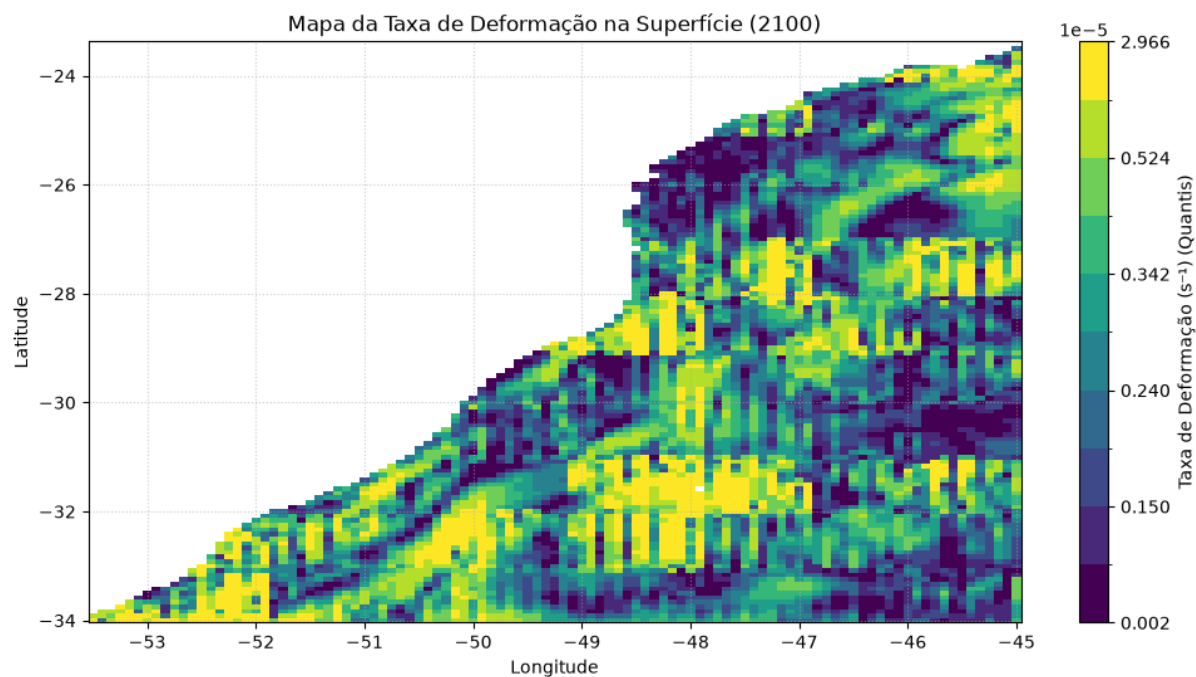


Fonte: O Autor (2026).

A etapa anterior já fornecia variáveis necessárias para cálculo do tensor taxa de deformação e da escala de comprimento de filtro. Apresentam-se os respectivos mapas gerados (Figura 2 e Figura 3):

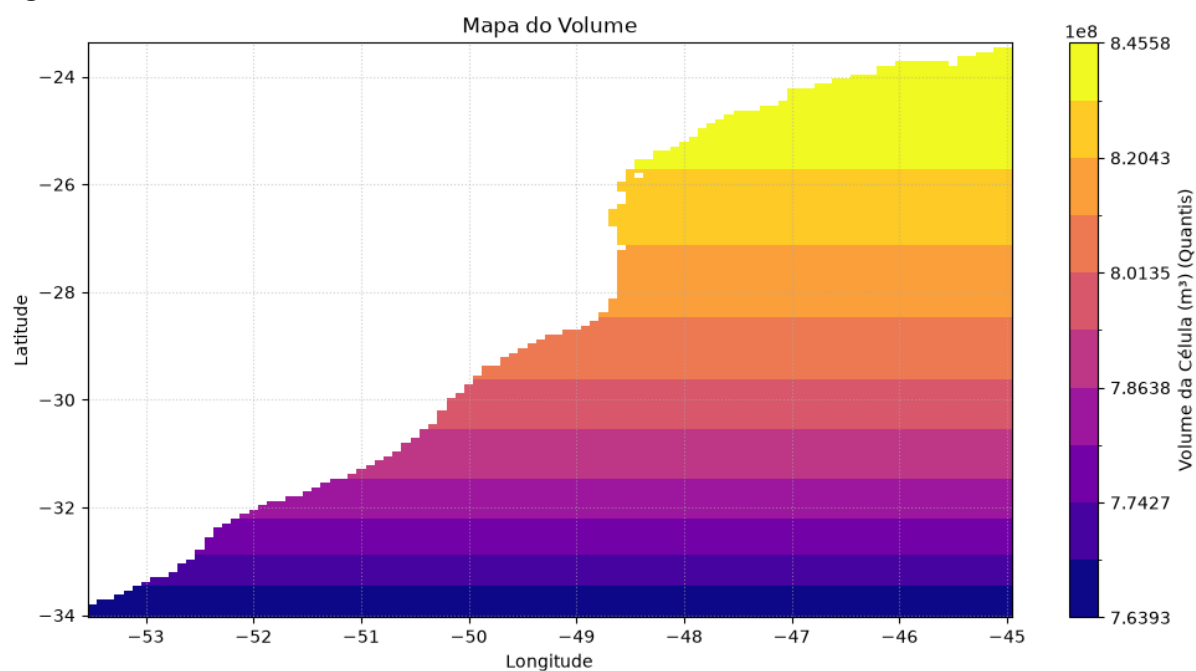


Figura 2 – Taxa de deformação.



Fonte: O Autor (2026).

Figura 3 – Volume de células.

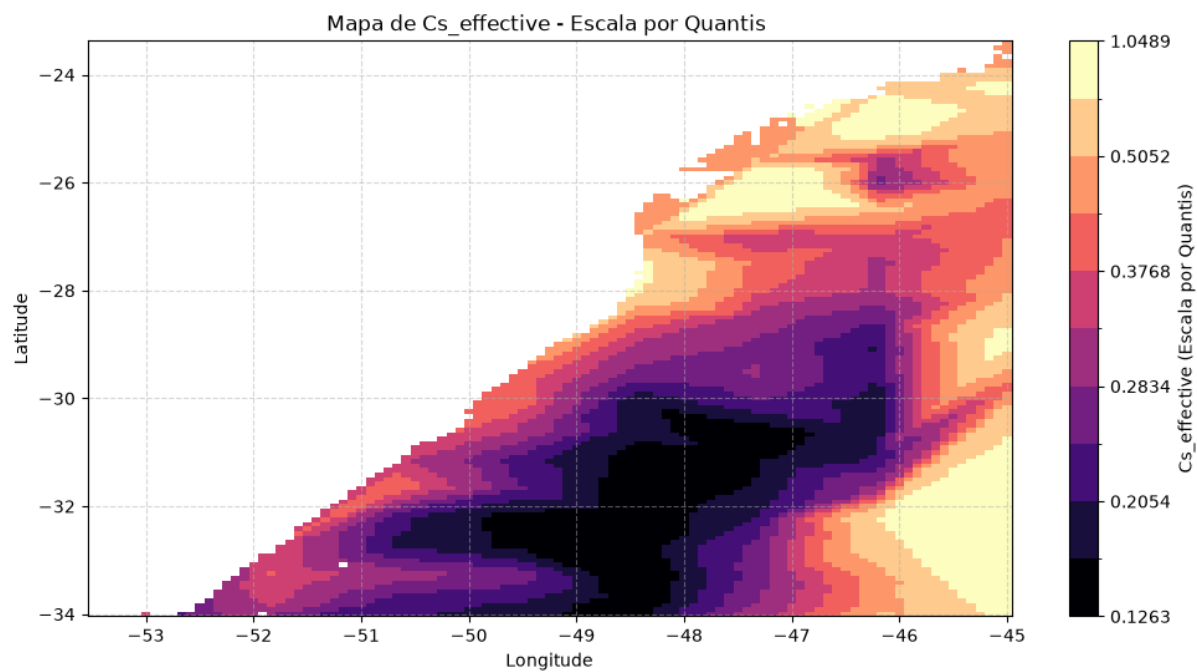


Fonte: O Autor (2026).

Os resultados obtidos da razão entre a constante de Smagorinsky e o número de Schmidt turbulento são os seguintes, para superfície do ano de 2026 (Figura 4):



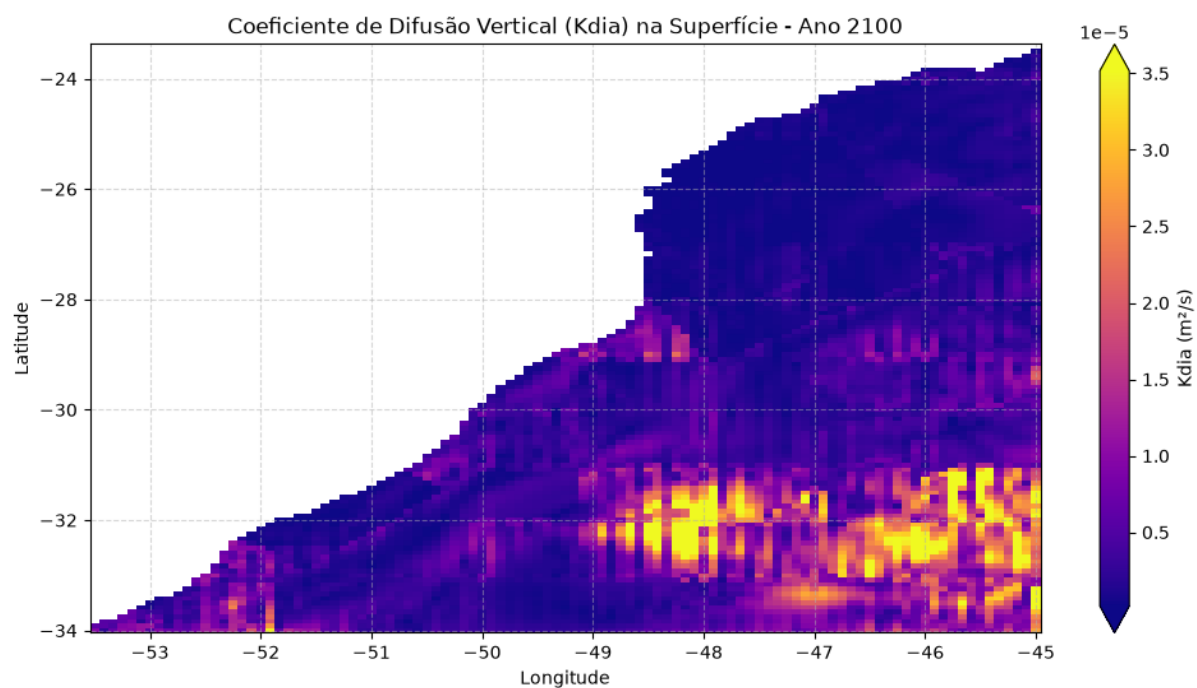
Figura 4 – Razão entre Cs e Sc, 2026.



Fonte: O Autor (2026).

Tais dados foram usados para a construção dos coeficientes isopícnais e diapícnais de difusão, que se apresentam, analogamente:

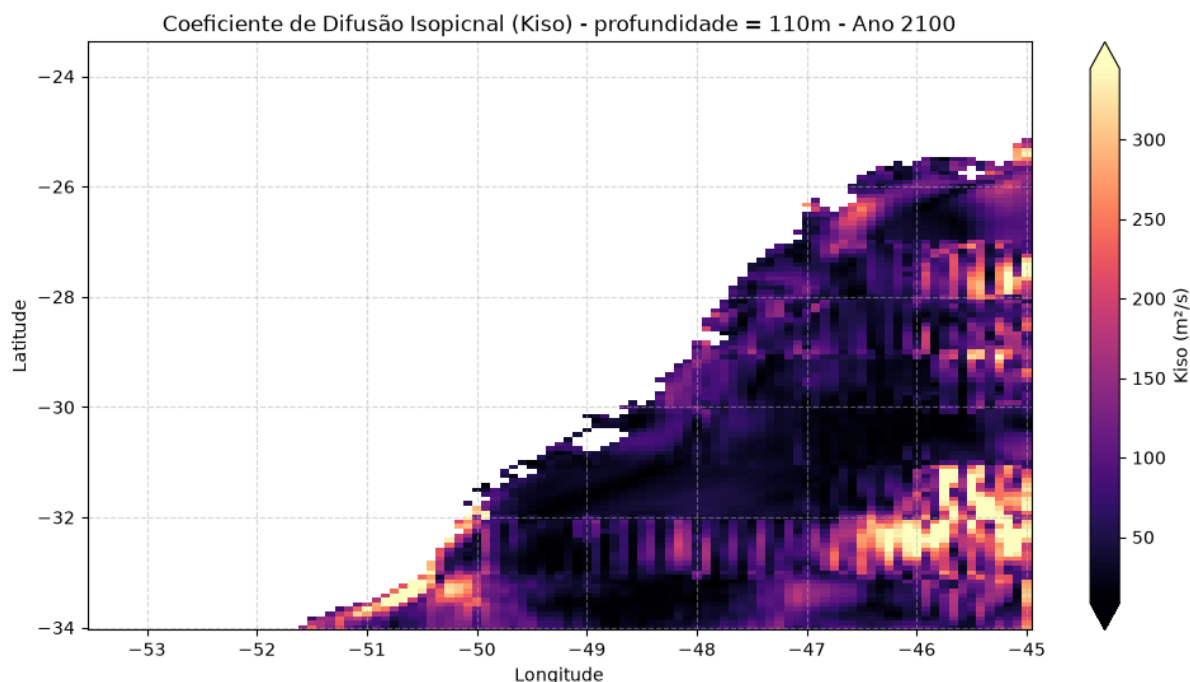
Figura 5 – K_{dia} , 2100.





Fonte: O Autor (2026).

Figura 6 – Kiso, 2100.



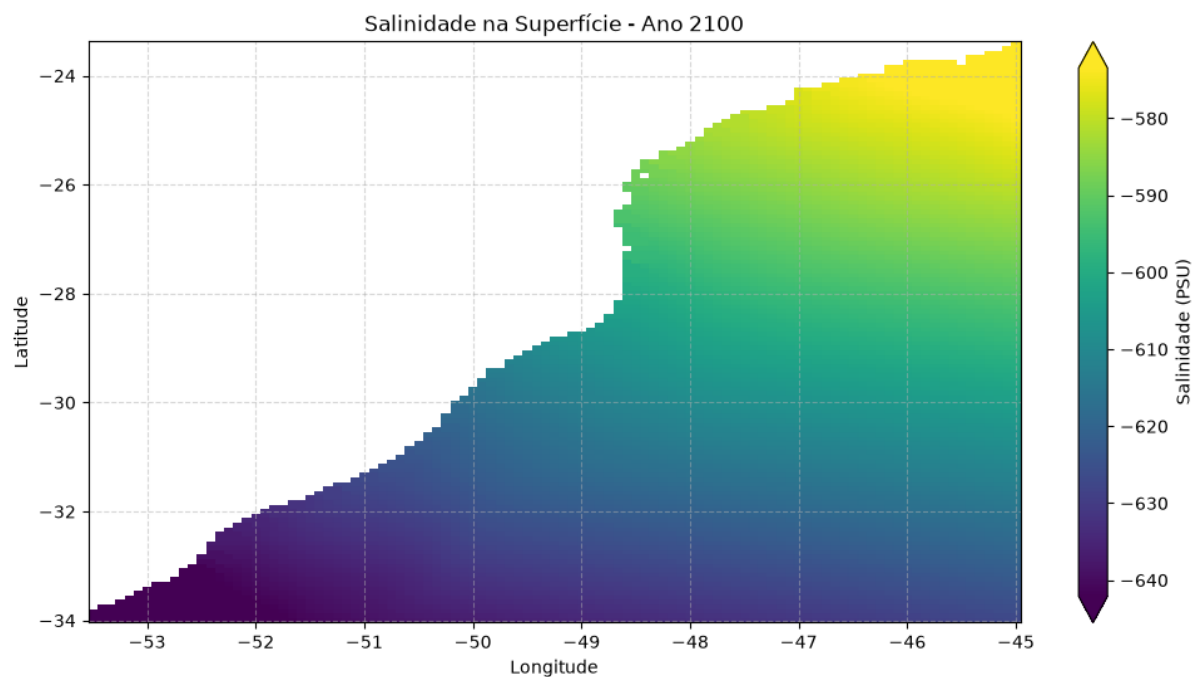
Fonte: O Autor (2026).

Destaca-se que, por máscara de superfície do CESM2, coeficientes de difusão isopicnal não se fazem presentes para o primeiro nível de profundidade. Para a presente pesquisa, não se considera este um empecilho, pois, em grande medida, toda primeira camada apresenta-se com valores de supersaturação de oxigênio. Aproveita-se para ilustrar a mudança na extensão do continente na profundidade de 110m, conforme a última figura. Também se ressalta a mudança, já esperada, nos valores de K_{ISO} com relação ao CESM2, onde a média situava-se acima de $1000 \text{ m}^2/\text{s}$.

Quanto às projeções de salinidade (Figura 7) e temperatura (Figura 8):

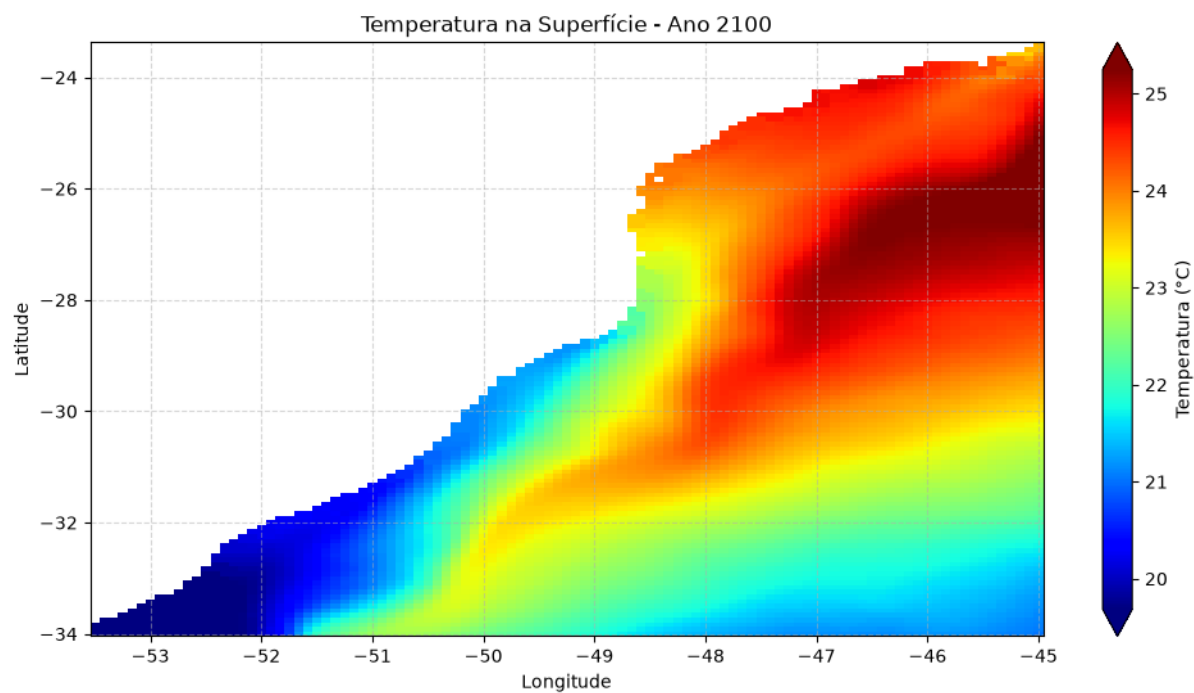


Figura 7 – Salinidade, 2100.



Fonte: O Autor (2026).

Figura 8 – Temperatura, 2100.



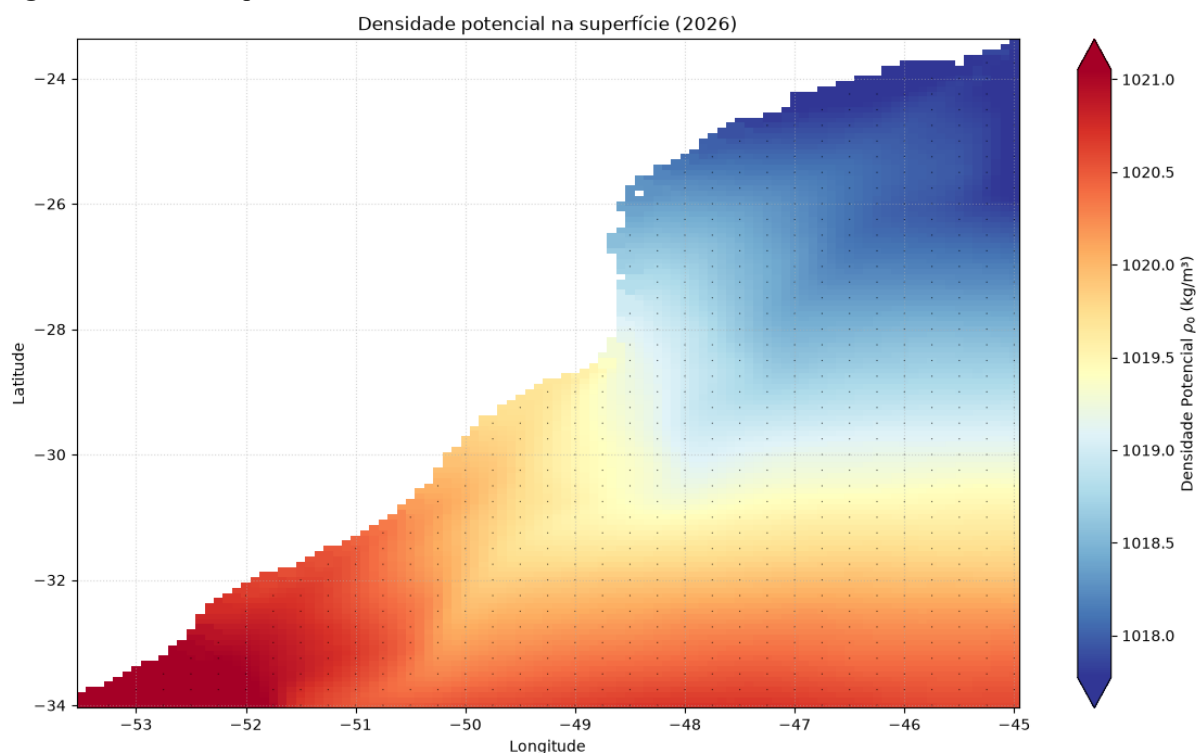
Fonte: O Autor (2026).

Nota-se a comprovação da premissa de elevada continuidade espacial.



O cálculo da densidade potencial resultou valores também consistentes, como percebe-se através do mapa abaixo (Figura 9):

Figura 9 – Densidade potencial, 2026.



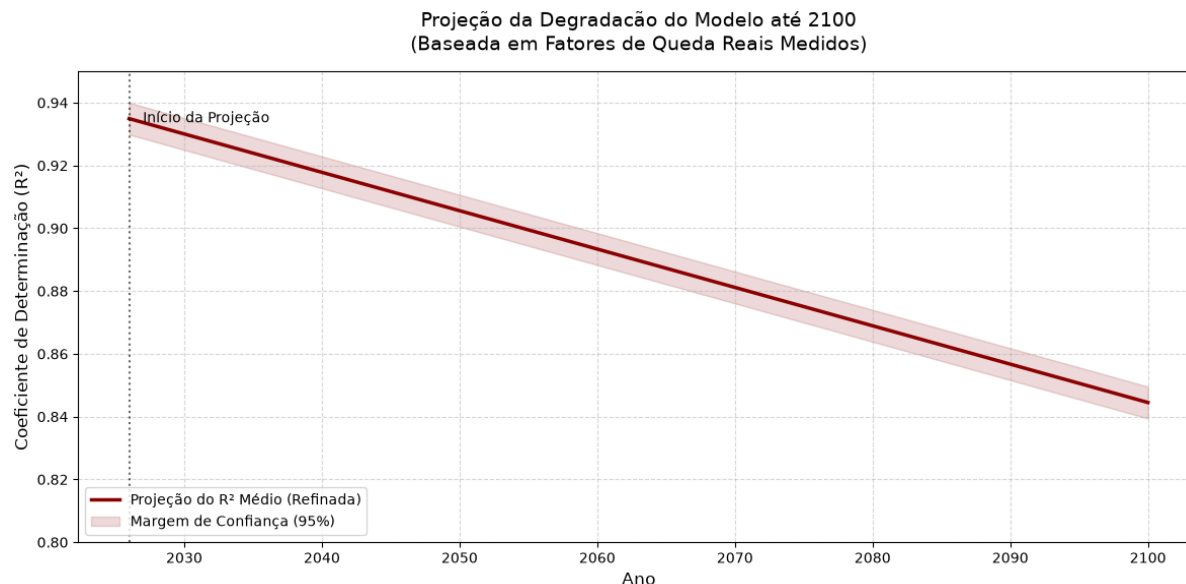
Fonte: O Autor (2026).

Com isso, pôde-se construir os sistemas de transporte entre células tanto advectivo quanto difusivo. A validade foi comprovada através da simulação de transporte de salinidade seguida do cálculo de integrais de tendências de troca ao longo de todo domínio, onde retornaram-se valores inferiores a 10^{-8} , considerado 0 estatístico.

As velocidades dos ventos, como já descrito, tiveram uma obtenção análoga às de massas de água, apenas recorrendo aos dados dos módulos atmosféricos ERA5 e WACCM, do GLORYS12V1 e CESM2, respectivamente. Nesse aspecto, houve disponibilidade temporal de dados históricos muito superior à anterior (agora de 1923 até 2025). Tal fato possibilitou a execução da primeira regressão apenas, justificada por uma degradação temporal dos operadores baixa, como mostra o gráfico montado a partir de testes de predição das últimas 2 décadas, pós limitação do domínio temporal (Figura 10):



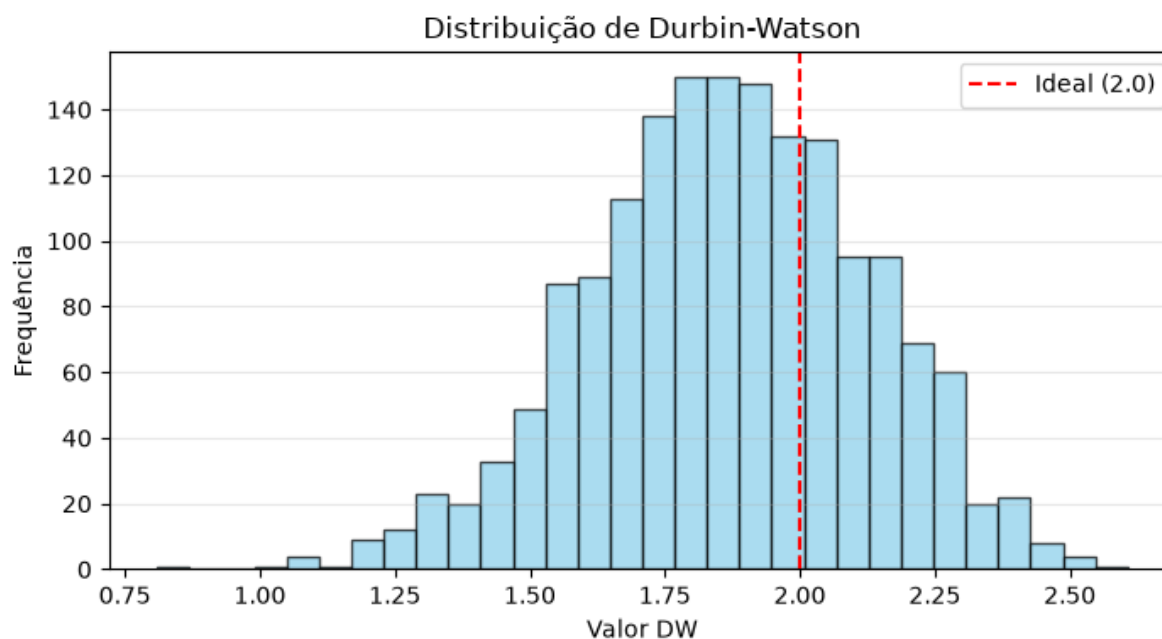
Figura 10 – Degradação dos operadores de ventos.



Fonte: O Autor (2026).

Também se adverte o aumento no número de erros auto correlacionados, conforme a Figura 11:

Figura 11 – Erros auto correlacionados em ventos.



Fonte: O Autor (2026).



Quanto à concentração de saturação de oxigênio, apresentou redução mediana de aproximadamente $0,081 \text{ mL L}^{-1}$, equivalente a cerca de $3,6 \mu\text{mol L}^{-1}$, ou 1,6%, associada a um aumento de temperatura de 0,9 grau Celsius.

Os termos bioquímicos ainda estão em processo de escrita.

Destaca-se que a conservação mássica foi garantida em todas etapas descritas, dispensando o confronto contra demais dados da literatura, visto que todas entradas advêm de representações históricas ou projeções já consolidadas.

Conclusões

Ao longo das etapas descritas foram realizados mais de 50 testes, bem como projetados, anualmente, de 2026 a 2100, em resolução de $1^\circ/12$ e 18 níveis até 500 metros de profundidade, os parâmetros temperatura, salinidade, velocidades de ventos e marés, concentração de saturação de O_2 e coeficientes de difusão. Calcularam-se, também, dezenas de outras variáveis, igualmente parametrizadas especificamente a presente pesquisa e distintas de quaisquer outros dados existentes na literatura. Ao que todos resultados indicam, há uma execução coerente dos módulos desenvolvidos e o modelo híbrido já é capaz de operar pelo menos através das formas fragmentadas descritas.

Atualmente, quer-se unir as ferramentas comentadas, bem como realizar a estruturação da parte bioquímica, para a execução do modelo íntegro, partindo dos valores atuais de oxigênio do GLORYS12V1 e com retroalimentação de dados. Atrelada a ampliação da área coberta no estudo, espera-se obter, enfim, as projeções de valores de O_2 até 2100 com resolução adequada para um planejamento ecológico no Brasil. O último passo seria a identificação de locais sujeitos a maior risco e a comparação com estudos semelhantes para validação por convergência à literatura.

Agradecimentos

Agradeço veementemente aos meus orientadores pelo auxílio prestado durante todo o projeto.

Referências

- BREITBURG, D. et al. Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science*, v. 359, n. 6371, 4 jan. 2018.
- COPERNICUS MARINE SERVICE. Global Ocean Physics Reanalysis. [S. l.]: Copernicus Marine Service, [s. d.]. DOI: 10.48670/moi-00021. Disponível em: <https://doi.org/10.48670/moi-00021>. Acesso em: 7 jul. 2026.
- DEUTSCH, C. et al. Climate-Forced Variability of Ocean Hypoxia. *Science*, v. 333, n. 6040, p. 336–339, 9 jun. 2011.
- HAMMAN, Joseph; ROCKLIN, Matthew; ABERNATHEY, Ryan. Pangeo: **A big-data ecosystem for scalable Earth system science**. In: EGU GENERAL ASSEMBLY 2018, 2018, Vienna. *Geophysical Research Abstracts*, v. 20, p. 12146, 2018
- HARRIS, Charles R. et al. Array programming with NumPy. *Nature*, v. 585, n. 7825, p. 357–362, 2020. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2.



KEELING, R. E.; KÖRTZINGER, A.; GRUBER, N. Ocean deoxygenation in a warming world. **Annual Review of Marine Science**, v. 2, p. 199–229, 2010. DOI: 10.1146/annurev.marine.010908.163855.

MATEAR, R. J.; HIRST, A. C. Long-term changes in dissolved oxygen concentrations in the ocean caused by protracted global warming. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 17, n. 4, p. n/a–n/a, dez. 2003.

MATEAR, R. J.; HIRST, A.; MCNEIL, B. I. Changes in dissolved oxygen distribution in the Southern Ocean with climate change. **Geochemistry, Geophysics, Geosystems**, v. 1, 1050, 2000. DOI: 10.1029/2000GC000086.

MCKINNEY, Wes. Data structures for statistical computing in Python. In: PROCEEDINGS OF THE 9TH PYTHON IN SCIENCE CONFERENCE (SCIPY 2010). **Proceedings...** Austin, Texas, 2010. p. 51–56. DOI: 10.25080/Majora-92bf1922-00a.

MILLMAN, K. J.; AIVAZIS, M. Python for Scientists and Engineers. **Computing in Science & Engineering**, v. 13, n. 2, p. 9–12, 1 mar. 2011.

OLIVEIRA FILHO, Eurico Cabral de et al. **Algas e angiospermas marinhas bênticas do litoral brasileiro: diversidade, exploração e conservação**. São Paulo: Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, 2002. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Paulo-Horta-3/publication/264841726>. Acesso em: 14 abr. 2026.

PEREIRA, Flávia. **Oxigênio dissolvido como indicador de processos biogeoquímicos e de mudanças globais em estuários**. 2012. Monografia (Monografia-USP) — Universidade de São Paulo, 2012. Disponível em: https://guiase.s3.amazonaws.com/wp-content/uploads/sites/171/2016/11/24120156/27_Monografia-USP-Pereira-F-B-P-2012.pdf. Acesso em: 08 abr. 2026.

SMAGORINSKY, J. General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment. **Monthly Weather Review**, v. 91, n. 3, p. 99–164, mar. 1963.