



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS
COORDENADORIA ESPECIAL DE OCEANOGRAFIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

Diênifer Carvalho Schefer

**EFEITO DA ONDA DE CALOR EM UMA LAGUNA EUTROFIZADA
SUBTROPICAL: LAGOA DA CONCEIÇÃO (SC, BRASIL)**

Florianópolis
2023

Diênifer Carvalho Schefer

**EFEITO DA ONDA DE CALOR EM UMA LAGUNA EUTROFIZADA
SUBTROPICAL: LAGOA DA CONCEIÇÃO (SC, BRASIL)**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Oceanografia do Centro de Ciências Físicas e Matemáticas da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Título de Bacharel em Oceanografia.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Alessandra Larissa D'Oliveira Fonseca

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Schefer, Diênifer Carvalho

EFEITO DA ONDA DE CALOR EM UMA LAGUNA EUTROFIZADA
SUBTROPICAL: LAGOA DA CONCEIÇÃO (SC, BRASIL) / Diênifer
Carvalho Schefer ; orientadora, Alessandra Larissa
D'Oliveira Fonseca, 2023.

49 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências
Físicas e Matemáticas, Graduação em Oceanografia,
Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Oceanografia. 2. Mudanças Climáticas. 3. Ondas de
Calor. 4. Eutrofização. 5. Impactos nos ecossistemas
marinhos costeiros. I. Fonseca, Alessandra Larissa
D'Oliveira . II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Oceanografia. III. Título.

Diênifer Carvalho Schefer

**EFEITO DA ONDA DE CALOR EM UMA LAGUNA EUTROFIZADA
SUBTROPICAL: LAGOA DA CONCEIÇÃO (SC, BRASIL)**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Oceanografia e aprovado em sua forma final pelo Curso de Oceanografia.

Florianópolis, 07 de fevereiro de 2024.

Coordenação do Curso

Banca examinadora

Prof.^a Alessandra Larissa D'Oliveira Fonseca, Dr.^a

Orientadora

Universidade Federal de Santa Catarina

Alex Cabral Dos Santos, Me.

Instituição Universidade de Gotemburgo - Suécia

Luís Henrique Bordin, Dr.

Instituição NOAA - AOML

Florianópolis, 2023.

À Flora e aos meus pais, Antônio Carlos e Cleni Aparecida,
que amo incondicionalmente.

AGRADECIMENTOS

É com imensa alegria que coloco em palavras o meu agradecimento a todos aqueles que compartilharam comigo esses anos da graduação e que de muitas formas me ajudaram a chegar até aqui.

Aos meus pais Antônio e Cleni, às minhas irmãs Diéssica e Daiani e a minha vó Dorema, pelo amor incondicional. Honro nossa história, respeito as escolhas e saúdo o que é mais valioso. Vocês fazem parte de quem eu sou e dessa conquista.

À Flora, minha filha, que me acompanhou as aulas ainda no ventre, recém nascida, engatinhando, sentadinha, em saída de campo, no laboratório e no namar, eu agradeço por todos os beijos e abraços consoladores que tu me deu, por me fazer ter coragem de ser corajosa e tirar de mim todo tanto de medo que ainda tenho. Minha flor de paz e doçura, tu me faz forte!

Ao meu grande parceiro, Diego, que embarcou comigo na missão mais importante da vida. Agradeço nosso encontro e ao nosso amor que transbordou na sua forma mais pura. Agradeço teu apoio acima de tudo.

À Malu e Ricardo pelo acolhimento, amor e cuidado para comigo e Flora. Vocês foram muito importantes nessa caminhada.

À Alessandra pela primeira e valiosa orientação. Tua força de mulher mãe e pesquisadora foi essencial para que eu finalizasse essa trajetória. Te encontrei e te levei com muito amor pra vida!

Às amigas lindas Juliana, Letícia, Hillary e Luana, por fazerem desses anos mais bonitos e alegres. Lembrar do rostinho de cada uma lá no início, em tudo que vivemos e ver como vocês estão hoje, enche meus olhos e o coração. Amo vocês!

Às manas mães, Maria, Gaby e Marina, por terem sido uma das minhas principais redes de apoio. Os vínculos se construíram em meio as dificuldades maternas e apesar delas, viver profundo e com empatia nos engrandece. Amo vocês e nossas crias.

À minha amiga de vida, Carol, que mesmo com um oceano de distância, sempre se faz presente. À minha amiga Gabi, também da vida, por segurar minha

mão e nunca mais soltar. À Jasmin pela parceria e doçura que encanta, te encontrar é um dos grandes presentes. À Nandara por partilhar comigo a jornada dupla às vezes tripla da maternidade e da universidade.

À todos os amigos queridos da vida, amigos da oceano, à turma 2016.1 e aos meninos da tucky, por serem tão especiais nessa trajetória. Obrigada por tudo!

À todos os professores e professoras do curso, por serem inspiração nesse mundo vasto e encantador que é a Oceanografia. À Núbia por todo apoio e calma nos momentos mais difíceis. Obrigada por abraçarem minha maternidade e minha filhota.

À minha banca avaliadora Alex e Luís por aceitarem fazer parte desse processo e ao Departamento de Ciências Marinhas da Universidade de Gotemburgo (Suécia) pela disponibilização dos dados.

Por fim, agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por possibilitar a realização desta pesquisa e a Universidade Federal de Santa Catarina, pública e de qualidade, pelas suas ações afirmativas que possibilitaram a minha permanência e conclusão da graduação.

“Do rio que tudo arrasta se diz que é violento.
Mas ninguém diz violentas as margens que o comprimem.”

Bertolt Brecht

RESUMO

A Lagoa da Conceição é um sistema eutrofizado que tem a formação de áreas hipóxicas e anóxicas como um dos grandes impactos que afetam a biodiversidade, a estrutura da cadeia alimentar e os processos biogeoquímicos. Em um contexto de mudanças climáticas globais, estudos sobre os impactos das ondas de calor no funcionamento dos ecossistemas marinhos costeiros são extremamente importantes à medida que a frequência e intensidade de eventos extremos aumentam. Espera-se que a eutrofização se agrave sob eventos de onda de calor, com aumento da taxa de respiração do ecossistema e amplificação de zonas mortas. O presente estudo investigou a ocorrência de ondas de calor, atmosféricas e marinhas, para a região da Ilha de Santa Catarina, no período de 10 a 27 de janeiro de 2022, e seu impacto nos parâmetros físico-químicos na água da laguna. A identificação e análise das ondas de calor foi estimada a partir dos dados diários de temperatura do ar e da superfície do mar no período de 1992 a 2022. Os resultados mostraram que não houve ocorrência de onda de calor marinha (OCM), no entanto, um evento de onda de calor atmosférico (OCA) foi registrado com duração de 9 dias, no período compreendido entre 16 e 24 de janeiro de 2022. Esse fenômeno de aquecimento induziu mudanças significativas nos parâmetros físico-químicos da água na laguna: a concentração de oxigênio dissolvido durante o evento chegou a valores abaixo de 2 mg L^{-1} e são um indicativo de que ondas de calor intensificam a hipóxia no sistema; as temperaturas do ar apresentaram média de $27,14^{\circ}\text{C}$, da água marinha $26,18^{\circ}\text{C}$ e as temperaturas (*in situ*) da laguna $29,2^{\circ}\text{C}$; a concentração de dióxido de carbono (CO_2) aumentou significativamente ($p < 0,05$) no período da onda de calor, concomitante ao aumento ($p < 0,05$) da concentração de carbono orgânico dissolvido (COD), o que indica o aumento da respiração e da heterotrofia no sistema. As concentrações dos pigmentos fotossintéticos clorofila-*b* (Cl-*b*), peridinina (Peridinin) e fucoxantina (Fucox) tiveram tendência ($p < 0,05$) a diminuir, enquanto que a clorofila de cianobactéria (BCI-*a*) e a luteína (Lutein) a aumentar durante o período de onda de calor. Esse efeito induz a simplificação do sistema, favorecendo organismos menores na base de cadeia alimentar. Assim, o estudo mostrou que a ocorrência de um evento de OCA, associado às mudanças climáticas globais, amplificou os sintomas de eutrofização existentes no sistema costeiro da Lagoa da Conceição.

Palavras-chave: Mudanças climáticas; Ondas de Calor; Eutrofização; Impactos nos ecossistemas marinhos costeiros.

ABSTRACT

The Conceição Lagoon is a eutrophicated system that forms hypoxic and anoxic areas as one of the major impacts affecting biodiversity, food chain structure, and biogeochemical processes. In the context of global climate change, studies on the impacts of heat waves on the functioning of coastal marine ecosystems are extremely important as the frequency and intensity of extreme events increase. Eutrophication is expected to worsen under heatwave events, leading to increased ecosystem respiration rates and the amplification of dead zones. This study investigated the occurrence of heat waves, both atmospheric and marine, in the region of Santa Catarina Island from January 10 to 27, 2022, and their impact on the physicochemical parameters of the lagoon water. The identification and analysis of heat waves were estimated from daily air and sea surface temperature data from 1992 to 2022. The results showed no occurrence of marine heat waves, however, an atmospheric heat wave event lasting 9 days was recorded between January 16 and 24, 2022. This warming phenomenon induced significant changes in the physicochemical parameters of the water in the lagoon: the dissolved oxygen concentration during the event dropped to values below 2 mg L^{-1} , indicating that heat waves intensify hypoxia in the system, air temperatures averaged 27.14°C , marine water temperatures 26.18°C and in-situ lagoon temperatures 29.2°C ; the concentration of carbon dioxide (CO_2) increased significantly ($p < 0.05$) during the heatwave period, concomitantly with the increase ($p < 0.05$) in the concentration of dissolved organic carbon (COD), indicating increased respiration and heterotrophy in the system. The concentrations of photosynthetic pigments chlorophyll-b (Cl-b), peridinin (Peridinin), and fucoxanthin (Fucox) tended to decrease ($p < 0.05$), while cyanobacterial chlorophyll-a (BCl-a) and lutein (Lutein) increased during the heatwave period. This effect induces the simplification of the system, favoring smaller organisms at the base of the food chain. Thus, the study revealed that the occurrence of an atmospheric heatwave event, linked to global climate change, intensified existing eutrophication symptoms in the coastal system of Conceição Lagoon.

Keywords: Climate changes; Heat Waves; Eutrophication; Impacts on coastal marine ecosystems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização geográfica da Lagoa da Conceição e pontos de amostragem *in situ* (ponto amarelo), NOAA–OISST (ponto vermelho) e INMET (ponto azul). 21

Figura 2 – Eventos de ondas de calor atmosféricas (OCAs) e marinhas (OCMs) entre 1992 e 2022, com identificação da intensidade máxima e data de pico. Dados obtidos da NOAA e INMET, calculados através do pacote *heatwaveR* (SCHLEGEL et al. 2018). 28

Figura 3 – Gráfico da ocorrência de onda de calor atmosférica (OCA) no período de 16 a 24 de janeiro de 2022, em preenchimento vermelho. A linha azul representa a climatologia, a linha verde o limiar para o extremo e a linha preta a temperatura do ar. Dados obtidos do INMET - Novembro 2021 a abril 2022. 29

Figura 4 – Diagrama Rosa dos Ventos: direção ($^{\circ}$) e velocidade do vento (m/s) para os cinco dias anteriores ao evento (a) e durante a ocorrência do evento de onda de calor (b). Dados horários disponibilizados pelo INMET, estação 83899. 30

Figura 5 – Gráficos de Tendência de Mann-Kendall (MK) para os parâmetros físico-químicos da água: T, S, OD (mg L^{-1}) e CO_2 , durante todo o período da série estudada. 31

Figura 6 – Gráfico de concentração de oxigênio dissolvido (OD, mg L^{-1}), durante o dia e a noite, indicando valores abaixo de 5 e 2 mg L^{-1} . 33

Figura 7 – Gráficos de Tendência de Mann-Kendall (MK) para os parâmetros de carbono orgânico dissolvido (COD) e particulado (COP) e pigmentos fotossintéticos clorofila-a (Cl-a), clorofila-b (Cl-b), clorofila de cianobactéria (BCI-a), clorofila-a/bacterioclorofila-a (Cl-BCI), peridinina (Peridinin), luteína (Lutein) e fucoxantina (Fucox). 33

Figura 8 – Análise de Escalonamento Multidimensional (MDS) sobre as variáveis temperatura (T), oxigênio dissolvido (OD), dióxido de carbono (CO_2), clorofila-a (Cl-a), clorofila-b (Cl-b), betaclorofila-a (BCI-a), razão clorofila-a/bacterioclorofila-a (Cl-BCI), peridinina (Peridinin), luteína (Lutein), fucoxantina (Fucox). Agrupamento por fatores: período normal (N) e período onda de calor (OC), para o dia (D) e noite (N). 36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos eventos de ondas de calor atmosféricas (OCAs) e marinhas (OCMs): normal climatológica (°C) (1992 a 2022), número total de eventos, duração (dias), intensidade máxima (Imax), intensidade média (Ime) e intensidade acumulada (Icum). 27

Tabela 2 – Temperaturas do ar e in situ da água no período normal (de 10 a 15/01/2022) e durante o evento de onda de calor (de 16 a 27/01/2022). Dados do ar obtidos do INMET - Estação Florianópolis e dados da água da LC. 29

Tabela 3 – Força de associação (tau) para as tendências significativas ($p < 0,05$) de Mann Kendall (MK) para os parâmetros físico-químicos da água durante todo o período analisado, de 10/01/2022 a 27/01/2022. 32

Tabela 4 – Força de associação (tau) para as tendências de Mann Kendall (MK) de carbono orgânico dissolvido (COD) e particulado (COP), pigmentos fotossintéticos clorofila-a (Cl-a), clorofila-b (Cl-b), clorofila de cianobactéria (BCl-a), clorofila-a/bacterioclorofila-a (Cl-BCl), peridina (Peridinin), luteína (Lutein) e fucoxantina (Fucox). Em negrito: tendências significativas ($p < 0,05$). 34

Tabela 5 – Resultados da Análise de variância permutacional multivariada (PERMANOVA) para os agrupamentos por fatores: período normal (N) e período onda de calor (OC), para o dia (D) e noite (N). 37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

OCA	Onda de Calor Atmosférica
OCM	Onda de Calor Marinha
OCA _s	Ondas de Calor Atmosféricas
OCM _s	Ondas de Calor Marinhas
TSM	Temperatura da Superfície do Mar

LISTA DE SÍMBOLOS

T	Temperatura
S	Salinidade
OD	Oxigênio Dissolvido
CO ₂	Dióxido de Carbono
COD	Carbono Orgânico Dissolvido
COP	Carbono Orgânico Particulado
Cl- <i>a</i>	Clorofila- <i>a</i>
Cl- <i>b</i>	Clorofila- <i>b</i>
BCl- <i>a</i>	Betaclorofila- <i>a</i>
Cl-BCl	Razão Clorofila- <i>a</i> /Bacterioclorofila- <i>a</i>
Peridinin	Peridinina
Lutein	Luteína
Fucox	Fucoxantina

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	19
1.1.1 Objetivo Geral	19
1.1.2 Objetivos Específicos	19
2 ÁREA DE ESTUDO	20
3 METODOLOGIA	24
3.1 DETERMINAÇÃO DA ONDA DE CALOR	24
3.2 AMOSTRAGEM	25
3.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS	26
4 RESULTADOS	28
4.1 IDENTIFICAÇÃO DA ONDA DE CALOR E CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA	28
4.2 CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICA	30
4.3 TENDÊNCIAS TEMPORAIS	31
4.3 ANÁLISE MULTIVARIADA DOS DADOS	36
4.3.1 Análise de Escalonamento Multidimensional	36
4.3.2 Análise de variância permutacional multivariada	38
5 DISCUSSÃO	39
6 CONCLUSÃO	44
REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

O enriquecimento de nutrientes, provenientes da ação antrópica nas águas costeiras ao redor do mundo, gera a eutrofização artificial e constitui uma das maiores causas da destruição dos ecossistemas marinhos (SILVA, 2016). A expansão desenfreada do desenvolvimento urbano, combinada à má gestão e a ausência de políticas ambientais efetivas, resulta em um sistema ineficiente de tratamento de efluentes domésticos, incapaz de evitar o despejo de nutrientes e matéria orgânica nos corpos hídricos costeiros (CABRAL et al., 2019). Além da urbanização, o uso excessivo de fertilizantes na agricultura e a pecuária sem o tratamento adequado dos dejetos também promovem a eutrofização costeira (FONSECA et al., 2021). Diante desse cenário destaca-se a necessidade urgente de estabelecer metas relacionadas à prevenção e redução da poluição marinha por nutrientes, como parte dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS-14.1), voltada para a preservação da vida na água, de acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU, 2015).

As lagoas e lagunas costeiras são ambientes de transição entre o continente e o oceano, o que as tornam vulneráveis às pressões antrópicas e às mudanças climáticas (NETTO et al., 2018). O enriquecimento excessivo da água com nutrientes e matéria orgânica decorrente da atividade humana causa mudanças que levam a diferentes níveis de eutrofização, de condições oligotróficas e mesotróficas, para condições eutróficas e hipertróficas (SILVA, 2016; NIXON, 1995). O excesso de nutrientes pode levar a florações de algas tóxicas e a redução da concentração de oxigênio dissolvido na água, gerando condições de hipoxia e anoxia que afetam a qualidade ambiental e a estrutura da cadeia alimentar (BREITBURG et al., 2018). Concentração de oxigênio dissolvido na água abaixo de 2 mg L^{-1} caracteriza a condição hipóxica, também denominada de zona morta, condição que inviabiliza a respiração e a sobrevivência de espécies aeróbicas, como os peixes e crustáceos (FERREIRA et al., 2007). Os principais fatores para potencializar esses eventos são a estratificação da coluna de água e a alta carga de matéria orgânica (SILVA et al., 2017). As consequências da eutrofização artificial incluem a perda da qualidade da água, das funções e serviços ecossistêmicos, alterações na estrutura da cadeia alimentar, nos processos biogeoquímicos e no metabolismo do sistema (CABRAL & FONSECA, 2019; CABRAL et al., 2019; SILVA et al., 2017). As lagoas costeiras são

suscetíveis a esse impacto, uma vez que apresentam maior tempo de residência associado a menores taxas de renovação da água (NEWTON et al., 2014), afetando fortemente a variação temporal das propriedades físicas, químicas e biológicas da água (BARROS et al., 2017).

Espera-se que os sintomas da eutrofização se intensifiquem com as mudanças climáticas, devido ao aumento da temperatura superficial média da terra e dos oceanos (CLARET et al., 2018). De acordo com *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) essa tendência de aquecimento é observada desde o início do século XX, com o aumento da emissão de gases de efeito estufa provocado pela ação humana, sendo temporariamente intensificada durante os eventos de El Niño (NOAA, 2022). De acordo com essa referência, os dez anos mais quentes registrados mundialmente desde 1880 ocorreram entre 2010 e 2022, com a média de temperatura global alcançando o recorde máximo de 16,92°C em 2016. Com base nos dados mais recentes do *NOAA Global Surface Temperature* (NOAGlobalTemp), a temperatura superficial global acumulada de janeiro a outubro de 2023 está 1,13°C acima da média do século XX, superando o então recorde de 2016 para o mesmo período (SANDERSON, 2023). No Brasil, o ano de 2023 também se destaca como um dos mais quentes da história do país desde a década de 60, com as temperaturas médias do ar acima da média histórica (1991 - 2020) nos meses de julho a novembro (INMET, 2023).

O Relatório de Avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023) relata que as mudanças climáticas exercem impactos significativos no clima da Terra, levando a um aumento na ocorrência de eventos extremos, tais como inundações, secas e ondas de calor (HARTLEY & TANDON, 2022) e ampliando ainda mais a vulnerabilidade dos países subdesenvolvidos e em desenvolvimento (TRENBERTH et al., 2007). Esses eventos têm o potencial de causar diversos impactos na sociedade, como o aumento nas taxas de mortalidade e internações hospitalares associadas a ondas de calor (ZUO et al., 2015; LISS et al., 2017); em secas e inundações contribuir para a destruição de infraestruturas, para o aumento da variabilidade da disponibilidade de água, levando a redução da produtividade agrícola e à insegurança alimentar (MULI et al., 2018). A consequência dessas alterações agrava as desigualdades socioeconômicas e raciais, impactando de forma mais intensa os grupos mais

vulneráveis (TRENBERTH et al., 2007). TEBALDI & BEAUDIN (2016) destacam que o efeito combinado de uma seca de primavera e uma inundação de verão leva a um maior declínio nas taxas de crescimento do PIB na região Nordeste do Brasil, indicando que eventos climáticos podem exacerbar a desigualdade em todo o país.

As ondas de calor são caracterizadas por uma elevação anormal e persistente das temperaturas que excedem os extremos históricos, causadas por uma combinação de processos atmosféricos e oceânicos. Hobday et al. (2016), com base em estudos de ondas de calor atmosféricas (OCAs), definiram uma onda de calor marinha (OCM) como um evento discreto prolongado de temperaturas anômalas da água em um local específico, que pode ser descrito por sua duração, intensidade e extensão espacial. Quantitativamente, uma OCA ou OCM tem sido descritas em referência a normal climatológica, com persistência de no mínimo três e cinco dias consecutivos, respectivamente, com data de início e fim identificáveis (HOBDAY et al., 2016). De acordo com esses autores, para definir as temperaturas anômalas (ou extremas), utiliza-se o percentil 90 como um limiar que indica quando a temperatura do ar ou a temperatura superficial do mar (TSM) é maior que 90% dos valores observados na normal climatológica. Este limiar varia temporalmente, permitindo que a metodologia em questão seja realizada em escalas diárias, anuais e sazonais.

As ondas de calor marinhas (OCMs) aumentam em frequência e magnitude como resultado de mudanças climáticas antropogênicas (SMILE et al., 2019), podendo causar mudanças rápidas nos padrões de biodiversidade e influenciar a estrutura e funcionamento dos ecossistemas marinhos (OLIVER et al., 2018; OLIVER et al., 2019; HOBDAY et al., 2016). Oliver et al. (2019) estabeleceram projeções em que o provimento de bens e serviços ecossistêmicos, tais como o armazenamento natural de carbono, a ciclagem de nutrientes e a estrutura de comunidades e de cadeias alimentares serão severamente comprometidos com o aumento de ocorrência de eventos de calor. De acordo com SMILE et al. (2019), as mudanças rápidas e extremas no ambiente físico, como as causadas pelas OCMs, podem exceder a resiliência das populações, já que as espécies costumam ser mais fortemente impactadas por extremos ambientais do que por mudanças lentas do ambiente.

Em um contexto de mudanças climáticas globais, estudos sobre os impactos das ondas de calor no funcionamento dos ecossistemas marinhos costeiros são extremamente importantes à medida que a frequência e intensidade de eventos extremos aumentam. Ressalta-se que poucos estudos consideram o efeito desses eventos em sistemas costeiros eutrofizados (COOK et al., 2022; BRAUKO et al., 2020). Assim, este trabalho buscou avaliar o efeito de uma onda de calor na dinâmica biogeoquímica de um sistema lagunar eutrofizado, para compreender seu impacto na formação de zona morta.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Identificar a ocorrência de onda de calor, marinha e atmosférica, e seu efeito na dinâmica biogeoquímica, com foco na formação de zona morta, em um sistema lagunar eutrofizado.

1.1.2 Objetivos Específicos

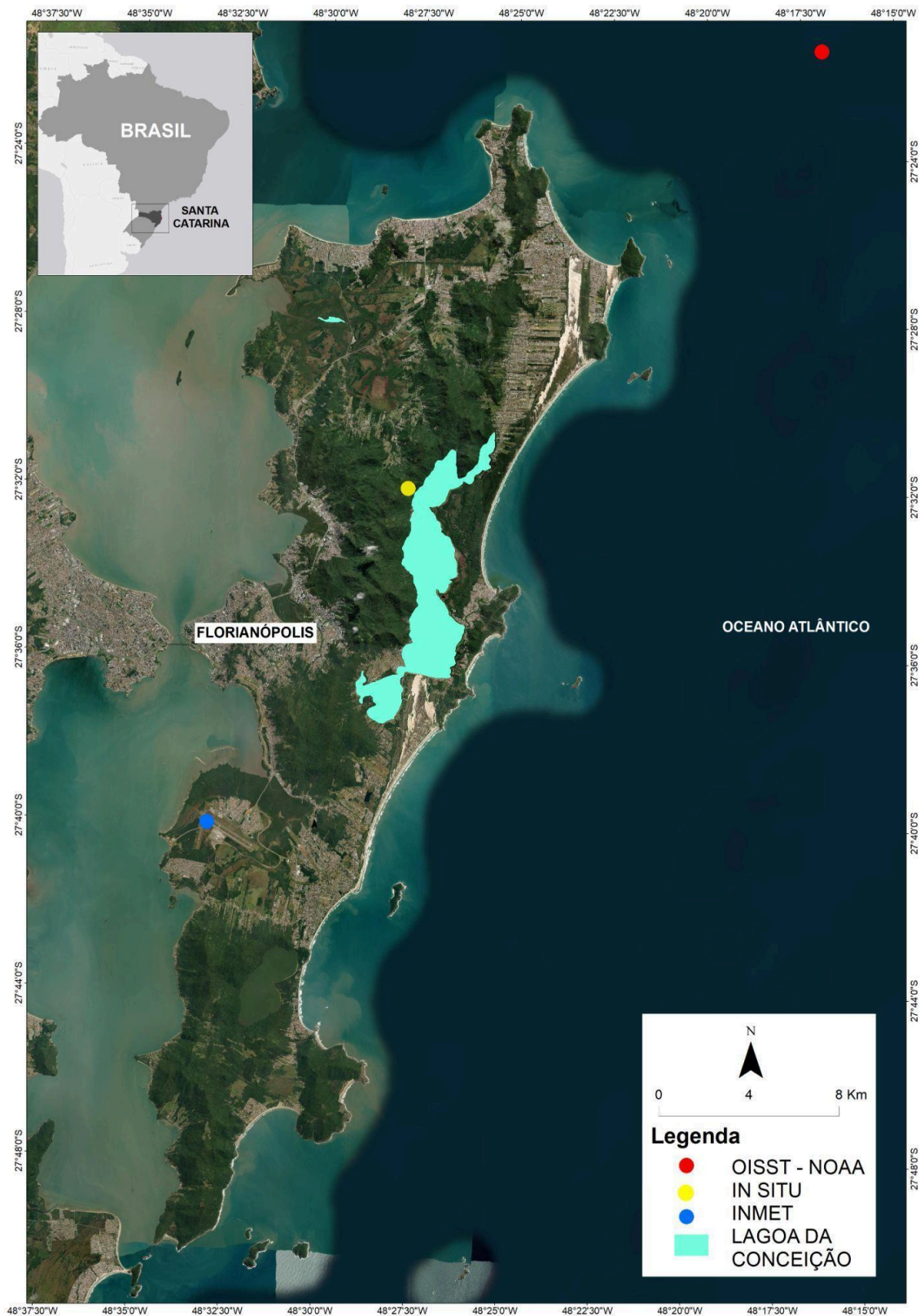
- i. Identificar a ocorrência da onda de calor marinha (OCM) e atmosférica (OCA) na região, com destaque para o período de janeiro de 2022.
- ii. Analisar o efeito da onda de calor na variação diária dos gases dissolvidos (O_2 e CO_2), característica do carbono orgânico e dos pigmentos fotossintetizantes fitoplanctônicos.

2 **ÁREA DE ESTUDO**

A Lagoa da Conceição (LC) está localizada na porção centro-leste da Ilha de Santa Catarina, à latitude 27°34' S e longitude 48°27' W, Município de Florianópolis, região sul do Brasil (Figura 1). O clima na região é mesotérmico úmido de zona intermediária subtropical, caracterizado por elevados índices pluviométricos, com precipitações significativas e bem distribuídas ao longo do ano (SILVA, 2016). Os ventos predominam do quadrante norte, porém, os do quadrante sul são mais intensos.

A LC é uma laguna que possui uma área aproximada de 20 km², com extensão no sentido norte-sul de 13,5 km e largura variável entre 0,5 e 2,5 Km, inserida numa bacia hidrográfica com área de 80 km² (Barros et al., 2017). A profundidade média da laguna é de 2,8 m e apresenta um valor máximo de 8,9 m (Americo Jr, 2018).

Figura 1 – Localização geográfica da Lagoa da Conceição e pontos de amostragem *in situ* (ponto amarelo), NOAA–OISST (ponto vermelho) e INMET (ponto azul).



Fonte: a autora (2023).

A LC é um sistema semifechado, que se liga ao Oceano Atlântico por meio do canal da Barra da Lagoa. Este é um canal natural longo e estreito, que meandra por aproximadamente 2 km de extensão, variando entre 20 à 40 m de largura. A laguna está inserida numa região de micro marés, onde a amplitude diária é inferior a um metro (CABRAL et al., 2019). O canal da Barra tem sua foz ao mar aberto e atua como um filtro natural da maré, atenuando a energia da maré astronômica, prevalecendo as variações na escala meteorológica (Porto Filho, 1993; Silva et al., 2017). Diversos estudos segmentam o corpo lagunar em três compartimentos distintos: central, do norte e do sul. Segundo Porto Filho (1993) esses compartimentos são definidos por características físico-químicas, geológicas, batimétricas e por variações espaciais de nutrientes e matéria orgânica. Andrade (2001) mostra a influência dos ventos sobre o padrão de circulação da Lagoa da Conceição, sendo essa mais evidente nos compartimentos Norte e Sul, onde a maré tem uma contribuição menor.

Ao longo das últimas décadas a bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição vem sofrendo intensa urbanização desordenada e notável alteração no uso e ocupação do solo, sem uma melhoria correspondente nas estações de tratamento de águas residuais (CABRAL et al., 2019; SILVA, 2016). A falta de tratamento adequado para efluentes domésticos resulta em alterações nas características hidroquímicas, levando à eutrofização (FONSECA & BRAGA, 2006). A Lagoa da Conceição experimenta eventos sazonais de hipoxia e anoxia em sua região central, devido à estratificação física da coluna de água associada às variações verticais na salinidade (BARROS et al., 2017), pela troca limitada de água com o mar adjacente (FONSECA & BRAGA, 2006) e a incidência de luz solar (FONTES & ABREU, 2009).

A mudança na qualidade da água e no estado trófico da laguna, de oligo-mesotrófico para eutrófico, se intensificou a partir de 2007, devido ao aumento demográfico na bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição (SILVA et al., 2017). Em uma escala temporal menor, o aumento da população na região durante feriados e veraneios foi descrito como significativo para afetar ainda mais a qualidade da água da laguna (FONTES et al., 2006). Como efeitos da eutrofização crônica na laguna, podem ser observados o predomínio da forma reduzida de nitrogênio, o N-amoniaco, aumento no crescimento e abundância de espécies oportunistas de macroalgas e microalgas, incidência de algas tóxicas e a formação da zona morta

nas águas de fundo (FONSECA & BRAGA, 2006; FONSECA, 2006). Em 2021, o rompimento da barragem da Lagoa de Evapo-Infiltração da Estação de Tratamento de Esgoto da Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (LEI-ETE/CASAN) lançou toneladas de N e P para dentro da laguna, desencadeando uma crise trófica nunca registrada no sistema, levando a ocorrência de zona morta em águas superficiais e na mortandade de diversos organismos marinhos, como peixe e, siris (ECOANDO, 2023). A formação e expansão de zonas mortas têm afetado a função e serviços que este ecossistema fornece, com destaque aos relacionados à economia local e ao bem-estar da comunidade (SILVA et al., 2017).

3 METODOLOGIA

3.1 DETERMINAÇÃO DA ONDA DE CALOR

A metodologia utilizada na identificação da onda de calor foi a de Hobday et al. (2016), implementada em Python por Eric C. J. Oliver e traduzida para a linguagem R por Robert W. Schlegel e Albertus J. Smit, estimada e visualizada pelo pacote “heatwaveR” do software R, versão 4.3.0 (R CORE TEAM, 2023; SCHLEGEL et al. 2018), disponível em: <https://github.com/robwschlegel/heatwaveR>.

O cálculo para a identificação da onda de calor foi realizado a partir de dados diários da temperatura do ar e da TSM, de 1992 a 2022, e comparados à normal climatológica, da qual os valores médio e extremo (percentil 90) foram obtidos. A normal climatológica foi estimada a partir dos 30 anos de dados médios diários, atmosféricos e marinhos, de 1992 a 2022. Os dados de TSM foram obtidos da NOAA, através do *Optimum Interpolation Sea Surface Temperature V2.1* (OISST) à latitude -27.383333 e longitude -48.233889 (Figura 1). As coordenadas originais foram aproximadas para a latitude -27.385 e -27.382 e, longitude -48.235 e -48.231. O conjunto de dados OISST é uma análise construída pela combinação de observações de diferentes plataformas em uma grade global e apresenta médias diárias da TSM com resolução espacial de 0,25° de latitude por 0,25° de longitude. Os dados de temperatura do ar foram obtidos da Estação Meteorológica n° 83899 de Florianópolis, pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (Figura 1).

De acordo com Hobday et al. (2016), as ocorrências das OCAs e OCMs são identificadas quando as temperaturas observadas excedem o limite estabelecido pelo percentil 90 e se mantêm elevadas por um período de no mínimo 3 dias para OCAs e por pelo menos 5 dias para OCMs.

Os eventos detectados foram resumidos a partir de um conjunto de métricas, tais como a duração do evento (período de tempo consecutivo em que a temperatura excede o limiar, em dias), a intensidade máxima (anomalia máxima de temperatura durante o evento, em °C), a intensidade média (anomalia média de temperatura durante o evento, °C), e a intensidade cumulativa (soma das anomalias de intensidade diária ao longo da duração do evento, °C.dias) (HOBDAY et al., 2016). Séries temporais de intensidade máxima e intensidade cumulativa foram

obtidas para todo o período, atmosférico e marinho. Com base na intensidade máxima, foram calculadas e visualizadas as categorias de ondas de calor, seguindo as orientações de HOBDAY et al., (2016): i) moderada, onde eventos detectados cuja intensidade máxima não duplica a distância entre a climatologia e o limiar; ii) forte, eventos que duplicam; iii) grave, eventos que triplicam e iv) extrema, eventos com intensidade máxima de pelo menos quatro vezes à distância mencionada. Todos os parâmetros foram calculados através do pacote *heatwaveR* (SCHLEGEL et al. 2018).

3.2 AMOSTRAGEM

Os dados *in situ* foram adquiridos durante uma campanha realizada entre os dias 10/01/2022 à 27/01/2022, em um ponto amostral na região norte da Lagoa da Conceição, à latitude -27.5386133 e longitude -48.4604144 (Figura 1), e disponibilizados pelo Departamento de Ciências Marinhas da Universidade de Gotemburgo (Suécia). Nesta campanha, os dados foram obtidos em diferentes frequências amostrais, denominados neste estudo como:

i. séries temporais multivariadas de alta frequência: coleta contínua e de alta frequência dos parâmetros físico-químicos da água em superfície, durante todo o período.

Os dados *in situ* da subsuperfície da água (0,5 m de profundidade) de temperatura (°C) e salinidade (PSU) foram registrados a cada 1 minuto pelo datalogger Solinst Levelogger 5. As concentrações de oxigênio dissolvido (mg L^{-1}) foram obtidas pelo registrador PME miniDOT. Para as medidas de pCO_2 (μatm) uma bomba de água submersível foi instalada a partir do navio a 0,5 m de profundidade para transportar continuamente (3 L min^{-1}) a água superficial para um balanceador de gás de chuveiro RAD AQUA DURRIDGE. O ar do headspace foi bombeado para um dessecante Drierite® e depois para um analisador de gás traço de CO_2 (LI-COR 7810). O equilibrador de gás e os detectores foram conectados em série em um circuito fechado de ar (Santos et al. 2012). O pCO_2 (frequência de 1 min) no ar foi convertido em dissolvido em água do mar usando o coeficiente de solubilidade (Weigel 1978; Pierrot et al. 2009).

ii. séries temporais multivariadas discretas: coleta discreta dos parâmetros de carbono orgânico e pigmentos fotossintéticos, durante os 9 dias iniciais da campanha, com amostragem realizada no início da manhã (antes do nascer do sol), ao meio-dia e no final da tarde (no momento do pôr do sol), com a intensificação da amostragem a cada 2h, durante 24h, em período sem e com a onda de calor.

As amostras de água superficial foram obtidas com bomba peristáltica, sendo filtradas imediatamente em microfiltro de fibra de vidro (0,7 micrômetros de porosidade) para análise dos pigmentos fotossintetizantes e para a concentração do carbono orgânico particulado (microfiltros previamente calcinados e pesados). A técnica utilizada para avaliar os pigmentos fitoplanctônicos foi a cromatografia líquida de alta precisão (High Performance Liquid Chromatography, HPLC). A concentração de carbono orgânico particulado foi medida em IRMS (Isotope Ratio Mass Spectrometry; Espectrometria de Massa da Razão Isotópica) (Thermo Fisher). O material dissolvido foi acondicionado em frasco de polietileno de alta resistência e fixado de ácido fosfórico. As amostras de carbono orgânico dissolvido foram analisadas através de um instrumento Shimadzu 5000 TOC-VCPH. A precisão e veracidade do COD foram testadas contra material de referência de águas profundas do mar e água com baixo teor de carbono (fornecido por D.A. Hansell, Universidade de Miami) e foram <5%.

3.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Para compreender se houve variação temporal nos dados *in situ*, o teste não-paramétrico de Mann-Kendall (MK) foi aplicado, determinando a significância estatística das tendências observadas, com um intervalo de confiança de 95%, e a força da tendência de cada variável pelo coeficiente tau (THOMSON; EMERY, 2014). Esse teste envolve a análise de cada valor da série temporal em relação aos demais, buscando identificar evidências estatísticas que permitam rejeitar a hipótese nula (h_0) de ausência de tendência (seja positiva ou negativa) e aceitar a hipótese alternativa (h_1) que indica a existência de uma tendência temporal estatisticamente significativa ao longo do tempo. A tendência de MK foi realizada em linguagem Python utilizando a IDE Spyder 5.4.3 (RAYBAUT, 2009).

A análise de escalonamento multidimensional (MDS) multivariada de ordenação, gerada pelo software PRIMER (Plymouth Routine in Multivariate Ecological Research – Plymouth University), foi utilizada para investigar como os dados se distribuem e se agrupam em relação ao período amostrado (normal e com onda de calor) e a variação diurna (dia e noite). Uma segunda análise, a análise de variância permutacional multivariada (PERMANOVA), também conduzida pelo PRIMER, foi realizada para averiguar se existem diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$ ou 5%) entre os agrupamentos obtidos pela análise MDS.

4 RESULTADOS

4.1 IDENTIFICAÇÃO DA ONDA DE CALOR E CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA

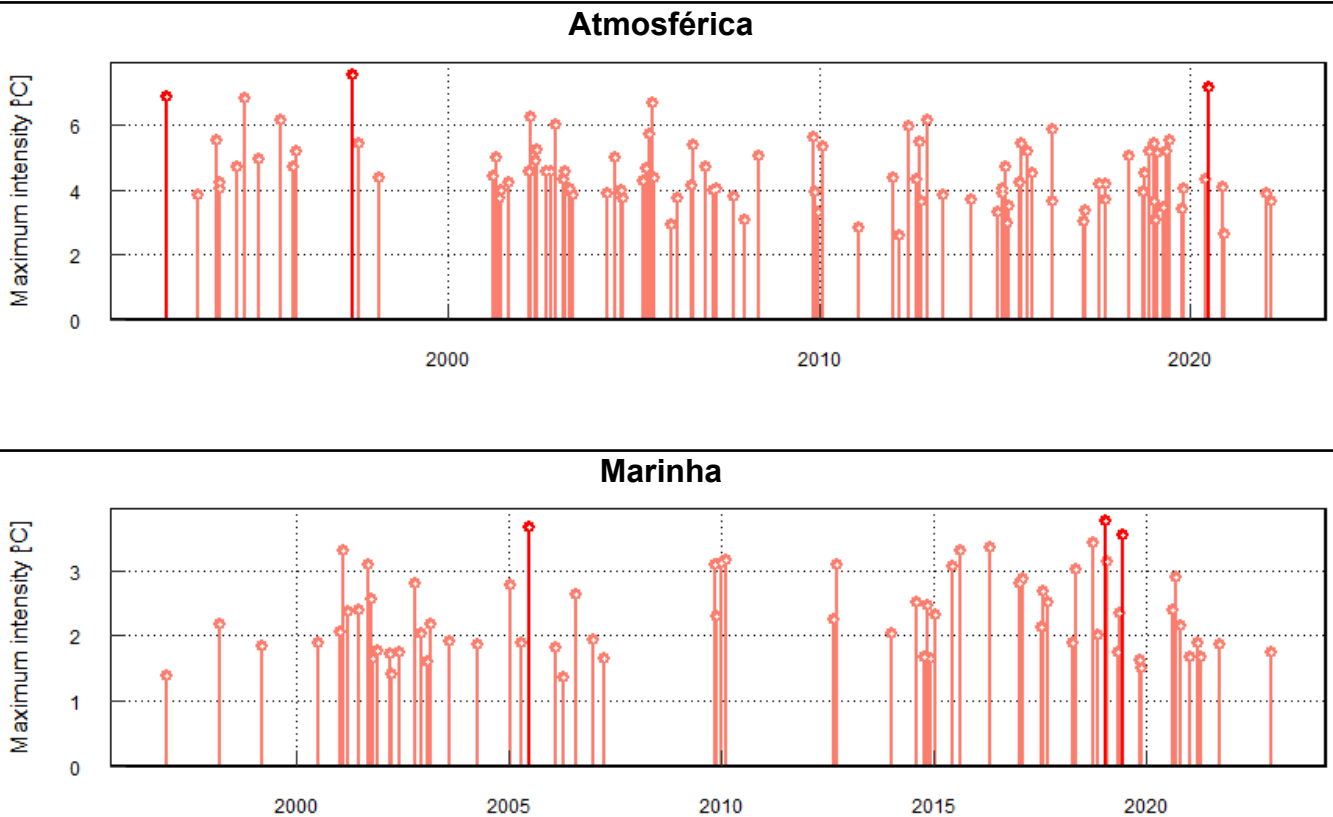
Foram identificados 99 eventos de OCAs entre o período de 1992 e 2022, com duração mínima de 3 dias e máxima de 14 dias. A intensidade máxima variou entre 2,56 a 7,55 °C (Tabela 1). A análise da temperatura do ar, da série temporal de dados atmosféricos, mostra um aumento na frequência dos eventos de onda de calor a partir do ano de 2000 (Figura 2). O evento de calor atmosférico de maior duração ocorreu em 2015 e a intensidade máxima atmosférica foi registrada em 2020. Em relação as OCMs, 68 eventos foram identificados entre o período de 1992 e 2022, com duração mínima de 5 dias e máxima de 54 dias. A intensidade máxima variou entre 1,35 a 3,76 °C (Tabela 1). Assim como na atmosfera, a análise da TSM, da série temporal de dados OISST, também mostra um aumento na frequência e intensidade máxima dos eventos de OCM a partir do ano de 2000 (Figura 2). A OCM de maior duração ocorreu em 2017 e a maior intensidade máxima foi registrada em 2019.

Tabela 1 – Resumo dos eventos de ondas de calor atmosféricas (OCAs) e marinhas (OCMs): normal climatológica (°C) (1992 a 2022), número total de eventos, duração (dias), intensidade máxima (Imax), intensidade média (Ime) e intensidade acumulada (Icum).

Tipo	Normal Climatológica (°C)	Número de eventos	Duração (dias) (mín - máx)	Imax (°C) (mín - máx)	Ime (°C) (mín - máx)	Icum (°C.dias) (mín - máx)
Marinha	22,14	68	5 - 54	1,35 - 3,76	1,27 - 2,49	6,55 - 133
Atmosférica	23,7	99	3 - 14	2,56 - 7,13	2,51 - 6,40	7,74 - 63,42

Fonte: a autora (2023).

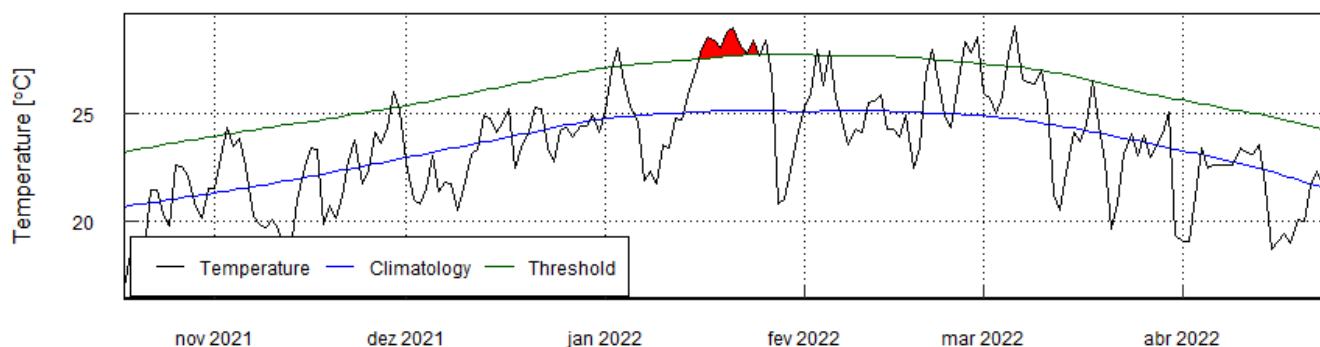
Figura 2 – Eventos de ondas de calor atmosféricas (OCAs) e marinhas (OCMs) entre 1992 e 2022, com identificação da intensidade máxima e data de pico. Dados obtidos da NOAA e INMET, calculados através do pacote *heatwaveR* (SCHLEGEL et al. 2018).



Fonte: a autora (2023).

Para o período de interesse, 10 a 27 de janeiro de 2022, detectou-se uma OCA (Figura 3) com duração de 9 dias. O evento iniciou em 16 de janeiro de 2022, atingindo o pico no dia 21. A intensidade máxima desta onda de calor foi de 3,89 °C e a intensidade acumulada de 29,26 °C.dia. Com base na intensidade máxima observada, a onda de calor foi classificada como evento moderado, quando a temperatura máxima não duplica a distância entre a normal climatológica sazonal e o valor registrado durante o evento. No entanto, não foi detectada ocorrência de OCM nesse período. As temperaturas superficiais médias diárias do mar (dados OISST) variaram de 25 a 26,9 °C. Para a laguna, a temperatura média diária da água superficial (dados in situ) variou de 26,3 a 31,1 °C durante o período de interesse. Nos cinco dias anteriores ao evento de calor, a temperatura média do ar foi de 25 °C aumentando para 28.2 °C durante a ocorrência do evento, enquanto que a temperatura média da água da laguna variou de 27.4 °C para 30.1 °C (Tabela 2).

Figura 3 – Gráfico da ocorrência de onda de calor atmosférica (OCA) no período de 16 a 24 de janeiro de 2022, em preenchimento vermelho. A linha azul representa a climatologia, a linha verde o limiar para o extremo e a linha preta a temperatura do ar. Dados obtidos do INMET - Novembro 2021 a abril 2022.



Fonte: a autora (2023).

Tabela 2 – Temperaturas do ar e *in situ* da água no período normal (de 10 a 15/01/2022) e durante o evento de onda de calor (de 16 a 27/01/2022). Dados do ar obtidos do INMET - Estação Florianópolis e dados da água da LC.

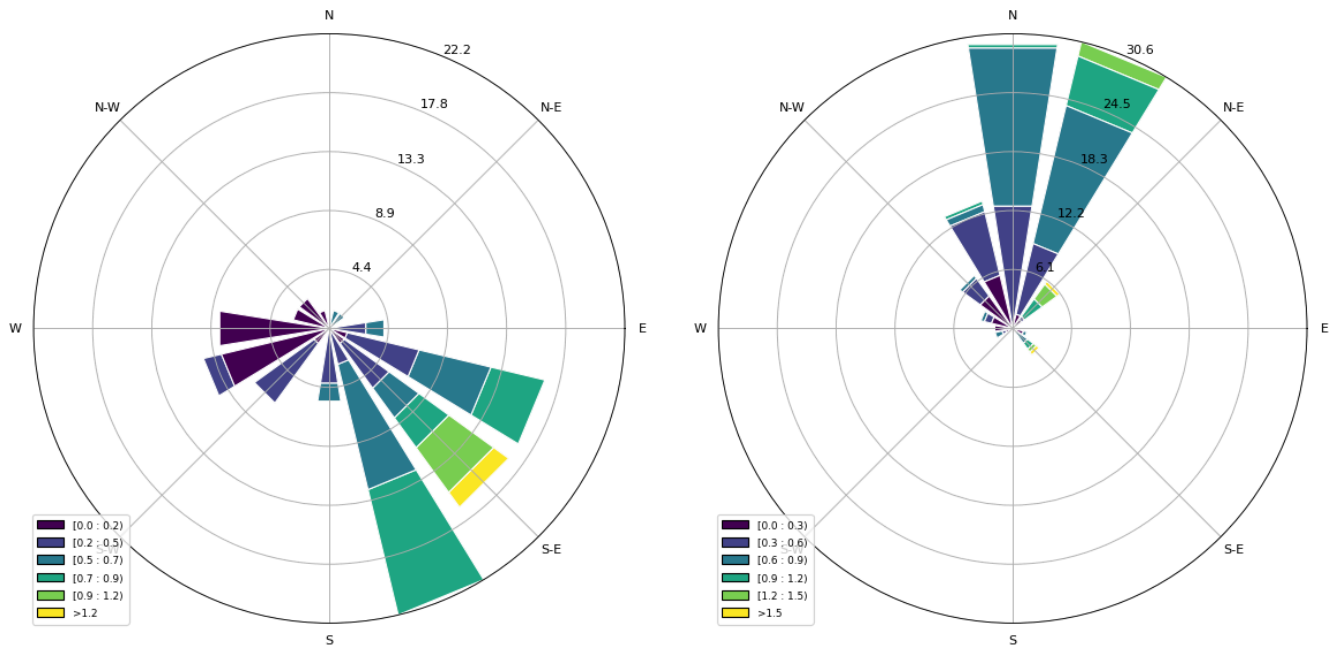
Temperatura (°C)	Antes do evento			Durante o evento		
	mín	máx	média	mín	máx	média
Atmosférica	23,5	27	25	26,8	29,1	28,2
Laguna	26,3	27,9	27,4	28,2	31,1	30,1

Fonte: a autora (2023).

4.2 CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICA

Entre os dias 10 e 27 de janeiro de 2022, não ocorreram chuvas na região. Os dados de velocidade (m/s) e direção (°) do vento indicaram que, nos cinco dias anteriores ao evento da onda de calor, os ventos oscilaram de leste a oeste, sendo os mais intensos do quadrante Sul-Sudeste (Figura 4a). Durante os dias de ocorrência da onda de calor houve predominância de ventos provenientes das direções Norte e Nordeste (Figura 4b).

Figura 4 – Diagrama Rosa dos Ventos: direção (°) e velocidade do vento (m/s) para os cinco dias anteriores ao evento (a) e durante a ocorrência do evento de onda de calor (b). Dados horários disponibilizados pelo INMET, estação 83899.

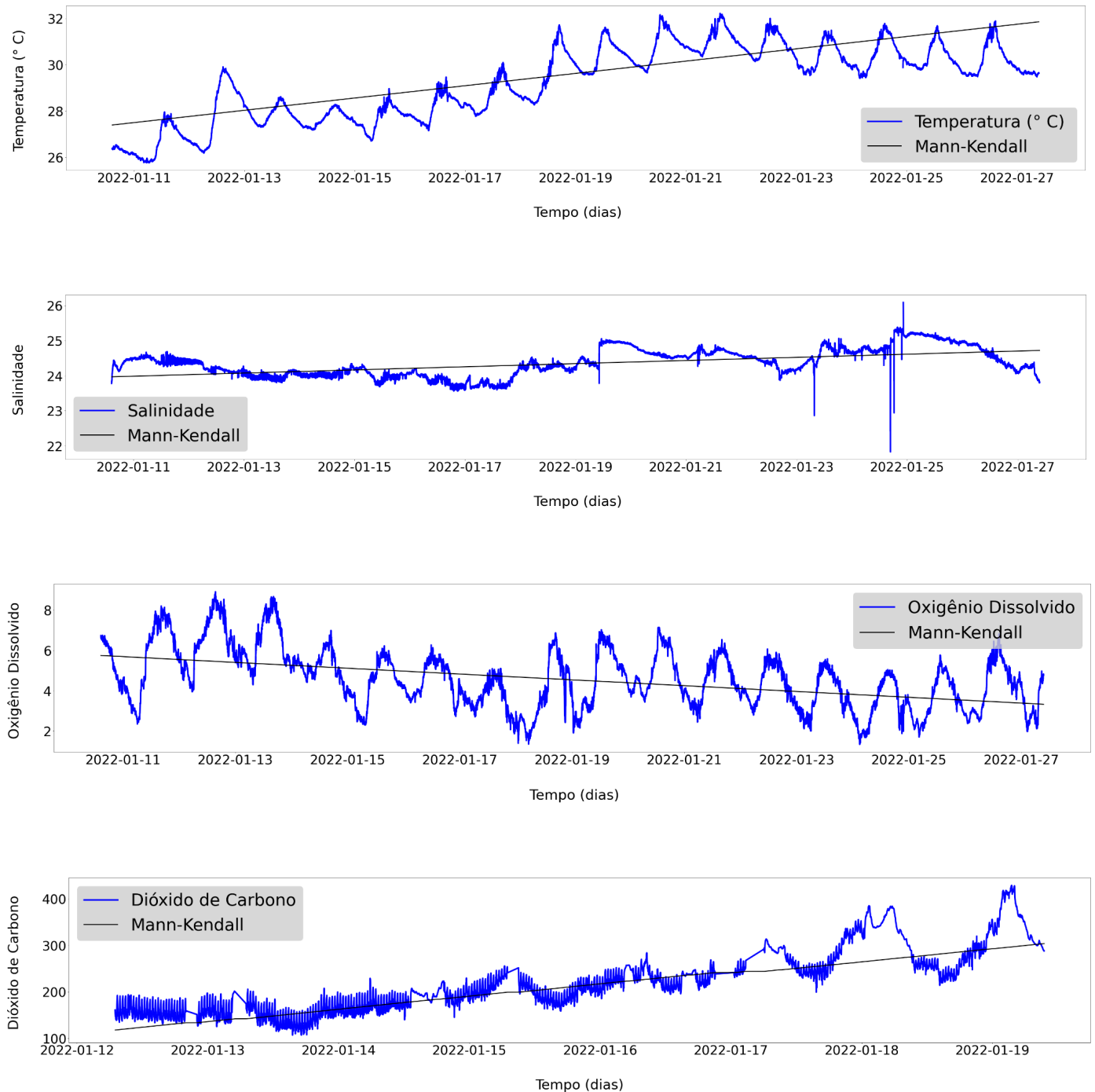


Fonte: a autora (2023).

4.3 TENDÊNCIAS TEMPORAIS

O teste de Mann-Kendall indicou que houve tendência estatisticamente significativa ($p < 0,05$) nos parâmetros físico-químicos ao longo do tempo (Figura 5). A tendência observada para a temperatura, salinidade e a concentração do dióxido de carbono foi de aumento, enquanto que para o oxigênio dissolvido foi observada uma tendência de diminuição (Tabela 3). Os p -valores baixos fornecem forte evidência contra a hipótese nula de ausência de tendência para as variáveis analisadas.

Figura 5 – Gráficos de Tendência de Mann-Kendall (MK) para os parâmetros físico-químicos da água: T, S, OD (mg L^{-1}) e CO_2 , durante todo o período da série estudada.



Fonte: a autora (2023).

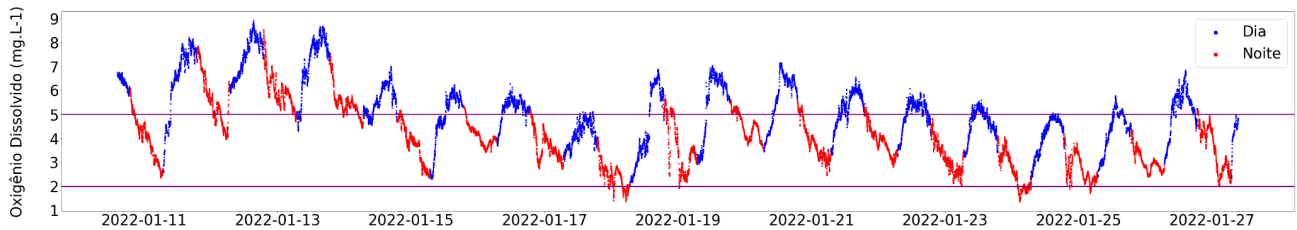
Tabela 3 – Força de associação (tau) para as tendências significativas ($p < 0,05$) de Mann Kendall (MK) para os parâmetros físico-químicos da água durante todo o período analisado, de 10/01/2022 a 27/01/2022.

Parâmetros físico-químicos	p -valor	tau
Temperatura (°C)	0,0	0,548
Salinidade	0,0	0,344
Oxigênio Dissolvido (mg L ⁻¹)	0,0	-0,309
Dióxido de Carbono	0,0	0,702

Fonte: a autora (2023).

A concentração do oxigênio dissolvido variou de um mínimo de 2,3 a um máximo de 8,9 mg L⁻¹ no período anterior a onda de calor (normal), enquanto que durante a onda de calor variou de 1,3 a 7,1 mg L⁻¹. Tais valores mostram que as concentrações de oxigênio dissolvido diminuíram no período de maior temperatura. Concentrações de oxigênio dissolvido abaixo do permitido para corpos de águas salobras Classe 1 (5 mg L⁻¹) pela legislação ambiental brasileira (CONAMA N° 357/200) foram registradas em todos os dias de amostragens na laguna (60,64%), sendo intensificadas no período da onda de calor e em maior parte no período noturno (40,30%) (Figura 6). Concentrações de oxigênio dissolvido que caracterizam a hipóxia, abaixo de 2 mg L⁻¹, foram observadas durante a onda de calor e no período noturno, caracterizando a zona morta em superfície em 1,91% das observações (Figura 6).

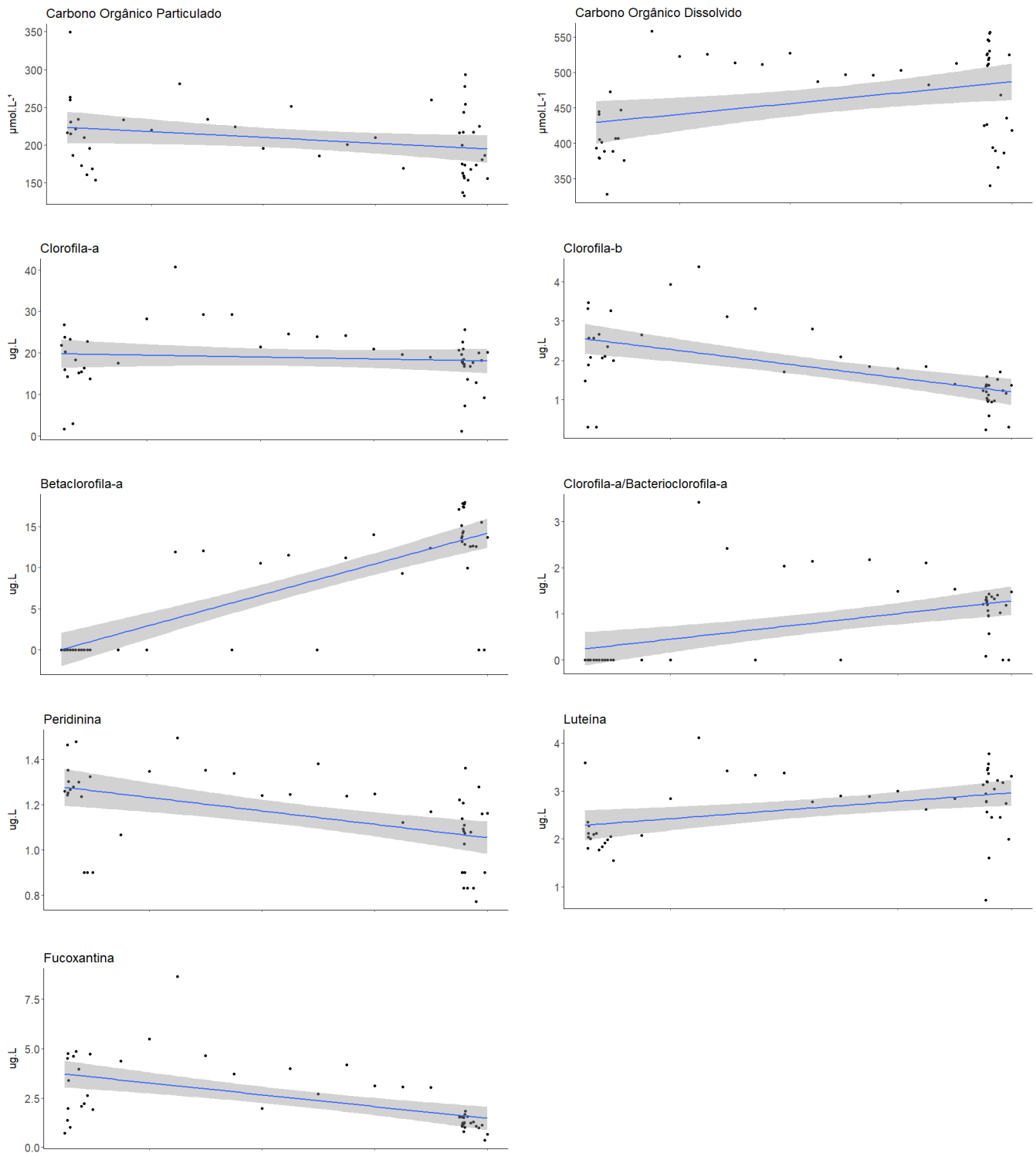
Figura 6 – Gráfico de concentração de oxigênio dissolvido (OD, mg L⁻¹), durante o dia e a noite, indicando valores abaixo de 5 e 2 mg L⁻¹.



Fonte: a autora (2023).

As tendências de Mann-Kendall para os parâmetros de carbono orgânico e pigmentos fotossintéticos seguem apresentados na Figura 7 e Tabela 4. A concentração de carbono orgânico dissolvido (COD) apresentou tendência de aumento ($p < 0,05$) para o período da onda de calor, a mesma tendência não foi observada para o carbono orgânico particulado (COP). A concentração dos pigmentos fotossintéticos clorofila-*b* (Cl-*b*), peridinina (Peridinin) e fucoxantina (Fucox) tiveram tendência ($p < 0,05$) a diminuir durante a onda de calor. Enquanto que a concentração de clorofila de cianobactéria (BCI-*a*), e a luteína (Lutein) aumentaram para esse período, influenciando no aumento da razão Clorofila-*a*/Bacterioclorofila-*a* (Cl-BCI).

Figura 7 – Gráficos de Tendência de Mann-Kendall (MK) para os parâmetros de carbono orgânico dissolvido (COD) e particulado (COP) e pigmentos fotossintéticos clorofila-*a* (Cl-*a*), clorofila-*b* (Cl-*b*), clorofila de cianobactéria (BCI-*a*), clorofila-*a*/bacterioclorofila-*a* (Cl-BCI), peridininina (Peridinin), luteína (Lutein) e fucoxantina (Fucox).



Fonte: a autora (2023).

Tabela 4 – Força de associação (tau) para as tendências de Mann Kendall (MK) de carbono orgânico dissolvido (COD) e particulado (COP), pigmentos fotossintéticos clorofila-*a* (Cl-*a*), clorofila-*b* (Cl-*b*), clorofila de cianobactéria (BCI-*a*), clorofila-*a*/bacterioclorofila-*a* (Cl-BCI), peridininina (Peridinin), luteína (Lutein) e fucoxantina (Fucox). Em negrito: tendências significativas ($p < 0,05$).

Variáveis	p-valor	tau
COD	0,00	0,37
COP	0,09	-0,16
Cl- <i>a</i>	0,97	-0,00
Cl-<i>b</i>	0,00	-0,36
BCI-<i>a</i>	5,50e-11	0,62
Cl-BCI	0,00	0,29
Peridinin	0,00	-0,31
Lutein	1,98e-05	0,42
Fucox	1,98e-05	-0,42

Fonte: a autora (2023).

4.3 ANÁLISE MULTIVARIADA DOS DADOS

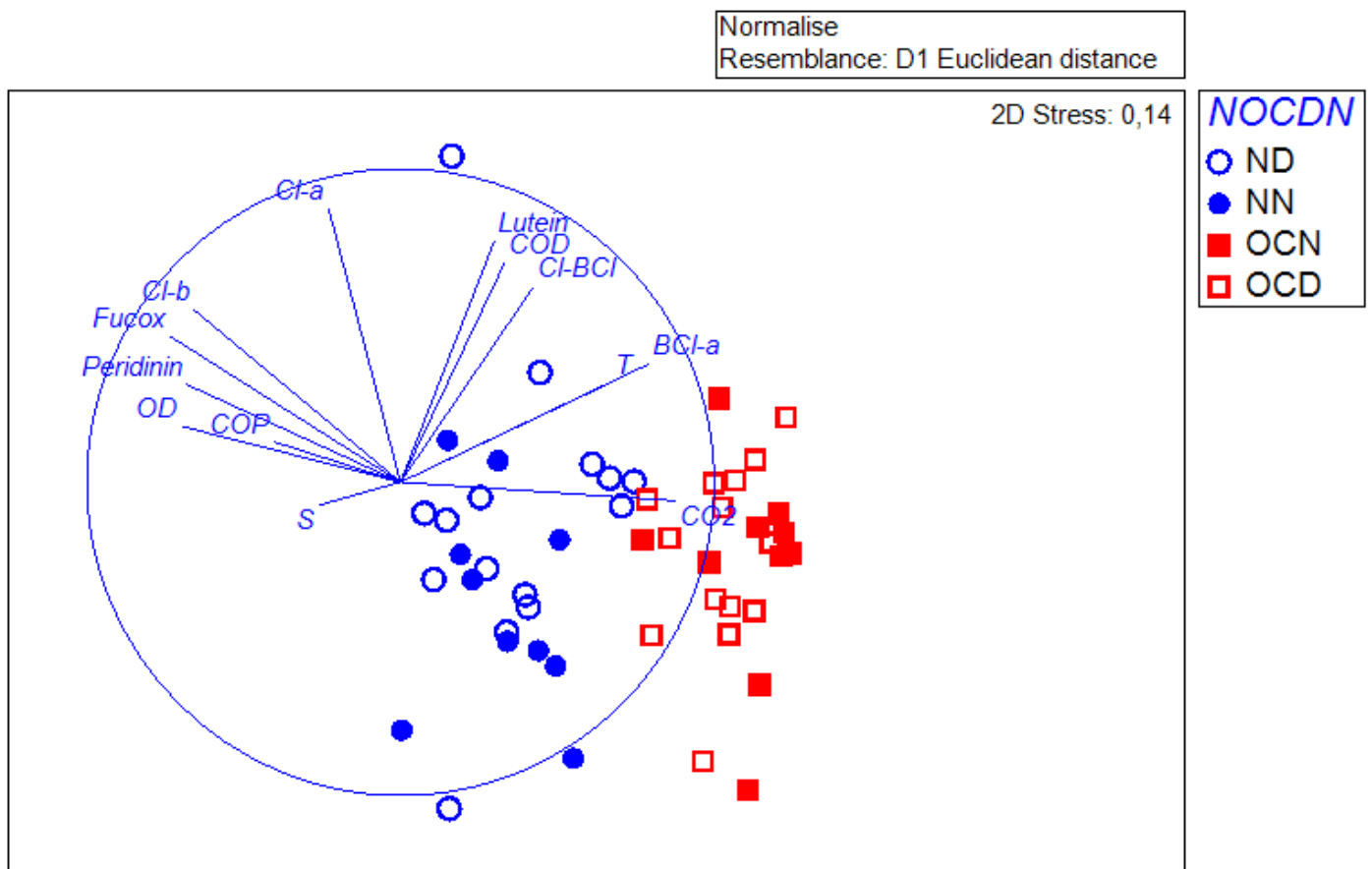
4.3.1 Análise de Escalonamento Multidimensional

A Análise de Escalonamento Multidimensional (MDS) separou as amostras do período normal (cor azul) e da onda de calor (vermelha), com tendência a separar as amostras que representam o momento do dia (símbolo vazado) e da noite (símbolo cheio) (Figura 8). As amostras dos dias 10 a 14/01/2022, identificadas como período normal, encontram-se na extrema esquerda, enquanto as amostras dos dias 15 a 19/01/2022, caracterizadas como período de OCA, estão na extrema direita.

As concentrações de oxigênio dissolvido (OD), clorofila-*a* (Cl-*a*), clorofila-*b* (Cl-*b*), peridininina (Peridinin), fucoxantina (Fucox) e carbono orgânico particulado (COP) estão positivamente correlacionados entre si e ao período normal. Estas variáveis estão correlacionadas negativamente com temperatura (T), dióxido de carbono (CO₂), carbono orgânico dissolvido (COD), clorofila-*a* de cianobactéria

(BCI-a), clorofila-*a*/bacterioclorofila-*a* (CI-BCI) e luteína (Lutein), que aumentam com a ocorrência da onda de calor.

Figura 8 – Análise de Escalonamento Multidimensional (MDS) sobre as variáveis temperatura (T), oxigênio dissolvido (OD), dióxido de carbono (CO₂), salinidade (S), carbono orgânico dissolvido (COD) e particulado (COP) e pigmentos fotossintéticos clorofila-*a* (Cl-*a*), clorofila-*b* (Cl-*b*), clorofila de cianobactéria (BCI-*a*), clorofila-*a*/bacterioclorofila-*a* (CI-BCI), peridina (Peridinin), luteína (Lutein) e fucoxantina (Fucox). Agrupamento por fatores: período normal (N) e período onda de calor (OC), para o dia (D) e noite (N).



Fonte: a autora (2023).

4.3.2 Análise de variância permutacional multivariada

A Análise de variância permutacional multivariada (PERMANOVA) aplicada sobre o conjunto de variáveis, indicou que os fatores temporais são significativamente diferentes entre si ($p < 0,05$), ou seja, a ocorrência da OCA exerceu efeito sobre as variáveis, bem como o momento da amostragem que representa o período do dia e da noite (Tabela 5). A ausência de interação entre os fatores ($p > 0,05$) indica que os efeitos dos diferentes fatores sobre as variáveis não são dependentes uns dos outros, logo, o efeito do dia e da noite sobre as variáveis não é modificada pela presença ou ausência da onda de calor e vice versa.

Tabela 5 – Resultados da Análise de variância permutacional multivariada (PERMANOVA) para os agrupamentos por fatores: período normal (N) e período onda de calor (OC), para o dia (D) e noite (N).

Fatores	Pseudo-F	p-valor
NOC	20,2	0,001
DN	4,8	0,002
NOC x DN	1,3	0,243

Fonte: a autora (2023).

5 DISCUSSÃO

Os resultados deste trabalho reforçam a necessidade de um olhar global para as mudanças climáticas e as consequências negativas da interação de um evento extremo de onda de calor (agudo) e da eutrofização (crônica) em ecossistemas marinhos costeiros, como as lagoas. Reduções extremas de oxigênio dissolvido na água, reforçam que a combinação destes estressores condiciona a formação e expansão de zonas mortas para águas superficiais (BRAUKO et al., 2020), além da modificação na caracterização do carbono inorgânico e orgânico e da comunidade fitoplanctônica (pigmentos). Como consequência, a interação entre a alta disponibilidade de nutrientes e o aquecimento, cada vez mais frequente e intenso, potencialmente contribui para o colapso dos ecossistemas, a danos sociais e econômicos (BREITBURG et al., 2018; SMALE et al., 2019). Neste trabalho, descrevemos pela primeira vez a ocorrência de zona morta em águas superficiais na Lagoa da Conceição associada ao evento climático de OCA.

A análise diária da temperatura do ar e da TSM entre o período de 1992 e 2022 mostra que os eventos de OCAs e de OCMs estão aumentando em frequência e intensidade no Sul do Brasil, como observado por FRONZA (2020) para a OCAs e por Brauko et al. (2020) e Rodrigues et al. (2019) para a OCMs na Baía da Ilha de Santa Catarina e para uma área mais ampla do Atlântico Sul, respectivamente. Não foi detectada ocorrência de OCM no período de interesse deste estudo, entretanto, é importante evidenciar que as temperaturas médias *in situ* na laguna foram mais altas que as temperaturas médias nas águas de plataforma registradas por satélite OISST/NOAA. A seleção da área de amostragem desses dados considerou a proximidade da costa, para ser representativo da laguna. Essa região sofre influência da ressurgência da Água Central do Atlântico Sul (ACAS), água mais fria, sob ventos do quadrante norte, que são mais intensos e frequentes no período de verão (BORDIN et al., 2019). Essa condição de vento foi observada no período deste estudo, o que pode sugerir a ocorrência da ressurgência ou intrusão da ACAS, que resfria a água da plataforma média e externa central de SC, minimizando o efeito da OCA sobre a água do mar.

A ocorrência da OCA, registrada entre 16 e 24 de janeiro de 2022, induziu diferenças positivas na temperatura da água da Lagoa da Conceição, onde os

valores médios de temperatura chegaram a 2,6°C acima do período anterior ao evento. As lagoas de SC, como a Lagoa da Conceição, são sistemas semi-fechados, com elevado tempo de residência da água, que caracteriza a troca limitada de água com o mar adjacente (NETTO et al., 2018; CABRAL et al., 2019). Assim, esses sistemas são mais sensíveis ao aumento da temperatura atmosférica, como observado por Brauko et al. (2020) e Schlegel et al. (2017) em sistemas costeiros fechados com troca de água limitada, o que enfatiza a importância de monitoramento das águas costeiras e sua suscetibilidade frente aos eventos extremos de onda de calor.

A tendência de aquecimento global tem sido registrada desde o início do século XX (NOAA, 2023) simultaneamente com a diminuição nas concentrações de oxigênio (BREITBURG et al., 2018). Essa relação inversa se dá pelo fato de a temperatura ser um fator controlador do oxigênio dissolvido em água (ESTEVES, 2011). O aumento da temperatura diminui a capacidade de solubilização do gás oxigênio pela água e aumenta as demandas metabólicas dos organismos, acelerando a taxa de consumo do oxigênio através da respiração microbiana (HENNEMANN & PETRUCIO, 2011; BREITBURG et al., 2018; ESTEVES, 2011). O sistema costeiro da Lagoa da Conceição é fortemente influenciado pela eutrofização antropogênica, impulsionada pelo enriquecimento de nutrientes e matéria orgânica, que conduz ao crescimento excessivo da biomassa fitoplanctônica e ao associado consumo extra de oxigênio (CABRAL et al., 2019; SILVA et al., 2017). O tratamento deficiente das águas residuais contribui para o enriquecimento de nutrientes e degradação da laguna (CABRAL et al., 2019). A combinação da OCA (efeito agudo) e a eutrofização (efeito crônico) intensifica o esgotamento do oxigênio dissolvido na água, levando à desoxigenação do sistema, como observado em outros sistemas por CUNNINGHAM et al. (2015) e BRAUKO et al. (2020).

Esse estudo detectou, pela primeira vez na Lagoa da Conceição, a condição de hipoxia, concentrações de oxigênio dissolvido abaixo de 2 mg L⁻¹, sob o efeito de uma OCA em águas superficiais. Essa condição, que caracteriza a formação de zona morta, foi observada apenas no período noturno, quando a respiração e o consumo de oxigênio prevalecem no sistema (ESTEVES et al., 2011). No período anterior a onda de calor, valores baixos de oxigênio, entre 2,3 mg L⁻¹ e 3,0 mg L⁻¹, foram registrados no final de dois períodos noturnos. Com a OCA, essa condição

aconteceu em todos os dias, chegando a hipoxia ($< 2 \text{ mg L}^{-1}$). Ou seja, o efeito crônico da eutrofização, que favorece a elevada respiração do sistema, é intensificado durante a onda de calor, associada ao aumento da respiração e da heterotrofia do sistema. BRAUKO et al. (2020) observaram hipóxia na Baía da Ilha de Santa Catarina associada ao evento climático de OCM em 2020, que registrou, pela primeira vez, a ausência de oxigênio (anoxia) na zona de mistura. Vale destacar, que na ausência de OCA, apenas uma vez se registrou zona morta em águas superficiais da Lagoa da Conceição. Isso ocorreu em fevereiro de 2021, quando a Lagoa da Conceição recebeu a entrada de toneladas de N e P pelo rompimento de uma lagoa de evapoinfiltração de esgoto tratado (ETE secundária), que desencadeou um estado de hipereutrofização e uma crise distrófica nunca registrados (ECOANDO, 2023). Salienta-se que a falta de registro pode ser o resultado da ausência de um monitoramento sistemático da qualidade da água da Lagoa da Conceição, apesar da sua importância sócio-econômica (CABRAL et al., 2019).

De acordo com a legislação ambiental brasileira (CONAMA N° 357/2005), o limite para concentração de oxigênio dissolvido em corpos de águas salobras de Classe 1 é de 5 mg L^{-1} , considerando a importância da laguna para a pesca e para as atividades de lazer de contato primário com a água. Concentrações de oxigênio dissolvido abaixo desse limite permitido foram registradas em 60,64% das amostragens na laguna, sendo observadas em maior parte no período noturno (40,30%). Isso reforça que, em condições normais, ou seja, sem a influência da OCA, a qualidade ambiental da água no sistema da Lagoa da Conceição já não está de acordo com o parâmetro de referência CONAMA para oxigênio dissolvido, o que pode afetar negativamente a sobrevivência de espécies sensíveis. Além disso, durante a OCA, as condições fora do parâmetro esperado foram ainda piores, com 49,79% das amostragens fora do padrão, indicando efeito sinérgico da eutrofização com a onda de calor, como identificado por Brauko et al. (2020) na Baía da Ilha de Santa Catarina. Isso é significativo quando há uma comunidade tradicional de pesca na Lagoa da Conceição que relacionam a perda da qualidade ambiental e do pescado com a eutrofização, afetando o seu modo de vida (RIOS, 2017). Assim como relatado por Veiga & Magrini (2011) e Silva et al. (2019), percebe-se que os padrões de qualidade da água e os limites de lançamento de poluentes nos sistemas

aquáticos brasileiros são ineficazes e não consideram as particularidades de cada ambiente, impondo padrões generalistas para todos os corpos de água. Em contrapartida, estudos vêm demonstrando o potencial do sensoriamento remoto para gerenciar a qualidade das águas costeiras e interiores, levando em consideração fatores como descarga de rios e proliferação nocivas de algas (LOBO et al., 2021; SCHAEFFER et al., 2012; NCCOS, 2023).

O fitoplâncton e o bacterioplâncton são os principais componentes responsáveis pelas vias metabólicas de produção primária e respiração na Lagoa da Conceição (FONTES et al., 2009; 2011) e respondem diferentemente ao aumento de temperatura nos ecossistemas aquáticos (Winder & Sommer, 2012). A redução da concentração do oxigênio dissolvido durante a OCA, concomitante ao aumento da concentração de gás carbônico e do carbono orgânico dissolvido indica maior atividade respiratória da comunidade planctônica, devido a decomposição da matéria orgânica. Além disso verificou-se uma tendência na composição dos pigmentos fitoplanctônicos associados a OCA. A técnica utilizada para avaliar os pigmentos fitoplanctônicos permite avaliar os pigmentos como traçadores químicos dessa comunidade (PEREIRA et al., 2007; KRAMER & SIEGEL, 2019). Por exemplo, como indicado por esses autores, a presença de peridinina está relacionada ao grupo de dinoflagelados e a fucoxantina às algas pardas (como as diatomáceas e os dinoflagelados). Com base nisso, verificou-se uma diminuição significativa de pigmentos que representam esses grupos, enquanto houve um aumento de pigmentos associados a cianobactéria (clorofila bacteriana) e ao sistema de proteção contra fotoxidação das algas verdes (luteína), como as euglenófitas (HENRIKSEN et al., 2002). Considerando que as diatomáceas e os dinoflagelados são organismos microplanctônicos (20 a 200 μm) e as cianobactérias e euglenófitas são nanoplanctônicas (2 a 20 μm) (HIRATA et al., 2008), espera-se que a OCA tenha afetado a estrutura da cadeia alimentar, favorecendo organismos menores na base da cadeia alimentar.

Com as temperaturas médias globais projetadas para exceder 1,5° C em curto prazo, as temperaturas da água seguirão essa tendência de aquecimento (IPCC, 2023). Isso levará a mudanças no regime térmico dos habitats (CARNEIRO et al., 2020), excedendo as tolerâncias térmicas de muitos organismos (SMALE et al. 2019) e amplificando as mudanças na estrutura e funcionamento dos ecossistemas

marinhos costeiros que são adicionalmente impactados por estressores de escala regional e local, como a eutrofização. Em resumo, os resultados deste estudo mostram que a ocorrência de um evento de OCA como resultado das mudanças climáticas globais, amplificou os sintomas de eutrofização existente na Lagoa da Conceição. Além disso, outros estudos (BRAUKO et al., 2020; CABRAL et al., 2019; CARNEIRO et al., 2020) reforçam a importância de estratégias de gestão costeira e políticas de conservação para a mitigação e adaptação dos ecossistemas marinhos costeiros frente à crescente poluição por nutrientes e aos eventos extremos de calor decorrentes das mudanças climáticas antropogênicas.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho investigou a ocorrência de OCAs e OCMs para a região da Ilha de Santa Catarina, no período de 10 a 27 de janeiro de 2022. Não foi detectada ocorrência de OCM, no entanto, um evento de OCA moderado foi registrado. Além disso, os resultados indicam o aumento tanto no número de eventos como na intensidade máxima desde os anos 2000, o que coincide com a tendência de aquecimento oceânico e a intensificação de eventos extremos, já relatados em outros estudos.

A OCA demonstrou que o fenômeno de aquecimento, associado às mudanças climáticas globais, induziu mudanças significativas nos parâmetros físico-químicos da água e na expansão da zona morta para águas superficiais da Lagoa da Conceição. Apesar da falta de dados *in situ* e ausência de estudos sobre os impactos de ondas de calor na biogeoquímica de sistemas costeiros lagunares, foi possível identificar a ocorrência de um evento atmosférico e seu impacto no sistema. Considerando a tendência de aumento na frequência, quantidade e intensidade dos eventos de calor, devido ao agravamento das mudanças climáticas, os estudos sobre os impactos que esses eventos causam nos sistemas costeiros são urgentes, levando em consideração a também tendência de aumento da ocupação humana em zonas costeiras e, conseqüentemente, a intensificação da eutrofização.

REFERÊNCIAS

- AMERICO JR, O. (2018). Caracterização morfosedimentar do setor Central da Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina-SC.
- ANDRADE, R., C. Estudo da Circulação Hidrodinâmica da Lagoa da Conceição. 2001. Dissertação de mestrado em Engenharia Oceânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- BARROS, G. D.; FONSECA, A. L. D. O.; SANTOS, A. C. D.; FONTES, M. L. S.; VARELA, A. R. D.; FRANCO, D. (2017). Nutrient distribution in a shallow subtropical lagoon, south Brazil, subjected to seasonal hypoxic and anoxic events. *Brazilian Journal of Oceanography*, 65, 116-127.
- BORDIN, L. H., MACHADO, E. D. C., CARVALHO, M., FREIRE, A. S., & FONSECA, A. L. (2019). Nutrient and carbon dynamics under the water mass seasonality on the continental shelf at the South Brazil Bight. *Journal of Marine Systems*, 189, 22-35.
- BRAUKO, K. M.; CABRAL, A.; COSTA, N.V; HAYDEN, J.; DIAS, C. E.; LEITE, E. S.; ... & HORTA, P. A. (2020). Marine heatwaves, sewage and eutrophication combine to trigger deoxygenation and biodiversity loss: A SW Atlantic case study. *Frontiers in Marine Science*, 7, 590258.
- BREITBURG, D., LEVIN, L. A., OSCHLIES, A., GRÉGOIRE, M., CHAVEZ, F. P., CONLEY, D. J., ... & ZHANG, J. (2018). Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science*, 359(6371), eaam7240.
- CABRAL, A. & FONSECA, A. (2019). Coupled effects of anthropogenic nutrient sources and meteo-oceanographic events in the trophic state of a subtropical estuarine system. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 225, 106228.
- CABRAL, A.; BERCOVICH, M. V.; FONSECA, A. (2019). Implications of poor-regulated wastewater treatment systems in the water quality and nutrient fluxes of a subtropical coastal lagoon. *Regional Studies in Marine Science*, 29, 100672.
- CARNEIRO, A. P., SOARES, C. H. L., MANSO, P. R. J., & PAGLIOSA, P. R. (2020). Impact of marine heat waves and cold spell events on the bivalve *Anomalocardia flexuosa*: a seasonal comparison. *Marine environmental research*, 156, 104898.
- CLARET, M., GALBRAITH, E. D., PALTER, J. B., BIANCHI, D., FENNEL, K., GILBERT, D., & DUNNE, J. P. (2018). Rapid coastal deoxygenation due to ocean circulation shift in the northwest Atlantic. *Nature climate change*, 8(10), 868-872.
- CONAMA 357/05 (2005). Resolução normativa do Conselho Nacional do Meio Ambiente sobre qualidade da água de corpos de água superficial, Brasil.
- COOK, F., SMITH, R. O., ROUGHAN, M., CULLEN, N. J., SHEARS, N., & BOWEN, M. (2022). Marine heatwaves in shallow coastal ecosystems are coupled with the atmosphere: Insights from half a century of daily in situ temperature records. *Frontiers in Climate*, 4, 1012022.

CUNNINGHAM, J., EASTERLING, K., CRAIG, C., & SHERMAN, R. (2015). Is that Bo? No, it's DO: Eutrophication. *Journal of Introductory Biology Investigations*, 2.

ESTEVEZ, Francisco de Assis. *Fundamentos de limnologia*. 3 ed. Rio de Janeiro: Interciência: 2011.

FERREIRA, J. G., BRICKER, S. B., & SIMAS, T. C. (2007). Application and sensitivity testing of a eutrophication assessment method on coastal systems in the United States and European Union. *Journal of Environmental Management*, 82(4), 433-445.

FONSECA, A. & BRAGA, E. S. (2006). Temporal dynamic of the dissolved nutrients and the eutrophication processes in a southern Brazilian coastal lagoon, Conceição Lagoon. *Journal of Coastal Research*, 1229–1233.

FONSECA, A. (2006). Efeito da drenagem urbana nas características físico-químicas e biológicas da água superficial na Lagoa da Conceição (Florianópolis, SC, Brasil). *Biotemas*, 19(2), 7-16.

FONSECA, A. L., NEWTON, A., & CABRAL, A. (2021). Local and meso-scale pressures in the eutrophication process of a coastal subtropical system: Challenges for effective management. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 250, 107109.

FONTES, M. L. S., & ABREU, P. C. (2009). Spatiotemporal variation of bacterial assemblages in a shallow subtropical coastal lagoon in Southern Brazil. *Microbial ecology*, 58, 140-152.

FONTES, M. L. S., CAVELLUCCI, R., LAURENTI, A., MACHADO, E. C., CAMARGO, M. G., & BRANDINI, N. (2006). Detection of environmental impact on variations in dissolved nutrients and Chl-a in the Conceição Lagoon, Florianópolis, SC, Brazil. *Journal of Coastal Research*, 1407-1411.

FONTES, M. L. S., SUZUKI, M. T., COTTRELL, M. T., & ABREU, P. C. (2011). Primary production in a subtropical stratified coastal lagoon—contribution of anoxygenic phototrophic bacteria. *Microbial ecology*, 61, 223-237.

FRONZA, E. E. (2020). *Caracterizando Ondas de Calor no Centro-sul do Brasil, de 1980 a 2019*.

HARTLEY, A., & TANDON, A. (2022). *The Impacts of Climate Change*. , 10.

HENNEMANN, M. C., & PETRUCIO, M. M. (2011). Spatial and temporal dynamic of trophic relevant parameters in a subtropical coastal lagoon in Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 181, 347-361.

HENRIKSEN, P., RIEMANN, B., KAAS, H., SORENSEN, H. M., & SORENSEN, H. L. (2002). Effects of nutrient-limitation and irradiance on marine phytoplankton pigments. *Journal of Plankton Research*, 24(9), 835-858.

HIDRATA, T., AIKEN, J., HARDMAN-MOUNTFORD, N., SMYTH, T. J., & BARLOW, R. G. (2008). An absorption model to determine phytoplankton size classes from satellite ocean colour. *Remote Sensing of Environment*, 112(6), 3153-3159.

HOBDAJ, A. J. et al. A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography*, v. 141, p. 227–238, 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Temperatura média atinge recorde no Brasil pelo quinto mês seguido. Ministério da Agricultura e Pecuária, 2023.

Disponível em:

<https://portal.inmet.gov.br/noticias/temperatura-m%C3%A9dia-atinge-recorde-no-brasil-pelo-quinto-m%C3%AAs-seguido>. Acesso em: 8 de dezembro de 2023.

IPCC, 2023: Sections. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

KRAMER, S. J., & SIEGEL, D. A. (2019). How can phytoplankton pigments be best used to characterize surface ocean phytoplankton groups for ocean color remote sensing algorithms?. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(11), 7557-7574.

LISS, A., WU, R., CHUI, K. K. H., & NAUMOVA, E. N. (2017). Heat-related hospitalizations in older adults: An amplified effect of the first seasonal heatwave. *Scientific reports*, 7(1), 39581.

LOBO, F. D. L., NAGEL, G. W., MACIEL, D. A., CARVALHO, L. A. S. D., MARTINS, V. S., BARBOSA, C. C. F., & NOVO, E. M. L. D. M. (2021). AlgaeMAp: Algae bloom monitoring application for inland waters in Latin America. *Remote Sensing*, 13(15), 2874.

MULI, C., GERBER, N., SAKKETA, T., & MIRZABAEV, A. (2018). Ecosystem tipping points due to variable water availability and cascading effects on food security in Sub-Saharan Africa.

NCCOS National Centers for Coastal Ocean Science, Harmful Algal Bloom (HAB) Forecasting, acesso em outubro de 2023 em <https://coastalscience.noaa.gov/project/harmful-algal-bloom-hab-forecasting/>

NETTO, S. A., PAGLIOSA, P. R., COLLING, A., FONSECA, A. L., & BRAUKO, K. M. (2018). Benthic estuarine assemblages from the Southern Brazilian marine ecoregion. *Brazilian estuaries: a benthic perspective*, 177-212.

NEWTON, A.; ICELY, J.; CRISTINA, S.; BRITO, A.; CARDOSO, A. C.; COLIJN, F.; ... ZALDÍVAR, J. M. (2014). An overview of ecological status, vulnerability and future perspectives of European large shallow, semi-enclosed coastal systems, lagoons and transitional waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 140, 95-122.

NIXON, S. W. Coastal marine eutrophication: A definition, social causes, and future concerns. *Ophelia*, v. 41, n. 1, p. 199–219, 20 fev. 1995.

NOAA National Centers for Environmental Information, Monthly Global Climate Report for Annual 2022, published online January 2023, retrieved on May 5, 2023 from <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202213>.

NOAA National Centers for Environmental Information, Monthly Global Climate Report for October 2023, published online November 2023, retrieved on December 1, 2023 from <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202305>.

OLIVER, E. C.; BURROWS, M. T.; DONAT, M. G.; SEN GUPTA, A.; ALEXANDER, L. V.; PERKINS-KIRKPATRICK, S. E.; ... & SMALE, D. A. (2019). Projected marine heatwaves in the 21st century and the potential for ecological impact. *Frontiers in Marine Science*, 6, 734.

OLIVER, E. C.; DONAT, M. G.; BURROWS, M. T.; MOORE, P. J.; SMALE, D. A.; ALEXANDER, L. V.; ... & WERNBERG, T. (2018). Longer and more frequent marine heatwaves over the past century. *Nature communications*, 9(1), 1-12.

ONU. Documentos Temáticos - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 1, 2, 3, 5, 9 e 14. Brasília: ONU-BR, 2017.

PEREIRA, M. G., ICELY, J., MUDGE, S., NEWTON, A., & RODRIGUES, R. (2007). Temporal and spatial variation of phytoplankton pigments in the western part of Ria Formosa Lagoon, Southern Portugal. *Environmental Forensics*, 8(3), 205-220.

R CORE TEAM (2023). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

RAYBAUT, P. Spyder-documentation. Available online at: pythonhosted.org, 2009.

RIOS, M. C. F. A. (2017). Percepção da Qualidade Ambiental da Lagoa da Conceição pelos Pescadores Artesanais e sua Relação com a Pesca: Ilha de Santa Catarina, Brasil. Trabalho de Conclusão de Curso de Oceanografia-UFSC.

SANDERSON, K. (2023). Earth's average 2023 temperature is now likely to reach 1.5° C of warming. *Nature*.

SCHAEFFER, B. A., HAGY, J. D., CONMY, R. N., LEHRTER, J. C., & STUMPF, R. P. (2012). An approach to developing numeric water quality criteria for coastal waters using the SeaWiFS satellite data record. *Environmental science & technology*, 46(2), 916-922.

SCHLEGEL R. W.; SMIT A. J. (2018). "heatwaveR: A central algorithm for the detection of heatwaves and cold-spells." *Journal of Open Source Software*.

SILVA, F. D., OLIVEIRA-ANDREOLI, E. Z., MACHADO, R., TEODORO, C. C., LÓPEZ, F. M. A., FUSHITA, A. T., ... & BIANCHINI JR, I. (2019). Aspects that should be considered in a possible revision of the Brazilian Guideline Conama Resolution 357/05. *MOJ Ecology & Environmental Sciences*, 4(5), 195-197.

SILVA, V. E. C. 2016. Análise espaço temporal do estado trófico de uma laguna costeira subtropical: Lagoa da Conceição, Florianópolis, Santa Catarina.

SILVA, V. E. C.; FRANCO, D.; FONSECA, A. L.; FONTES, M. L.; DONNANGELO, A. R. (2017). Space time evolution of the trophic state of a subtropical lagoon: Lagoa da Conceição, Florianópolis Island of Santa Catarina, Brazil. *RBRH*, 22.

SMALE, D. A., WERNBERG, T., OLIVER, E. C., THOMSEN, M., HARVEY, B. P., STRAUB, S. C., ... & MOORE, P. J. (2019). Marine heatwaves threaten global biodiversity and the provision of ecosystem services. *Nature Climate Change*, 9(4), 306-312.

TEBALDI, E., & BEAUDIN, L. (2016). Climate change and economic growth in Brazil. *Applied Economics Letters*, 23(5), 377-381.

TRENBERTH, K. E., JONES, P. D., AMBENJE, P., BOJARIU, R., EASTERLING, D., KLEIN TANK, A., ... & ZHAI, P. (2007). Observations. Surface and atmospheric climate change. Chapter 3.

VEIGA, L. B. E., & MAGRINI, A. (2011). Water resources management: suggestions to the Brazilian model based on the American experience. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 145, 39-50.

ZUO, J., PULLEN, S., PALMER, J., BENNETTS, H., CHILESHE, N., & MA, T. (2015). Impacts of heat waves and corresponding measures: a review. *Journal of Cleaner Production*, 92, 1-12.