

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS  
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS**

**Luiza Soares Ferreira Guimarães**

**Metanálise do efeito térmico de usinas nucleares costeiras sobre a biodiversidade local**

Juiz de Fora

2022

**Luiza Soares Ferreira Guimarães**

**Metanálise do efeito térmico de usinas nucleares costeiras sobre a biodiversidade local**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Ciências Biológicas da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito à obtenção do título de Bacharel em Ciências Biológicas.

Orientadora: Prof. Dra. Simone Jaqueline Cardoso

Juiz de Fora

2022

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Soares Ferreira Guimarães, Luiza.

Metanálise do efeito térmico de usinas nucleares costeiras sobre a biodiversidade local / Luiza Soares Ferreira Guimarães. -- 2022.  
73 p. : il.

Orientadora: Simone Jaqueline Cardoso

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto de Ciências Biológicas, 2022.

1. poluição térmica. 2. variação de temperatura. 3. comunidades aquáticas. 4. efluente térmico. 5. biodiversidade costeira. I. Jaqueline Cardoso, Simone, orient. II. Título.

**Luiza Soares Ferreira Guimarães**

**Metanálise do efeito térmico de usinas nucleares costeiras sobre a biodiversidade local**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Ciências Biológicas da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito à obtenção do título de Bacharel em Ciências Biológicas.

Aprovada em 16 de agosto de 2022

**BANCA EXAMINADORA**

---

Dra. Simone Jaqueline Cardoso - Orientadora  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Me. Nathália da Silva Resende  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Dr. Leonardo Mitrano Neves  
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Dedico este trabalho a todos os profissionais que lutam pela valorização da ciência, da educação pública de qualidade e pela conservação do meio ambiente.

## AGRADECIMENTOS

Estes agradecimentos vêm sendo escritos há um bom tempo, antes mesmo de eu chegar à metade do trabalho propriamente dito. Escrevo com tamanha antecipação para me lembrar todos os dias que esse é um caminho que não percorro sozinha, embora pareça solitário e não raras vezes, impossível, como tem parecido nos últimos meses. Eu sempre achei um tanto quanto estranho eternizar em um documento agradecimentos muito específicos e direcionados. Hoje, já não me pego pensando tanto nisso, pouco me preocupa na verdade. Não porque tenho certeza do futuro, mas porque entendo a importância dessas pessoas no meu presente, principalmente durante todo esse processo de conclusão de curso. Dito isso, não vou poupar minhas palavras. Quero mesmo que se eternizem, que se demorem, que vocês sempre lembrem do meu carinho e da minha gratidão.

Escrevo me lembrando dos esforços do meu pai, que sempre trabalhou incansavelmente para que eu e meu irmão tivéssemos o privilégio de nos dedicarmos exclusivamente aos nossos estudos. Ele, que percebendo meus gostos simples, sempre encontrou espaço no meu mundo, me acompanhando no mar, em trilhas e na vida. Pai, eu admiro sua bondade, sua competência e seu comprometimento com tudo que você se propõe a fazer. Agradeço por te ter como um exemplo genuíno de esforço e humildade.

Escrevo me lembrando do cuidado da minha mãe, que nos meus dias difíceis, ligava preocupada pedindo que eu fosse para casa. Provavelmente com alguns doces e comidas que eu gosto à minha disposição. Mãe, eu admiro sua força, sua entrega e seu olhar sempre atento. Espero que a gente sempre caminhe lado a lado com muito respeito e compreensão!

Escrevo me lembrando do meu irmão. Ele tem um olhar carinhoso, que me acolhe, me ama e me reconhece. Ele pouco sabe o que faço na universidade ou do que se trata esse trabalho que apresento, só sabe que é o mais recente motivo que justifica minhas ausências. E ele cobra presença. Ele rotineiramente cobra. Não é o tipo de cobrança que consome, é o tipo de cobrança que preenche. Me preenche de amor e afeto por enxergar que ele não demanda de mim nada que não sou. Me preenche de um sentimento, que de tempos em tempos é posto em xeque no meio acadêmico: o de ser suficiente. Obrigada por ser meu melhor amigo e me motivar a seguir em frente. Eu amo muito você.

Preciso agradecer imensamente às minhas amigas e parceiras de trabalho, porque sem elas eu certamente teria tido mais dificuldade para enfrentar os dias ruins e menos disposição para apreciar os bons. Júlia, Nathália, Mariana e Luana, eu sou muito feliz por ter cruzado meu caminho com vocês. Vocês foram minha família e meu conforto durante esses anos morando longe de casa. Passamos por muito juntas, noites em claro na tentativa de entregar o melhor que podíamos, manhãs exaustivas na correria do dia a dia, mas sempre com um espaço de risada, conselho e acolhimento, que fazia tudo parecer possível (e era).

Ju, você é uma daquelas pessoas que aparecem instantaneamente quando precisam de você. E aparece de carro, o que sempre me ajudou em horários de ônibus lotado. Nós sempre encontramos um certo alívio uma na outra, acho que por sentir tanto de forma tão parecida. Agradeço muito pelo espaço de escuta e compreensão que a gente criou nesses anos.

Nat, sua dedicação, inteligência e disposição genuína em ajudar os outros sempre me impressionaram muito. Muito obrigada por toda paciência em me ajudar com o mapa desse trabalho! Você me inspira um tanto e eu espero sempre poder retribuir tudo que você fez e faz por mim!

Mari, te agradeço por toda preocupação e cuidado que você sempre teve comigo. Fico muito orgulhosa de ver tudo que você conquistou na universidade, pessoalmente e profissionalmente. Você valorizou e confiou, a todo momento, em tudo que eu fiz ao longo da graduação, quando eu mesmo não conseguia.

Luana, seu nome ficou aqui parado por muitos e muitos meses, como um lembrete. Eu venho adiando o processo de me direcionar a você nesse texto. Venho adiando por muitos motivos. Um deles, talvez o principal, seja o de lembrar. Lembrar tantos dias de presença em um momento de despedidas. Nós sempre falamos que nossa amizade foi um encontro daqueles muito raros na vida. Amizades assim reverberam, tocam e atravessam. Às vezes, ao longo desses anos, saber que estávamos juntas nesse processo bastava para me confortar. Muito obrigada por ter me acolhido dentro da sua casa, da sua vida e da sua família.

Agradeço à minha amiga Bruna, com quem estive dividindo a casa, as contas e os dias ao longo desses 5 anos. Desde a escola você está comigo, sendo meu apoio e meu conforto sempre. A gente se conheceu e se enxergou mais ainda, nos melhores e piores dias, sem nunca deixar de estar lá uma pela outra. Isso só me fez prezar pela sua companhia cada dia mais. Eu gostaria que todo mundo tivesse o privilégio de conviver com você, porque como eu já te disse: acompanhar você é ver a todo momento um exemplo do que é crescer com maturidade, pé no chão e a leveza de quem aprendeu a viver respeitando, abraçando e sendo paciente com cada mudança.

Agradeço às minhas amigas Gabriela e Raquel, que me acompanham há muitos anos e mesmo seguindo caminhos distintos, morando em estados diferentes, continuam sendo parte da minha saudade de casa e minha lembrança mais constante de solidez, de relações que atravessam o tempo e todas as barreiras de espaço.

Agradeço aos meus amigos de curso e de laboratório por todas as conversas, troca de experiências e aprendizado. Vocês me deram suporte a todo momento e sempre se mostraram disponíveis a ajudar. Agradeço, em especial, à Gabi, que esteve colaborando diretamente neste projeto desde o início. Você chegou tem pouco tempo, mas talvez tenha me ouvido falar sobre esse trabalho mais do que qualquer um, sendo sempre paciente por saber o quão importante é para mim. Obrigada pela escuta incansável, pelas longas ligações, por entender meus dilemas e me dar abertura para enxergar os seus, por ser minha parceira de trabalho e minha amiga, e por me inspirar diariamente com sua postura profissional.

Agradeço a todos os professores e professoras com quem pude aprender muito além das disciplinas. Todos que cruzaram meu caminho foram essenciais na minha formação pessoal e acadêmica. Com vocês, descobri como era incrível ter uma aula prática, fazer um campo, participar de monitoria, escrever um projeto e tê-lo aprovado. Descobri como a biologia era muito maior do que eu imaginava e que eu podia experimentar de tudo um pouco. Descobri que o sentimento de pertencimento que me faltava eu encontraria na zoologia e que lá eu construiria meu caminho por várias portas.

Agradeço à Simone, minha orientadora, que mergulhou nessa ideia comigo e me deu todo suporte e assistência na execução desse trabalho. É muito difícil para mim externalizar tudo que você representa, porque você é muito além do que eu esperava encontrar de um professor e orientador da graduação. Você se tornou minha orientadora e amiga. Você sempre me ofereceu palavras de cuidado, gentileza e preocupação quando tudo que eu conseguia fazer era desacreditar. Você me deu a mão todas as vezes para que eu pudesse seguir acreditando no bom trabalho que estava fazendo, ainda que você tivesse tantas outras preocupações e compromissos no momento. Eu acho que sempre me faltarão palavras para expressar o tamanho da minha gratidão e admiração. Admiração por ver você lecionando e orientando com tanto comprometimento, sem nunca perder a sensibilidade e a empatia para lidar com o outro. Admiração por ver você recebendo as pessoas com um sorriso e um café toda vez que te procuram, ainda que pessoalmente você não esteja no seu melhor dia. Admiração pelo apoio incondicional que você me deu em relação a tudo que eu quis fazer paralelamente a este trabalho. Admiração por ver você dedicando seu tempo para explicar, direcionar e acalmar. Admiração por ter você fazendo a diferença em um caminho que, como eu disse iniciando esse texto, parece tão solitário. Você não deixou ser solitário para mim! Meu eterno muito obrigada.

## RESUMO

A elevação da temperatura em decorrência de fatores climáticos e antrópicos tem sido considerada uma das principais causas de alterações nos ecossistemas aquáticos. Em usinas nucleares faz-se necessário o aporte de grande volume de água para sua operação. Essa água é posteriormente devolvida ao corpo d'água com uma temperatura mais elevada. O objetivo deste trabalho foi avaliar o impacto térmico causado pela operação de usinas nucleares costeiras sobre a biodiversidade local e estimar a magnitude da variação térmica entre o local afetado pela descarga do efluente (impactada) e aqueles onde foram mantidas as condições naturais (referência). Para tal, buscas de artigos nas plataformas Scopus e Web of Science foram realizadas e uma metanálise foi conduzida com o uso de critérios de seleção segundo a metodologia PRISMA. O tamanho de efeito da elevação da temperatura foi calculado a partir da diferença de temperatura entre áreas impactadas e de referência utilizando um modelo de efeito misto. A partir de 853 artigos encontrados, 99 foram incluídos na análise qualitativa e 75 foram selecionados para a metanálise. Foram utilizados como moderadores 1 - número de reatores, 2 - capacidade de geração elétrica e 3 - latitude das usinas. O tamanho de efeito geral encontrado foi positivo e significativo, indicando um aumento expressivo da temperatura na área de descarga. Para essa diferença de temperatura, apenas o moderador latitude foi considerado significativo. Considerando os estudos incluídos na análise qualitativa, foram avaliadas 31 usinas nucleares, distribuídas, principalmente, na China e nos Estados Unidos. A análise de conectância mostrou uma baixa interação entre os autores e as palavras-chave mais citadas foram 'Daya Bay' e 'Phytoplankton'. Os principais efeitos reportados nos organismos foram aqueles relacionados a estrutura e composição das comunidades aquáticas, sendo eles: abundância, distribuição, dominância, densidade e riqueza de espécies. Os microrganismos fotossintetizantes (fitoplâncton e microfitobentos) foram os mais citados dentre os grupos afetados, o que pode estar relacionado a sua sensibilidade às mudanças nas condições hidrográficas em decorrência da elevação da temperatura local. Os resultados mostram que na área de descarga do efluente térmico a temperatura atinge temperaturas mais elevadas provocando alterações que podem gerar efeitos em cascata no ecossistema aquático. Esses resultados podem embasar políticas ambientais e aprimorar métodos para instalação e operação das usinas nucleares.

Palavras-chave: poluição térmica; variação de temperatura; comunidades aquáticas; efluente térmico; biodiversidade costeira.

## ABSTRACT

The rise in temperature due to climatic and anthropic factors has been considered one of the main causes of changes in aquatic ecosystems. In nuclear power plants it is necessary to supply large volume of water for its operation. This water is subsequently returned to the aquatic ecosystem at a higher temperature. The objective of this work was to evaluate the thermal impact caused by the operation of coastal nuclear power plants on local biodiversity and to estimate the magnitude of thermal variation between a site affected by the discharge of the effluent (impacted) and another maintained in natural conditions (reference). To this end, article searches on the Scopus and Web of Science platforms were performed and a meta-analysis was conducted using selection criteria according to the PRISMA methodology. From 853 articles found, 99 were included in the qualitative analysis and 75 were selected for the meta-analysis. The effect size of the temperature rise was calculated from the temperature difference between impacted and reference areas using a mixed-effect model. The moderators used were: 1 - number of reactors, 2 - electrical generation capacity and 3 - latitude of the plants. The overall effect size found was positive and significant, indicating a significant temperature increase in the discharge area. For this temperature difference, only the latitude moderator was found to be significant. Considering the studies included in the qualitative analysis, 31 nuclear plants were evaluated and were mainly distributed in China and the United States. The analysis of connectance showed low interaction between the authors and the most cited keywords were 'Daya Bay' and 'Phytoplankton'. The main effects reported in the organisms were those related to the structure and composition of aquatic communities, being abundance, distribution, dominance, density and species richness the most cited ones. Photosynthesizing microorganisms (i.e. phytoplankton and microphytobenthos) were the most cited among the affected groups, which may be related to their sensitivity to changes in hydrographic conditions due to the elevation of local temperature. The results showed that around the discharge of the thermal effluent the temperature reached higher temperatures, which may have lead to environmental changes and cascading effects in the aquatic ecosystem. These results can support environmental policies and improve methods for the installation and operation of nuclear power plants.

Keywords: thermal pollution; temperature variation; aquatic communities; thermal effluent; coastal biodiversity.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Fluxograma PRISMA da busca realizada nas plataformas Scopus e Web of Science contendo o número de artigos encontrados e incluídos na revisão sistemática e na metanálise deste estudo.....	25
Figura 2	– Frequência de publicações sobre os efeitos do efluente térmico de usinas nucleares costeiras na biodiversidade local por intervalo de tempo (década) .....	26
Figura 3	– Periódicos com maiores frequências de publicação sobre os efeitos do efluente térmico de usinas nucleares costeiras na biodiversidade local.....	27
Figura 4	– Rede de interação baseada na lista de autores dos artigos incluídos na revisão sistemática.....	28
Figura 5	– Palavras-chave mais frequentes nos artigos selecionados na revisão sistemática .....	29
Figura 6	– Usinas nucleares avaliadas na revisão sistemática (n = 31).....	30
Figura 7	– Grupos de organismos afetados pelo aumento de temperatura na área de descarga de usinas nucleares.....	31
Figura 8	– Frequência de citação dos parâmetros afetados pelo aumento de temperatura na área de descarga de usinas nucleares a níveis de população, comunidade e ecossistema.....	32
Figura 9	– Forest plot da diferença de temperatura observada entre as áreas impactadas pelos efluentes térmicos e as áreas de referência avaliadas nos estudos primários (k = 82).....	33
Figura 10	– Gráfico de funil para análise de viés de publicação.....	35

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1	–	Resultado dos modelos de meta-regressão testando o efeito dos três moderadores na variação de temperatura entre as áreas impactadas pelos efluentes térmicos e de referência.....	34
Tabela 2	–	Diagnóstico do modelo de efeito misto.....	34

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses

**LISTA DE SÍMBOLOS**

$\Delta T$  Diferença de temperatura

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>18</b>
2.1	BASE DE DADOS .....	18
2.2	CIENCIOMETRIA .....	19
2.3	REVISÃO SISTEMÁTICA .....	19
2.4	METANÁLISE .....	21
2.4.1	MODERADORES E HIPÓTESES ASSOCIADAS .....	22
2.4.2	ANÁLISES ESTATÍSTICAS .....	23
<b>3</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>24</b>
3.1	CIENCIOMETRIA .....	24
3.2	REVISÃO SISTEMÁTICA .....	30
3.3	METANÁLISE .....	32
<b>4</b>	<b>DISCUSSÃO .....</b>	<b>35</b>
4.1	CIENCIOMETRIA.....	34
4.2	REVISÃO SISTEMÁTICA .....	38
4.3	METANÁLISE .....	42
4.4	LIMITAÇÕES DOS ESTUDOS PRIMÁRIOS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	44
4.5	PERSPECTIVAS FUTURAS .....	47
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>48</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>49</b>
	<b>APÊNDICE A – Lista dos artigos incluídos na revisão sistemática e na metanálise .....</b>	<b>60</b>
	<b>APÊNDICE B - Número de artigos incluídos na revisão sistemática por periódico científico .....</b>	<b>68</b>
	<b>APÊNDICE C – Número de reatores e capacidade de geração elétrica (MWe) das usinas nucleares estudadas pelos artigos incluídos na revisão sistemática .....</b>	<b>70</b>
	<b>APÊNDICE D – Gráficos de diagnóstico de pressupostos do modelo de efeito misto utilizado na metanálise .....</b>	<b>73</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento da temperatura, em razão das mudanças climáticas em conjunto com as crescentes pressões antrópicas, tem sido considerado um dos principais fatores responsáveis por causar alterações nos ecossistemas, ocasionando efeitos deletérios para as comunidades biológicas (IPCC, 2019). No ambiente marinho, os efeitos desse aumento já são observados em muitas taxa, com mudanças na distribuição, abundância, diversidade, época reprodutiva e nos processos fisiológicos das espécies (PANKHURST; MUNDAY, 2011; LEWANDOWSKA et al., 2012; GITTINGS et al., 2018; ASSAN et al., 2020).

A resposta de uma espécie à variação da temperatura no tempo e no espaço dependerá tanto dos efeitos diretos a nível individual e populacional quanto dos efeitos indiretos mediados por mudanças na distribuição, abundância e comportamento de competidores, predadores, parasitas e mutualistas (DAVIS et al., 1998; HAWKINS et al., 2009; KORDAS et al., 2011). O aumento da temperatura nos ecossistemas marinhos tem levado, por exemplo, a expansão de espécies tropicais para altas latitudes, o que tem intensificado a atividade de herbivoria sobre recifes de corais, recifes rochosos, prados de capim-marinho e organismos epipelágicos, levando a uma alteração na estrutura dessas comunidades (IPCC, 2019).

Dentre os impactos antropogênicos capazes de induzir estresse térmico na biodiversidade marinha, destaca-se a atividade de usinas nucleares. Na operação dessas usinas faz-se necessário o aporte de grande volume de água para remover o calor residual dos condensadores (ARAÚJO; KUBOTA, 2016). Para que esse processo aconteça, o sistema de refrigeração capta água de rios, lagos, estuários ou mares (*e.g.* HEIN; KOPPEN, 1979; DESCY; MOUVET, 1984; WOLF et al., 2014; DONG et al., 2018) e posteriormente esta água, agora a uma temperatura mais elevada do que a temperatura ambiente, é liberada no corpo d'água correspondente através da saída de descarga (POORNIMA et al., 2005; SZÉCHY et al. 2017).

As primeiras usinas nucleares começaram a operar a partir da década de 1950 e atualmente a energia nuclear representa um importante componente da matriz energética e do desenvolvimento econômico global, sendo responsável por 10% da eletricidade mundial (PRÁVĀLIE; BANDOC, 2018). São mais comuns em regiões de clima temperado, onde a temperatura da água é baixa o suficiente para garantir maior eficiência no processo de resfriamento dos reatores (LANGFORD, 2001). Contudo, também estão situadas em países que possuem regiões de clima tropical, como México, Índia, África do Sul, Argentina e Brasil (TEIXEIRA et al., 2012).

Além de contribuir com o cumprimento da demanda energética, a energia nuclear é vista como uma grande oportunidade para a descarbonização das economias globais por ser uma tecnologia de baixo carbono, diferentemente de usinas que operam à base de combustíveis fósseis (PRÁVĀLIE; BANDOC, 2018). Contudo, ainda assim enfrenta grandes preocupações em relação a segurança humana e a proteção do meio ambiente. Entre elas estão os riscos de acidentes envolvendo radiação, o descarte seguro de resíduos radioativos gerados nos reatores e a descarga do efluente térmico no ambiente (STEINHAUSER et al., 2014; VILANOVA et al., 2004). Essa descarga de água aquecida pode ser letal aos organismos expostos a ela, sobretudo em regiões tropicais, onde a temperatura ambiente já é naturalmente elevada, de modo que um aumento de apenas alguns graus centígrados já seria suficiente para atingir temperaturas acima de 30 °C, sobrepondo-se ao limite térmico da maioria das espécies aquáticas, que está dentro da faixa de 30 - 35 °C (LAWS, 1993).

Alguns impactos ocasionados pela descarga do efluente térmico podem ser evidenciados na alteração da estrutura, composição e metabolismo de muitos organismos, como fitoplâncton e comunidades perifíticas (POORNIMA et al., 2005; CHUANG et al., 2009; LI et al., 2011, LO et al., 2016), macroalgas (KIM et al., 2008; WOLF et al., 2014; SZÉCHY et al., 2017), peixes (TEIXEIRA et al., 2009), zooplâncton (LI et al., 2014; LIN et al., 2018) e comunidades bentônicas (SURESH et al., 1993; LARDICCI, 1999; VILANOVA et al., 2004; DONG et al., 2018). Além disso, esse efluente é capaz de reduzir a atividade de organismos decompositores em razão da depleção de oxigênio causada pelo aumento da temperatura local. Essa redução, somada ao aumento da estratificação térmica, pode comprometer a disponibilidade de nutrientes nos corpos d'água, e, conseqüentemente, reduzir taxas de fotossíntese e produtividade primária (SPEIGHT, 2020).

Outros estudos que avaliaram a influência da descarga térmica de usinas nucleares sobre comunidades marinhas demonstraram ainda que o aumento da temperatura pode causar aumento da abundância de espécies termotolerantes, diminuição da abundância de espécies termossensíveis e redução da riqueza total (SURESH et al., 1993; TEIXEIRA et al., 2012). Ilus e Keskitalo (2008), por sua vez, reportaram um aumento na biomassa de uma espécie de cianobactéria na área de descarga, enquanto Dong et al. (2018) observaram que o aumento da temperatura nessas áreas foi responsável por promover alto crescimento de uma espécie de ostra durante o inverno. Deformidades no esqueleto de peixes e eventos de branqueamento de corais também já foram observados como conseqüências da exposição ao efluente térmico (HUNG et al., 1998; HWANG et al., 1998). Por outro lado, resultados reportando ausência de impacto térmico também foram encontrados. Lardicci e colaboradores (1999), avaliando o impacto do

efluente térmico na variabilidade espacial e abundância de comunidades bentônicas no Golfo di Follonica (Mediterrâneo Ocidental), constataram que não houve alteração na estrutura da comunidade ou na distribuição dos organismos. Corroborando com esse estudo, Dias e Bonecker (2008) reportaram que nenhum efeito negativo foi registrado para as comunidades zooplancônicas na descarga de usinas localizadas na Baía da Ribeira, Angra dos Reis, Brasil.

Além dos diferentes resultados encontrados em relação ao efeito nos organismos, resultados variados também são observados no que diz respeito à diferença de temperatura ( $\Delta T$ ) entre locais que recebem o efluente térmico e que não estão sujeitos a ele (áreas de referência). Keshavmurthy et al. (2012) afirmaram que na área de descarga da usina avaliada a temperatura da água do mar é de 2 a 3 °C mais elevada do que a média obtida para as áreas próximas. Chuang et al. (2009) chegaram a diferenças ainda mais expressivas, reportando um aumento de 8 a 12 °C na temperatura da água na descarga quando comparada a temperatura na região de captação. Por outro lado, Kim e colaboradores (2013) observaram em seu estudo que a temperatura da superfície não diferiu significativamente entre as áreas impactada e de referência.

Embora tratem de usinas de diferentes locais e com características particulares, é importante que essas informações sejam compiladas e trazidas para um contexto global, de modo que seja possível estimar se os estudos tendem a reportar altas ou baixas variações na temperatura a fim de alertar sobre a necessidade de se investigar a resposta dos organismos marinhos a essa alteração térmica.

Apesar das recentes iniciativas de interromper ou reduzir a geração de energia de usinas nucleares em muitos países desenvolvidos (NAM et al., 2021), existem planos para a construção de novas usinas ou reatores, principalmente em países emergentes, devido ao aumento da demanda energética (ALAM et al., 2019). Até o presente momento, existem 437 reatores nucleares em atividade no mundo, e a previsão é de que até 2040, 123 parem de operar e 308 novos iniciem atividade (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2022).

Considerando essa tendência de aumento do número reatores operantes nas próximas décadas e a importância de se compilar resultados contrastantes, tanto em relação ao impacto causado pelo efluente térmico nos organismos quanto em relação a diferença de temperatura observada, o objetivo deste trabalho foi avaliar o impacto térmico causado pela operação de usinas nucleares costeiras sobre a biodiversidade local e realizar uma metanálise da elevação da temperatura na área de saída do efluente.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 BASE DE DADOS

A fim de compilar estudos prévios abordando a elevação da temperatura na área de descarga de usinas nucleares costeiras e seus efeitos nos organismos, foi realizada uma busca em bases de dados utilizando a metodologia PRISMA que compreende um fluxograma de quatro fases: identificação, triagem, elegibilidade e inclusão (MOHER et al., 2015).

A identificação dos estudos foi feita a partir da busca por artigos nas plataformas Scopus e Web of Science utilizando o seguinte código de busca: (Sea\* OR marine OR shore OR ocean\* OR “coastal zone” OR coastline OR estuary) AND (“thermal discharge” OR “thermal pollution” OR “thermal stress” OR temperature OR heat OR “cooling water” OR warming) AND (“Nuclear plant\*” OR “power plant\*” OR “thermal plant\*” OR “power station\*”) AND (zooplankton OR biodiversity OR diversity OR invertebrate\* OR fish OR macroalgal OR algae OR coral\* OR sponge\* OR mollusc\* OR mussel\* OR biomonitoring OR sessile OR phytoplankton OR “sea turtle\*” OR crustacea OR polychaeta OR community OR animal\* OR “marine life” OR benthos) NOT (river\* OR lake\*) e considerando como campos de busca título, resumo e palavras-chave dos estudos.

Na busca, foram considerados apenas artigos científicos em inglês e revisados por pares publicados até dia 7 de junho de 2021. Após a remoção de duplicatas (artigos encontrados em mais de uma base), os artigos restantes passaram para a primeira etapa de triagem, onde a elegibilidade dos artigos foi avaliada por meio do título e resumo. Na segunda etapa de triagem, os artigos selecionados na etapa anterior foram lidos na íntegra.

A fim de se aumentar o número e abrangência de estudos sobre o tema, avaliou-se também a literatura citada nos trabalhos selecionados. Uma vez atendendo aos critérios de inclusão, esses estudos foram incorporados à base de dados.

Os critérios de elegibilidade dos estudos foram definidos de acordo com os critérios de inclusão e de exclusão estabelecidos previamente. Foram considerados apenas: (1) artigos que tratassem de usinas nucleares cuja descarga térmica ocorria no mar, estuário ou lagoa costeira; (2) artigos que avaliassem o impacto da descarga térmica de usinas nucleares sobre a biodiversidade costeira local; (3) artigos em que pelo menos um dos resultados apresentados fosse obtido a partir de dados coletados *in situ*. Foram desconsiderados: (1) artigos de revisão ou de metanálise; (2) artigos que propusessem modelos preditivos sobre o impacto térmico de usinas nucleares a serem construídas; (3) artigos que tratassem exclusivamente de experimentos conduzidos em laboratório para aclimação dos organismos e simulação de condições ambientais; (4) artigos que não especificassem o tipo de usina térmica, sua localidade ou

coordenadas ou nome; (5) artigos que trabalhassem, exclusivamente, com modelagem ecológica e (6) artigos que não apresentassem dados de temperatura em relação a área impactada pelo efluente térmico.

## 2.2 CIENCIOMETRIA

Após a seleção dos estudos elegíveis pelos critérios de inclusão e exclusão (aqui chamados de estudos primários), foram extraídas informações para as análises bibliométricas.

O número de publicações por intervalo de tempo (a cada década) e por periódico foi obtido para analisar, respectivamente, a evolução temporal da produção científica a respeito do impacto térmico de usinas nucleares e para verificar quais periódicos possuem a maior frequência de publicações.

A fim de se avaliar a interação entre os autores dos estudos primários, realizou-se uma análise de conectância a partir da lista de autores apresentadas nos estudos. Para construir a rede de conectância foi utilizado o software R versão 4.1.3 (R CORE TEAM, 2020) e foram utilizados os pacotes “scholar” v. 0.1.5 (KEIRSTEAD, 2016), “networkDynamic” v.0.11.2 (BUTTS et al., 2021), “ndtv” v 0.13.2 (BENDER-DEMOLL, 2021), “igraph” (CSARDI; NEPUSZ, 2006), “statnet” v. 3.9.4 (HANDCOCK et al., 2018), “intergraph” v. 2.0-2 (BOJANOWSKI, 2015), “visNetwork” v. 2.1.0 (ALMENDE et al., 2021), “dplyr” v. 1.0.9 (WICKHAM et al., 2022) e “stringr” v. 1.0.9 (WICKHAM, 2019). A conectância foi calculada utilizando a função `networklevel` e o pacote “bipartite” (DORMANN et al., 2009).

A partir das palavras-chave fornecidas pelos artigos foi realizada uma nuvem de palavras e o ranqueamento das 20 palavras mais frequentes. A nuvem de palavras foi realizada no software R versão 4.1.3 (R CORE TEAM, 2020) utilizando os pacotes “wordcloud” v. 2.6 (FELLOWS, 2018), “wordcloud2” v. 0.2.1 (LANG; CHIEN, 2018), “tm” v. 0.7-8 (FEINERER; HORNIK, 2020) e “SnowballC” v. 0.7.0 (BOUCHET-VALAT, 2020).

Todos os gráficos de frequência também foram gerados no software R versão 4.1.3 (R CORE TEAM, 2020) e foram utilizados os pacotes “ggplot2” (WICKHAM, 2016) e “tidyverse” (WICKHAM et al., 2019).

## 2.3 REVISÃO SISTEMÁTICA

Para identificação das usinas estudadas, foram obtidos dados sobre nomes das usinas e suas coordenadas geográficas. Todas as coordenadas foram acessadas utilizando o Google Earth. Após a compilação dos dados de cada uma das usinas investigadas nos estudos primários, foi gerado um mapa através do software QGIS versão 3.16.16 (<http://qgis.osgeo.org>).

Para avaliar os organismos afetados pelo aumento da temperatura, foram considerados todos aqueles que, de alguma forma, sofreram alterações em algum parâmetro biológico (*e.g.* morfologia, reprodução, diversidade) como resposta à descarga do efluente térmico. Como os artigos apresentaram a classificação dos organismos a níveis diversos, como espécie, gênero, classe, filo ou classificações artificiais (*i.e.* fitoplâncton e zooplâncton), foi necessário propor uma classificação em grupos mais abrangentes a fim de garantir a inclusão didática de todos os organismos citados nos estudos primários.

Os principais efeitos térmicos dos efluentes das usinas nucleares sobre a biodiversidade local reportados pelos estudos primários foram extraídos e compilados considerando suas frequências de citação. Foram considerados como efeitos somente aqueles que apontavam a temperatura como o fator preditor ou principal fator responsável pelas mudanças observadas, independentemente da metodologia utilizada para se chegar a essa conclusão. Para compilação dos efeitos, os estudos primários foram classificados em 4 categorias: (1) confirmação de impacto térmico, (2) impacto térmico inconclusivo, (3) impacto causado por outros fatores e (4) sem impacto térmico.

Para se enquadrar na categoria 1, foi determinado que o artigo deveria estabelecer relação direta entre temperatura e efeito, confirmando o impacto térmico da operação da usina nuclear sobre os organismos avaliados. Para a categoria 2, foi estabelecido como critério o uso de palavras ou expressões que denotavam incerteza ao fazerem referência ao impacto causado pela temperatura, como *“suggest”*, *“likely”*, *“might have contributed”*, *“one possible explanation”*, *“seems to be sufficient to explain”*, *“may have”*, *“could have/be”*, *“we hypothesize”*, *“these data imply”*, *“appears to be”*, *“it is possible that”*, *“our results did not conclusively demonstrate”*, *“the influence of a single factor is difficult to ascertain”*, *“apparently”* e *“we infer that”*. Também foram incluídos nessa categoria os artigos que apresentavam conclusões de que o efeito observado foi resultado da interação de fatores múltiplos, sem distinção sobre a significância de cada um dos fatores envolvidos sobre o efeito reportado. Entraram nesta categoria também os artigos que sugeriam futuros estudos para detectar uma relação de causa e efeito entre o aumento da temperatura e as alterações observadas nos organismos. Para os casos em que o artigo oscilava entre empregar os termos inconclusivos e produzir afirmações indicando que o efeito observado foi causado, majoritariamente, pela temperatura, a afirmativa foi utilizada como critério preponderante e o artigo foi incluído na categoria 1. Um mesmo artigo poderia se enquadrar em mais de uma categoria quando cada parâmetro respondesse de maneira distinta ao aumento de temperatura, por exemplo, se um artigo reportasse influência da temperatura na densidade de espécies, mas

observasse que não houve alteração na riqueza de espécies, o mesmo estudo seria considerado nas categorias 1 para os efeitos de densidade e 4 para os efeitos de riqueza. Para se enquadrar na categoria 3, o artigo deveria apontar outros fatores como responsáveis pelas alterações observadas (*e.g.* concentração de cloro). Por fim, na categoria 4 foram incluídos os artigos que concluíram que o efluente térmico não causou mudanças nos organismos investigados ou que as alterações observadas foram pouco expressivas para afirmar a ocorrência de um impacto térmico.

Os estudos que se enquadravam na categoria 1 foram posteriormente avaliados e os parâmetros biológicos afetados pelo efluente térmico foram classificados de acordo com o nível ecológico estudado: população, comunidade e ecossistema. Quando as mudanças observadas envolviam uma única espécie, os parâmetros avaliados foram incluídos no nível de população. Quando envolviam mais de uma espécie, foram incluídos no nível de comunidade. Quando reportavam alterações na produtividade primária, clorofila *a* e taxa de respiração, foram incluídos no nível de ecossistema.

Em um mesmo artigo, alterações poderiam ser reportadas em um ou mais níveis, como, por exemplo, reportar alterações na abundância, riqueza e diversidade de uma comunidade, e especificar a taxa de mortalidade para uma espécie em particular.

Os gráficos das frequências de organismos e parâmetros ecológicos afetados pelo efluente térmico foram gerados no software R versão 4.1.3 (R CORE TEAM, 2020) utilizando os pacotes “ggplot2” (WICKHAM, 2016) e “tidyverse” (WICKHAM et al., 2019).

## 2.4 METANÁLISE

Para cada estudo primário, foram extraídos dados de temperatura da água reportados para as áreas que receberam o efluente térmico das usinas nucleares e áreas que não receberam esse efluente, sendo estas denominadas, respectivamente, de área impactada e área de referência. Todos os dados foram padronizados para a mesma unidade de medida em graus Celsius (°C) e uma metanálise foi conduzida para gerar uma estimativa da diferença de temperatura da água entre as áreas impactada e referência ( $\Delta T$ ).

Para o cálculo de tamanho de efeito foi utilizado o  $\Delta T$  entre as temperaturas da água observadas para as áreas impactada e de referência pelos estudos primários. Quando mais de uma medida foi fornecida em um estudo para a mesma localidade, realizou-se a média das temperaturas registradas, tanto para a área impactada quanto para a área de referência, e posteriormente, calculou-se a diferença média entre elas, calculou-se o desvio padrão e anotou-se o número de observações avaliadas (*n* amostral). Para os casos em que a área impactada era

comparada a mais de uma área de referência, foi calculada uma média unindo dados de temperatura de todas as áreas de referência. Quando mais de uma localidade foi reportada em um estudo, esses dados foram considerados separadamente e avaliados nos modelos estatísticos para efeitos de autocorrelação.

As informações sobre temperatura, desvio padrão e n amostral, sempre que possível, foram obtidas a partir de valores retirados diretamente do texto, de tabelas ou extraídos de figuras utilizando a ferramenta WebPlotDigitizer (ROHATGI, 2015). Preferencialmente, as informações de temperatura foram obtidas de tabelas, quando estas já apresentavam a média, o desvio padrão e o n amostral. Para os casos em que esses dados não estavam disponíveis, mas havia o gráfico com as medidas de temperatura, a extração dos valores de temperatura e determinação do n amostral eram realizadas a partir deste. Em último caso, a média foi calculada a partir de valores apresentados no texto. Quando os estudos não apresentavam a média de temperatura associada ao seu desvio padrão ou valores brutos que permitissem seu cálculo para ambas as áreas, porém apresentavam valores de  $\Delta T$  entre as áreas, os dados foram considerados. Quando apenas um valor médio era fornecido sem um desvio padrão associado, o estudo foi excluído da base de dados para a metanálise.

Para fins de padronização, foram considerados para a metanálise somente dados de temperatura obtidos na superfície da coluna d'água, sendo descartadas as medidas de fundo. Essa decisão parte da observação de que a pluma térmica do efluente das usinas abrange principalmente as camadas mais superficiais da coluna d'água (TEIXEIRA et al., 2012), o que direciona os esforços de medição da temperatura nesse sentido e corrobora os dados apresentados pela maioria dos estudos avaliados.

Quando a metodologia não deixava claro se as medidas foram realizadas no fundo ou na superfície, considerou-se como medida de superfície, e, portanto, o estudo foi incluído na análise.

#### 2.4.1 MODERADORES E HIPÓTESES ASSOCIADAS

Três moderadores foram avaliados quanto a sua influência na direção do tamanho da diferença de temperatura, sendo dois inerentes à operação da usina estudada: número de reatores e capacidade de geração elétrica, e um relacionado a posição geográfica das áreas de estudo (usinas). O número de reatores foi considerado devido a sua relação com a descarga do efluente térmico, ou seja, quanto maior o número de reatores, maior seria o volume de água captada para resfriá-los e, conseqüentemente, haveria maior volume de água a ser liberado no ecossistema, aumentando a área de dispersão e retardando o resfriamento da pluma térmica. A hipótese de

trabalho foi de que quanto maior fosse o número de reatores observado nos estudos, maior seria o  $\Delta T$  entre as áreas impactadas e de referência, portanto, interferindo diretamente nos tamanhos de efeito dos estudos.

Todos os dados sobre número de reatores foram obtidos na base de dados da Associação Nuclear Mundial (*World Nuclear Association* em Inglês) disponível no site [world-nuclear.org](http://world-nuclear.org). Esta base de dados contém informações referentes aos reatores nucleares operantes e inativos nas usinas de todo o mundo. Foram considerados somente os dados referentes às datas de coleta obtidas nos estudos para verificar quantos reatores estavam em operação durante aquele intervalo de tempo.

A capacidade de geração elétrica (MWe) das usinas, assim como o número de reatores, é um fator que pode interferir no volume da descarga térmica para o ecossistema. De acordo com ATTIA, 2015, usinas com maior capacidade de geração elétrica podem liberar maior volume de água na área de descarga, ampliando a área sob influência de altas temperaturas e aumentando a diferença de temperatura encontrada entre as áreas impactada e de referência.

Assim como para o número de reatores, os dados de capacidade foram obtidos na base de dados da Associação Nuclear Mundial ([world-nuclear.org](http://world-nuclear.org)) considerando a data de coleta de dados de cada estudo. A unidade de medida utilizada para a capacidade de geração elétrica foi a capacidade líquida ou capacidade utilizável, que representa a quantidade de energia que a usina pode realmente utilizar para seu funcionamento, considerando todas as perdas do processo.

A latitude foi utilizada como moderador por se tratar de um dos principais fatores que explicam a sazonalidade e as variações de temperatura nos ecossistemas em diferentes regiões do globo. Usinas localizadas na zona temperada podem apresentar uma variação de temperatura entre as áreas impactada e de referência diferente de usinas localizadas em zonas tropicais. Por exemplo, foi reportado que em regiões temperadas, a temperatura do efluente liberado na área de descarga foi de 8 a 12 °C mais elevada do que a temperatura da água na área de captação (BAMBER, 1995), enquanto na zona tropical, esse aumento variou de 6 a 10 °C (MARTÍNEZ-ARROYO et al., 2000; POORNIMA et al., 2006). Portanto, a hipótese era de que a latitude poderia influenciar na diferença de temperatura encontrada entre as áreas impactada e de referência e, portanto, nos seus respectivos tamanhos de efeito.

#### 2.4.2 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Todas as análises estatísticas foram conduzidas no software R versão 4.1.3 (R CORE TEAM, 2020). O cálculo do tamanho de efeito foi realizado utilizando o pacote “metafor”

versão 3.4-0 (VIECHTBAUER, 2010) e a função *escalc* com o argumento "MN", recomendado para medidas quantitativas baseadas em médias brutas, sem nenhuma conversão (*the raw mean*, em Inglês). A base de dados utilizada para o cálculo de tamanho de efeito foi composta pelas médias (*mi*), desvio padrão (*sdi*) e número de observações (*ni*) para cada um dos estudos primários.

Para a metanálise foi utilizado um modelo de efeito misto (NAKAGAWA; SANTOS, 2012) utilizando a função *rma.mv*. Neste modelo, foi incorporada a identidade dos estudos (ID) como fatores randômicos, pois em alguns casos obtivemos mais de uma medida por estudo, portanto, ao adicionarmos os ID dos estudos no modelo, conseguimos estimar seu erro residual devido à autocorrelação. Foram realizados modelos para testar os efeitos de cada um dos moderadores (*i.e.* número de reatores, capacidade de geração elétrica e latitude) individualmente a fim de se obter a estimativa de cada um deles. Foram considerados significativos os tamanhos de efeito com intervalos de confiança (ICs) de 95% e que não contivessem o zero. Foi utilizada a estatística  $Q_M$  para determinar se o tamanho de efeito médio foi significativamente diferente entre os diferentes moderadores (KORICHEVA et al., 2013). O nível de heterogeneidade do modelo foi calculado considerando o tamanho de efeito de cada estudo usando a estatística  $I^2$ , segundo a qual valores de 25%, 50% e 75% são considerados baixos, moderados e altos, respectivamente (HIGGINS et al., 2003).

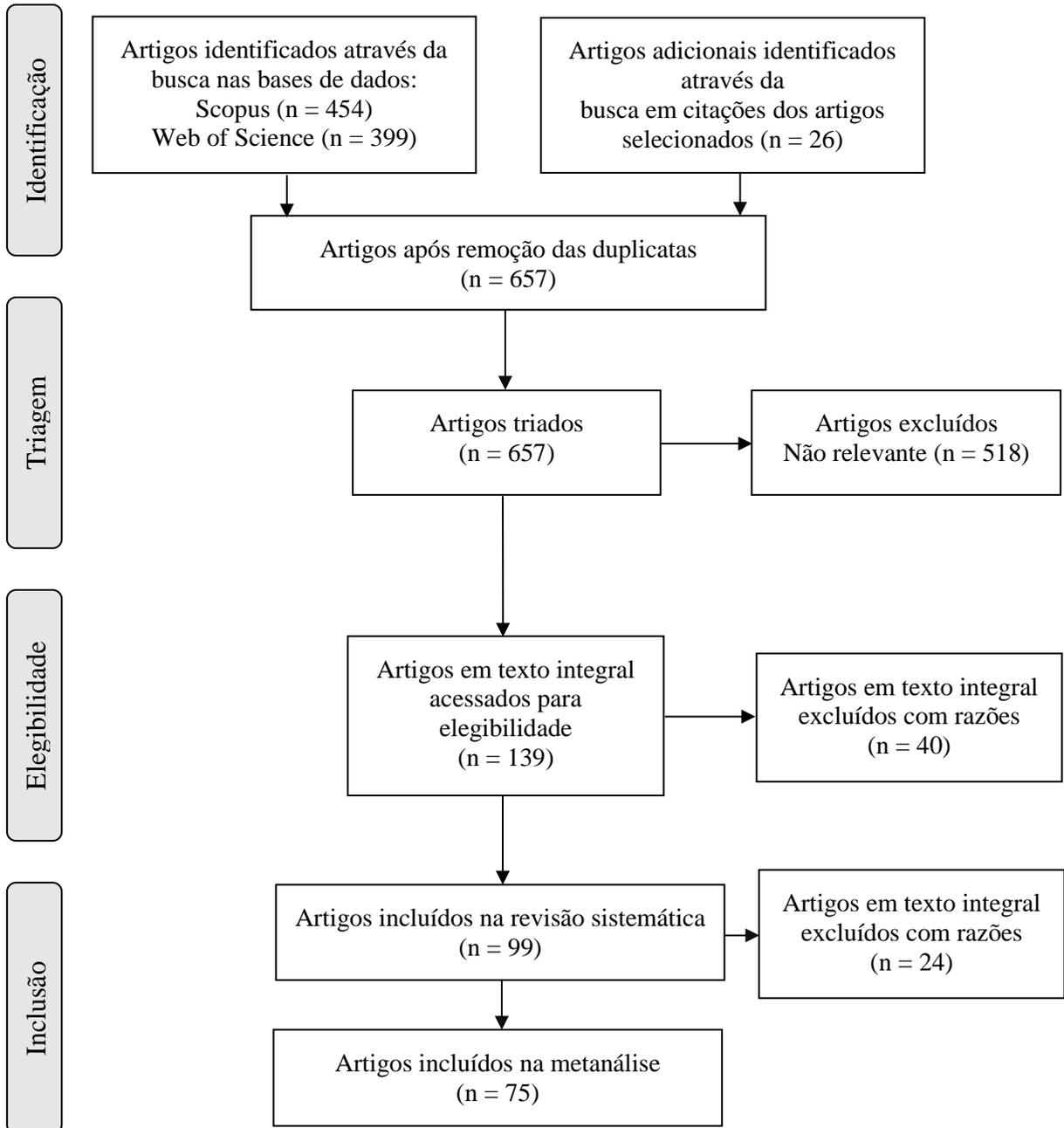
A fim de verificar a presença de viés de publicação, sinais de assimetria foram analisados a partir do gráfico de funil e do teste de regressão de Egger (EGGER et al., 1997). O teste de Egger é uma regressão do tamanho de efeito e da precisão de cada estudo, e a assimetria é indicada quando o coeficiente angular (*slope*) dessa relação é diferente de zero. Testes de assimetria assumem que os tamanhos de efeito devem ser distribuídos aleatoriamente em torno do tamanho médio do efeito, de modo que qualquer desvio de simetria poderia indicar que alguns resultados são mais propensos a serem publicados do que outros (KORICHEVA et al. 2013).

### **3 RESULTADOS**

#### **3.1 CIENCIOMETRIA**

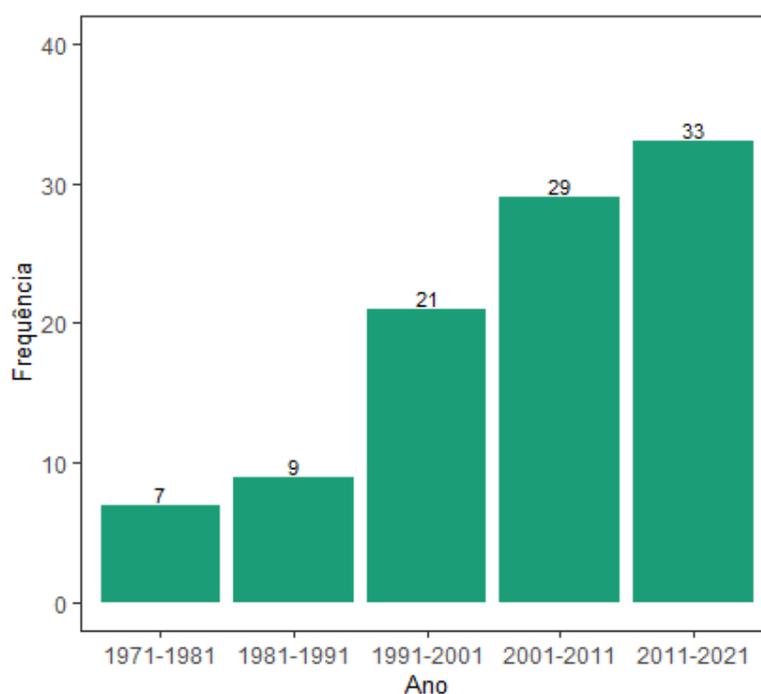
A busca nas bases retornou ao todo 853 artigos, sendo 399 provenientes da plataforma Web of Science e 454 da plataforma Scopus (Figura 1). Após a remoção das duplicatas, obtivemos 631 artigos que foram avaliados a partir da leitura do título e do resumo, destes 139 foram considerados relevantes para o estudo e foram avaliados na íntegra. Os estudos avaliados na íntegra foram revisados quanto a bibliografia citada e 26 novos artigos foram incorporados

à triagem. A partir da leitura integral dos textos selecionados através dos critérios de inclusão e exclusão, 99 artigos atenderam aos critérios pré-estabelecidos e foram incluídos na revisão sistemática (análise qualitativa) e 75 artigos foram incluídos na metanálise (Apêndice A). Os 24 artigos excluídos da metanálise foram removidos da base de dados devido à dificuldade de obtenção do desvio padrão de temperatura e/ou n amostral não explicitado (17 estudos), e devido a medida de temperatura ter sido realizada no fundo da coluna d'água (7 estudos).

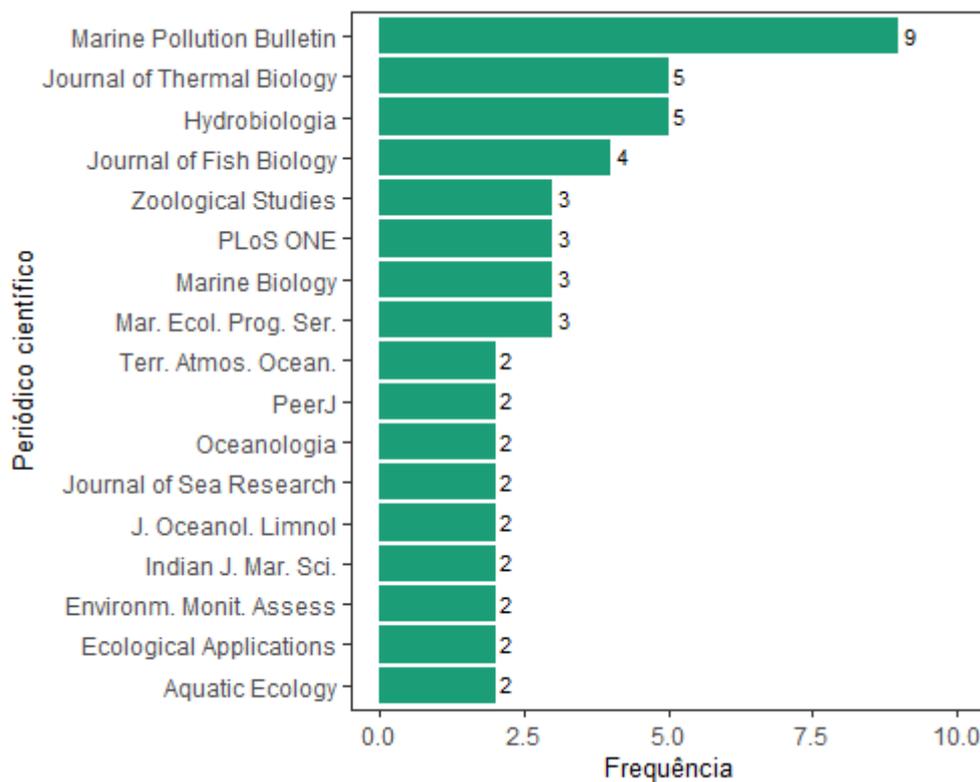


**Figura 1.** Fluxograma PRISMA da busca realizada nas plataformas Scopus e Web of Science contendo o número de artigos encontrados e incluídos na revisão sistemática e na metanálise deste estudo. Adaptado de MOHER et al. (2015).

A análise da evolução temporal do número de publicações mostra que houve um aumento significativo ao longo das décadas, com o maior salto no número de publicações sendo registrado do período de 1981-1991 para 1991-2001, saindo de 9 para 21 artigos (Figura 2). O maior número de publicações foi atingido entre 2011 e 2021, com um total de 33 artigos publicados. O maior número de artigos foi publicado no periódico *Marine Pollution Bulletin* (9), seguido pelos periódicos *Journal of Thermal Biology* (5) e *Hydrobiologia* (5) (Figura 3).



**Figura 2.** Frequência de publicações sobre os efeitos do efluente térmico de usinas nucleares costeiras na biodiversidade local por intervalo de tempo (década).



**Figura 3.** Periódicos com maiores frequências de publicação sobre os efeitos do efluente térmico de usinas nucleares costeiras na biodiversidade local. Como havia 46 periódicos com apenas 1 artigo publicado, eles não foram incluídos na figura, evitando que a visualização dos dados fosse comprometida. No entanto, todos os periódicos com seus respectivos números de artigos publicados estão disponíveis no Apêndice B para consulta. Mar. Ecology. Prog. Ser. = Marine Ecology Progress Series; Terr. Atmos. Ocean. = Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences; Indian J. Mar. Sci = Indian Journal of Marine Sciences; Environ. Monit. Assess. = Environmental Monitoring and Assessment; J. Oceanol. Limnol. = Journal of Oceanology and Limnology.

A interação entre os autores dos estudos primários foi considerada baixa (conectância = 0.02) e composta por grupos pequenos e isolados de autores por publicação (Figura 4).

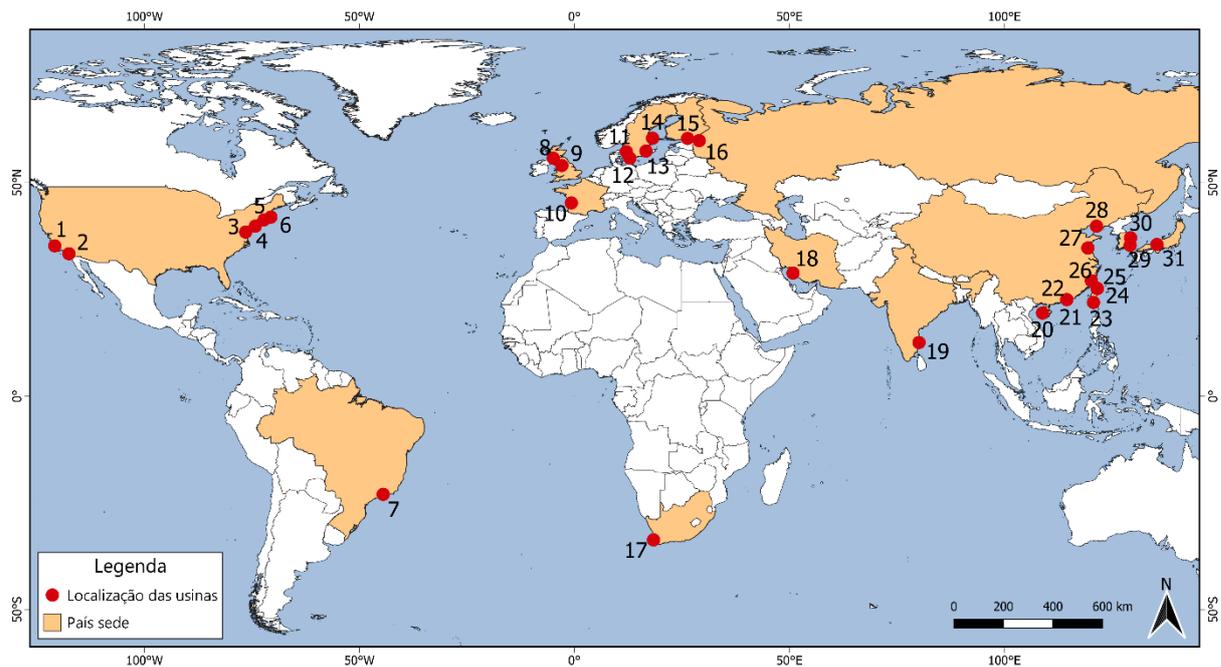
As palavras-chave mais frequentes nos artigos selecionados foram “Daya Bay” e “Phytoplankton”, indicando a localidade e o grupo de organismos mais citados neste tipo de estudo, seguidas por “Nuclear power plant”, “Power plant”, “Temperature” e “Thermal pollution”, as quais refletem os empreendimentos avaliados e a variável ambiental estudada (Figuras 5A e 5B).





### 3.2 REVISÃO SISTEMÁTICA

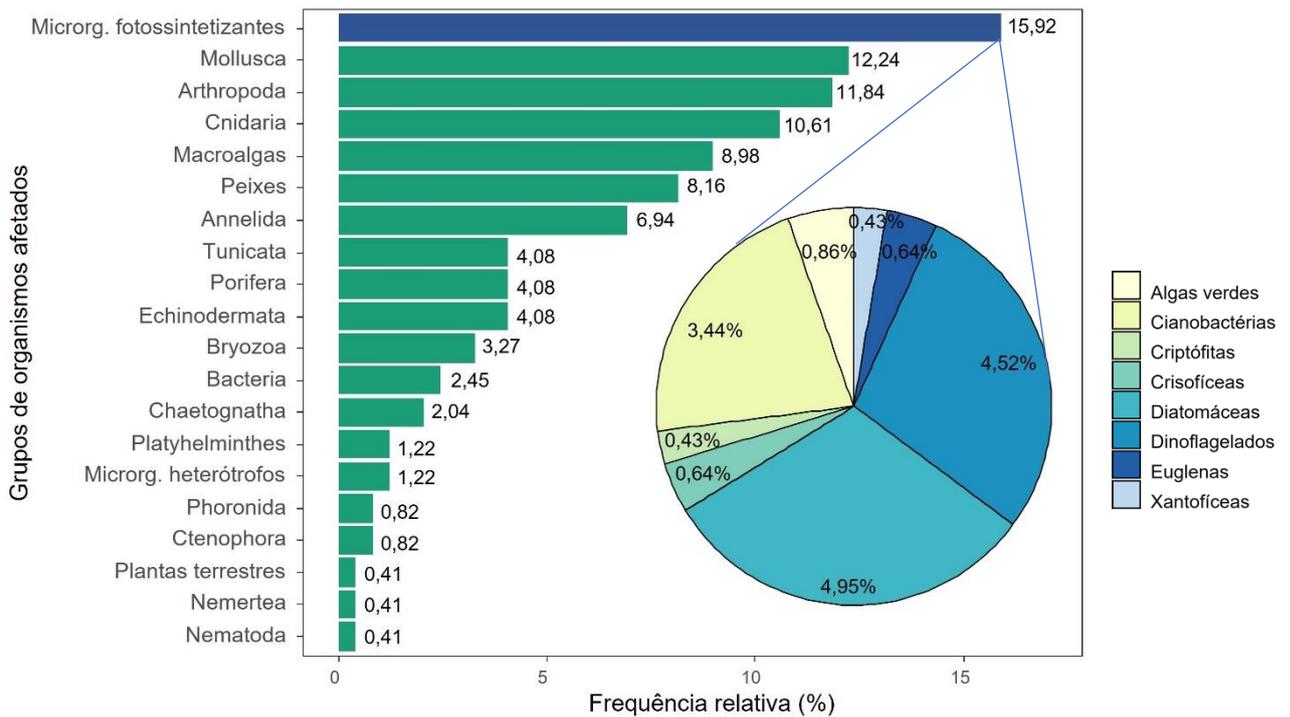
Ao todo 31 usinas nucleares foram apresentadas nos 99 estudos primários selecionados na revisão sistemática (Figura 6). As usinas estão distribuídas em diferentes regiões geográficas e pertencem aos países: China (n = 6), Estados Unidos da América (n = 6), Suécia (n = 4), Taiwan (n = 3), Coreia do Sul (n = 2), África do Sul (n = 1), Brasil (n = 1), Escócia (n = 1), Finlândia (n = 1), França (n = 1), Índia (n = 1), Inglaterra (n = 1), Irã (n = 1), Japão (n = 1) e Rússia (n = 1).



**Figura 6.** Usinas nucleares avaliadas na revisão sistemática (n = 31). (1) Usina nuclear de Diablo Canyon, (2) central nuclear de San Onofre †, (3) usina nuclear de Calvert Cliffs, (4) central nuclear de Oyster Creek †, (5) usina nuclear de Millstone, (6) usina nuclear de Pilgrim †, (7) central nuclear Almirante Álvaro Alberto, (8) usina nuclear de Hunterston B †, (9) usina nuclear de Heysham, (10) usina nuclear de Blayais, (11) usina nuclear de Ringhals, (12) usina nuclear de Barsebäck †, (13) central nuclear de Oskarshamn, (14) central nuclear de Forsmark, (15) usina nuclear de Loviisa, (16) usina nuclear de Leningrado, (17) central nuclear Koeberg, (18) usina nuclear de Bushehr, (19) usina nuclear de Madras, (20) usina nuclear de Changjiang, (21) usina nuclear de Daya Bay, (22) usina nuclear de Ling Ao, (23) usina nuclear de Maanshan, (24) usina nuclear de Kuosheng, (25) usina nuclear de Jinshan †, (26) usina nuclear de Ningde, (27) usina nuclear de Tianwan, (28) usina nuclear de Hongyanhe, (29) usina nuclear de Kori, (30) usina nuclear de Hanul e (31) usina nuclear de Takahama. O símbolo † representa usinas que, atualmente, estão inoperantes ou em processo de descomissionamento. No Apêndice C encontram-se as usinas estudadas em cada artigo, assim como a capacidade de geração elétrica e o número de reatores considerados.

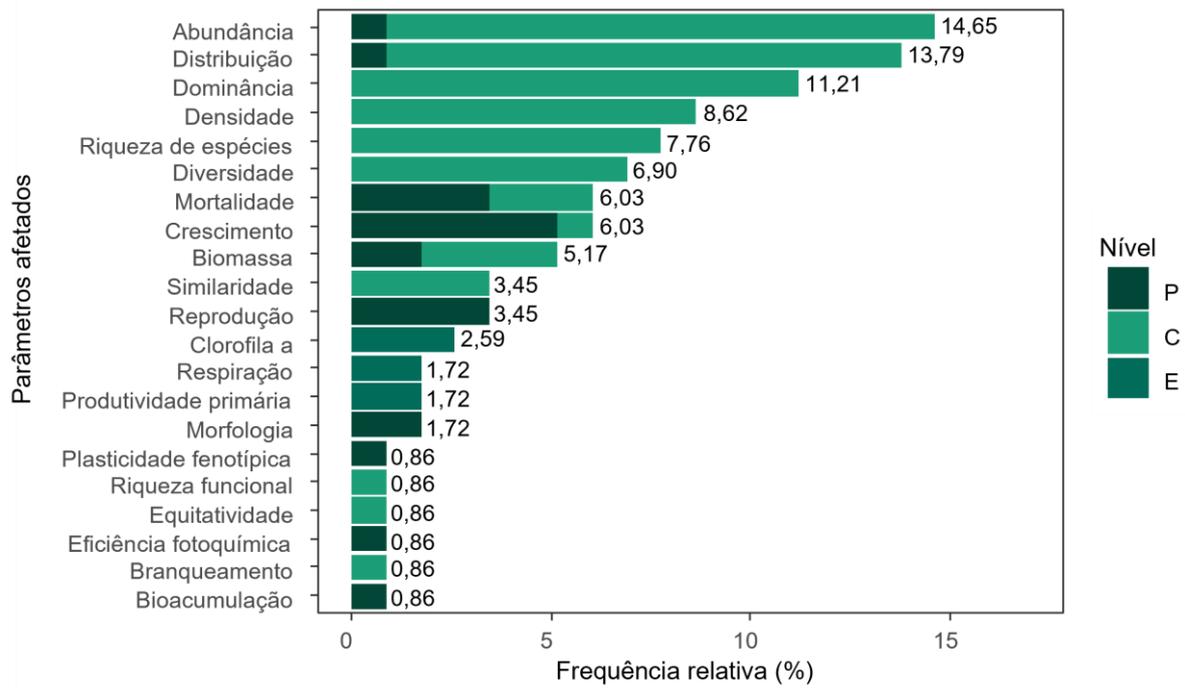
Utilizando dados dos 93 artigos que reportavam algum tipo de efeito do efluente térmico sobre os organismos, foi observado que os microrganismos fotossintetizantes (fitoplâncton e

microfitobentos) foram os mais citados (15,92 %), seguidos por moluscos (12,24 %), artrópodes (11,84 %), cnidários (10,61 %) e macroalgas (8,98 %), os quais, ao todo, compõem mais de 50 % do total de grupos que apresentaram alterações em resposta ao efluente (Figura 7). Dentro do grupo dos microrganismos fotossintetizantes, diatomáceas, dinoflagelados e cianobactérias obtiveram destaque, representando, respectivamente, 4,95 %, 4,52 % e 3,44 % do total estudado para esse grupo (Figura 7).



**Figura 7.** Grupos de organismos afetados pelo aumento de temperatura na área de descarga de usinas nucleares.

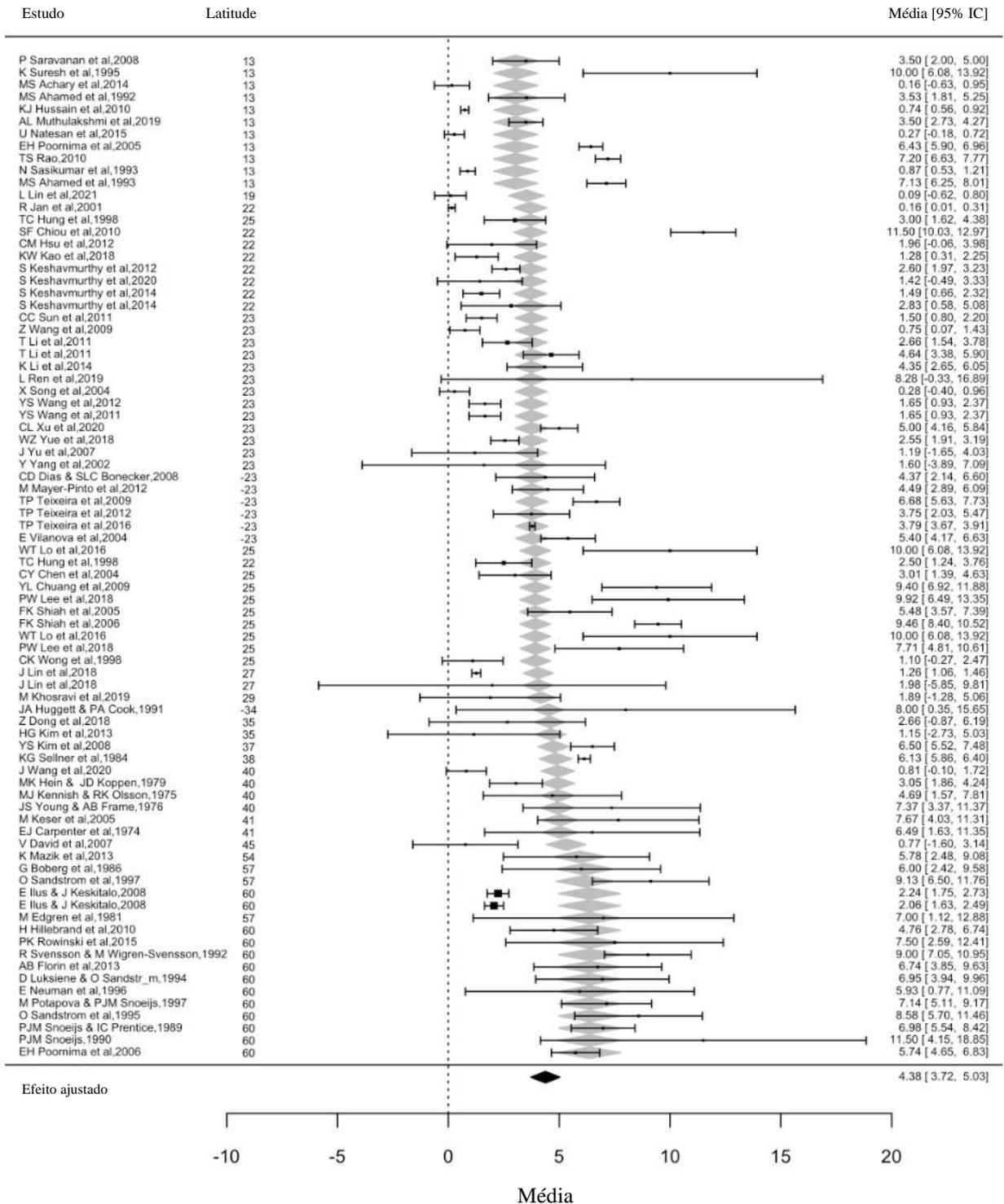
Dos 99 artigos analisados na revisão sistemática, 38 afirmaram que a temperatura foi o fator causador de pelo menos um efeito observado nos organismos, e, portanto, foram utilizados na análise qualitativa. Os parâmetros mais citados dentre os que sofreram alterações foram aqueles relacionados a mudanças na estrutura e dinâmica de populações, comunidade e ecossistemas (Figura 7), sendo eles: abundância (14,65 %), distribuição (13,79 %), dominância (11,21 %), densidade (8,62 %), riqueza de espécies (7,76 %) e diversidade (6,90 %), os quais, somados, contribuem com mais de 60% do total de parâmetros afetados (Figura 8).



**Figura 8.** Frequência de citação dos parâmetros afetados pelo aumento de temperatura na área de descarga de usinas nucleares a níveis de população, comunidade e ecossistema.

### 3.3 METANÁLISE

O tamanho de efeito geral demonstrou que houve um aumento significativo de temperatura nas áreas impactadas em relação às áreas de referência (média de 4,38 °C, 95 % IC = 3,72 – 5,03; Figura 9). Após testar os efeitos dos moderadores considerados neste estudo (*i.e.* número de reatores, capacidade de geração elétrica e latitude), apenas a latitude foi significativa ( $QM_{(df = 1)} = 10,88$ ;  $p = 0,001$ ; Tabela 1). Desta maneira, a latitude foi incluída no modelo de efeito misto (Tabela 2; Apêndice D).



**Figura 9.** Forest plot da diferença de temperatura observada entre a área impactada pelos efluente térmico e as áreas de referência avaliadas nos estudos primários ( $k = 82$ ). Cada linha representa um estudo. Os círculos cheios em preto representam o tamanho de efeito médio do estudo e as barras o intervalo de confiança de 95%. O losango cheio em preto representa o tamanho de efeito geral (*raw mean*, média sem transformação). Os losangos cheios em cinza representam os tamanhos de efeitos ajustados pela latitude.

Após a inclusão deste moderador no modelo geral, a heterogeneidade total entre os tamanhos de efeito ( $I^2$ ) foi significativa ( $p < 0,0001$ ) e os resultados mostraram que 98,62 % da heterogeneidade total pode ser atribuído a variabilidade entre observações. O componente randômico do modelo (ID dos estudos) apresentou uma variância de 7,06 e desvio padrão de 2,66.

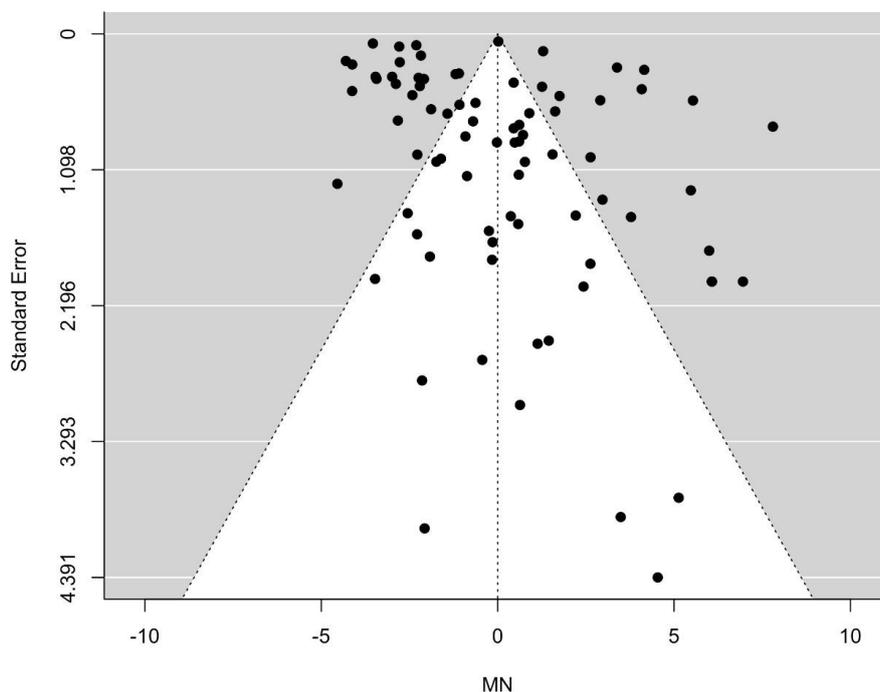
O viés de publicação avaliado a partir da regressão de Egger, que mede a relação entre o tamanho do efeito residual e a precisão do estudo, demonstrou que os estudos avaliados possuem uma distribuição simétrica, ou seja, não apresentam viés de publicação significativo ( $\beta_0 = -0,61$ ;  $t = -1,55$ ;  $p = 0,13$ ), o que também pode ser observado a partir da inspeção visual do gráfico de funil (Figura 10).

**Tabela 1.** Resultado dos modelos de meta-regressão testando o efeito dos três moderadores na variação de temperatura entre as áreas impactadas pelos efluentes térmicos e de referência. O efeito de cada fator foi testado utilizando um modelo misto com o ID dos estudos como fator randômico e cada um dos moderadores como fatores fixos. A significância dos moderadores foi avaliada utilizando a estatística  $Q_M$ . Todos os moderadores foram testados utilizando a mesma base de dados ( $n = 75$ ). O modelo significativo está destacado em negrito.

Moderador	$Q_M$	p
Número de reatores	0,06	0,81
Capacidade de geração elétrica	0,76	0,38
<b>Latitude</b>	<b>10,88</b>	<b>0,001</b>

**Tabela 2.** Diagnóstico do modelo de efeito misto. Estimativa: estimativa do efeito; se: erro padrão; zval: valor do teste estatístico; pval: valor de p; ci.lb: intervalo de confiança inferior; ci.ub: intervalo de confiança superior.

	Estimativa	Se	zval	pval	ci.lb	ci.ub
<b>Intercepto</b>	2,17	0,72	3,00	0,003	0,75	3,59
<b>Latitude</b>	0,07	0,02	3,30	<b>0,001</b>	0,03	0,11



**Figura 10.** Gráfico de funil para análise de viés de publicação.

## 4 DISCUSSÃO

### 4.1 CIENCIOMETRIA

A análise da frequência de publicações revelou que houve um crescimento marcante ao longo das décadas, com o maior número de publicações sendo atingido entre 2011 e 2021. Esse resultado é suportado pelo crescimento significativo da publicação científica no cenário mundial, possibilitado pelo aumento do número de periódicos e de pesquisadores atuantes (MABE, 2003; UNESCO, 2021).

O número de usinas operantes tem crescido e a energia nuclear tem sido foco de grandes debates, sobretudo no que diz respeito a questões de segurança e meio ambiente (DROTTZ-SJÖBERG; SJOBERG, 1990; WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2022). Isso acompanha o endurecimento de políticas e pré-requisitos necessários para seu funcionamento, motivado pela ocorrência de desastres nucleares, como o de Chernobyl, em 1986, e o de Fukushima, em 2011 (HAYASHI; HUGHES, 2013; SCHREURS, 2014). A atenção sobre esse tema pode ter contribuído para o financiamento de pesquisas e direcionado os esforços de pesquisadores em campos ainda pouco explorados no que compete aos riscos ambientais associados a este tipo usina.

Nas últimas décadas, estudos a respeito do impacto causado pelo aumento na temperatura da água tem crescido significativamente, principalmente devido ao aceleramento das mudanças climáticas (MCCALLEN et al., 2019). A importância desse ramo na ecologia atual pode estar motivando a realização de estudos na área de usinas nucleares, uma vez que estas fornecem condições para o estudo *in situ* do efeito do aumento da temperatura na biodiversidade local, o que contribui ainda com a previsão de possíveis efeitos observados diante de altas variações da temperatura a longo prazo (KESER et al., 2005).

O fato de o maior número de artigos ter sido publicado nos periódicos *Marine Pollution Bulletin*, *Journal of Thermal Biology* e *Hydrobiologia* pode estar relacionado a preferência de publicação em periódicos de alcance internacional e cujos objetivos estejam diretamente relacionados ao tema tratado nos estudos primários, seja de forma mais geral, tratando de impactos antrópicos no ambiente marinho, ou de forma mais específica, avaliando os efeitos da variável temperatura na biologia dos organismos (NAHAS; FERREIRA, 2005).

O periódico *Marine Pollution Bulletin*, por exemplo, “preocupa-se com o uso racional dos recursos marítimos e marinhos nos estuários, nos mares e nos oceanos, assim como com a documentação da poluição marinha e introdução de novas formas de medição e análise”. Já o *Journal of Thermal Biology* “tem como objetivo publicar artigos que avancem nosso conhecimento de como a temperatura influencia humanos e animais. O foco principal da revista diz respeito a mecanismos e adaptações de organismos relacionados a sua biologia térmica, do nível celular ao nível de organismo”. Enquanto o *Hydrobiologia* “publica pesquisas originais, revisões e opiniões que investigam a biologia da água doce e ambientes marinhos, incluindo o impacto das atividades humanas”.

Além disso, o periódico *Marine Pollution Bulletin*, por exemplo, possui um alto fator de impacto (FI = 7,001), de acordo com o Journal Citation Reports (2021). Essa métrica, baseada na frequência com que os artigos de um periódico são citados em publicações científicas, tem sido utilizada para avaliar a qualidade dos periódicos, de modo que quanto maior é o fator de impacto, maior tende a ser sua relevância dentro da área de conhecimento em questão (GARFIELD, 2003). Pesquisadores têm buscado publicar artigos em periódicos com alto fator de impacto, uma vez que essa métrica também tem sido utilizada como um critério para a concessão de incentivos de pesquisa e avaliação dos programas de pós-graduação (GALAN-GONZÁLEZ; ZYCH, 2011), o que pode ajudar a explicar o alto número de artigos publicados no periódico citado.

A baixa conectância entre os autores reportada para o presente estudo contraria o rápido crescimento da colaboração científica, especialmente da internacional e interdisciplinar, nas

últimas décadas (GLÄNZEL, 2001). Essa colaboração facilita o compartilhamento de ideias, métodos e recursos, além de permitir que cada pesquisador envolvido se concentre na sua área de domínio, enriquecendo e complementando o trabalho (KATZ; MARTIN, 1997; JANSEN et al. 2009). Contudo, no presente estudo, o fato de as pesquisas avaliadas terem sido conduzidas em 31 usinas diferentes, distribuídas em 13 países, naturalmente envolve grupos de pesquisa geograficamente distantes uns dos outros. Apesar da facilidade de interação promovida por meio de encontros remotos e intercâmbios acadêmicos, a proximidade física é um fator que encoraja a colaboração (KATZ; MARTIN, 1997), o que pode explicar o grande número de interações sem muitas conexões entre si. A alta frequência com que aparecem os termos “Daya Bay” e “Phytoplankton” apontam para a grande quantidade de pesquisas conduzidas nas usinas nucleares localizadas na Baía de Daya, na província de Guangdong, China (WANG et al., 2006; WANG et al., 2008); e para a relevância do fitoplâncton em estudos de poluição térmica, visto que são um bom indicador de mudanças ecossistêmicas devido à sua sensibilidade às variações na temperatura da água (DI PANE et al., 2022).

A China é um dos países que mais cresce na indústria de energia nuclear no mundo (ZHOU, 2010). Até junho de 2022, o número de reatores nucleares no país chegou a 54 (atrás apenas dos Estados Unidos, com 92 reatores, e da França, com 56), representando 12.3% do número total de reatores nucleares operantes no mundo (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2022). Ainda de acordo com a Associação Nuclear Mundial (2022), 19 ainda estão em construção e 33 planejados para funcionarem dentro dos próximos 15 anos, o que fará com que a China se consolide no cenário mundial como o país que possui o maior número de reatores nucleares.

A Baía de Daya tem passado por um processo de desenvolvimento expressivo da indústria, da aquicultura e da agricultura desde a década de 1980, e como resultado dessas atividades vem enfrentando mudanças na estrutura e distribuição de nutrientes e na ecologia das comunidades biológicas (HAO et al., 2016). Nela, estudos periódicos são conduzidos para a obtenção de informações oceanográficas e ecológicas relacionadas à ocupação e operação das usinas de Daya Bay e Ling Ao (WEN et al., 1992). O Instituto de Oceanologia do Mar do Sul da China, pertencente a Academia Chinesa de Ciências, realiza levantamentos quatro vezes por ano nessa região, contando com a infraestrutura da Estação de Pesquisa Biológica Marinha ((PAN; WANG, 1998), WANG et al., 2006). Esses levantamentos normalmente incluem a medição dos parâmetros físico-químicos da água do mar e de variações na composição e biomassa da biota em doze estações dentro da Baía (WANG et al., 2008).

A grande quantidade de pesquisas conduzidas nessa região pode ser explicada, portanto, pela importância econômica da Baía, pela existência de um programa de monitoramento periódico conduzido por uma instituição de pesquisa e pela facilidade logística de realização dos estudos uma vez que existe uma estação de pesquisa vinculada ao Instituto de Oceanologia, situada próxima às usinas nucleares (WANG et al., 2011; WANG et al., 2012).

#### 4.2 REVISÃO SISTEMÁTICA

Os microrganismos fotossintetizantes foram o grupo mais citado dentre aqueles afetados pelo aumento de temperatura na área de descarga das usinas de acordo com os estudos primários. Dentro desse grupo, assim como evidenciado pelas palavras-chave, o fitoplâncton se destaca, uma vez que esses organismos são caracterizados por flutuarem na coluna d'água, geralmente próximos à superfície, ficando sob influência direta da pluma térmica criada pelo efluente liberado (FEHLING et al., 2012).

O aquecimento da água pode afetar o fitoplâncton de duas maneiras diferentes: diretamente através do efeito do aumento da temperatura sobre as taxas metabólicas e indiretamente através da estratificação térmica da coluna d'água e de mudanças na estrutura da comunidade de zooplâncton, que passa a exercer maior ou menor pressão de herbivoria sobre os organismos basais (JONES; GOWEN, 1990; QUINTANA et al., 2015). A estratificação térmica dificulta a ressuspensão dos nutrientes do sedimento e de águas mais profundas, reduzindo, assim, sua disponibilidade para os organismos e comprometendo sua performance fisiológica (BOPP et al., 2001; LEWANDOWSKA et al., 2014).

Os efeitos do aumento de temperatura podem variar de acordo com distribuição espacial, causando aumentos na abundância de fitoplâncton em regiões temperadas (RICHARDSON; SCHOEMAN, 2004; HENSON et al., 2021), e sua diminuição em águas subtropicais e tropicais (RICHARDSON; SCHOEMAN, 2004; GITTINGS et al., 2018), onde a temperatura é naturalmente alta e um pequeno aumento seria capaz de exceder o limite superior de tolerância para muitas espécies (WALTHER et al., 2002).

Por outro lado, é importante considerar a possibilidade de haver um viés estabelecido pelo número de trabalhos conduzidos com o grupo, o que faria com que os microrganismos fotossintetizantes fossem apontados como o grupo mais afetado não por serem os mais suscetíveis à descarga térmica, mas por serem o grupo mais investigado devido a sua conhecida sensibilidade a variações ambientais. Sabe-se que as comunidades fitoplanctônicas têm sido amplamente utilizadas como bioindicadores da qualidade de ecossistemas aquáticos por possuírem alta capacidade de promover respostas evolutivas rápidas a mudanças extremas ou a

longo prazo nas condições hidrográficas (COTTINGHAM, 1999; LI et al. 2011). Essa característica é suportada pelo seu curto tempo de geração, altas densidades populacionais e alta variabilidade genética (REUSCH; BOYD, 2013; COLLINS et al., 2020). Além disso, por serem responsáveis por quase metade da produtividade primária global e ocuparem a base da cadeia trófica no ambiente aquático (FIELD et al., 1998), sua resposta frente a variações ambientais pode gerar um efeito em cascata no ecossistema, o que torna seu estudo prioritário na investigação de possíveis efeitos indiretos do efluente térmico nos níveis tróficos subsequentes (POORNIMA et al. 2006). Lin et al. (2018), por exemplo, concluíram que o crescimento da comunidade de macrobentos situada na área de descarga do efluente térmico foi limitado pela redução na abundância do fitoplâncton e zooplâncton, mostrando que sua estrutura não foi modulada pelo aumento da temperatura e sim pelo impacto deste aumento nas comunidades que ocupam os primeiros níveis tróficos.

Neste estudo, foi observado que diatomáceas, dinoflagelados e cianobactérias compõem mais de 80 % dos microrganismos fotossintetizantes afetados, o que pode estar relacionado ao fato de serem os organismos do fitoplâncton mais abundantes no ambiente aquático (CHAN, 1978). Dentro da comunidade fitoplanctônica, desempenham papéis chave nos processos ecossistêmicos, com as diatomáceas sendo responsáveis por cerca de 20 % de toda produtividade primária líquida no ambiente marinho, dinoflagelados vivendo em associação simbiótica com corais, e cianobactérias contribuindo com a ciclagem de nutrientes e fixação de nitrogênio (NELSON et al., 1995; ZEHR, 2011; KESHAVMURTHY et al., 2012). Esses organismos são tipicamente conhecidos por formarem florações tóxicas em condições ideais de temperatura e nutrientes, podendo afetar negativamente a saúde humana, bem como a pesca marinha e a aquicultura (ANDERSON et al. 2002; LANDSBERG, 2002). Nesse contexto, o aumento da temperatura causado pela descarga do efluente térmico pode alterar a época das florações anuais, sua composição, duração e amplitude (HINDER et al., 2012), intensificando as consequências negativas geradas.

Fenômenos como elevação da temperatura da água, eutrofização e desequilíbrio nas razões N:P (nitrogênio e fósforo) são responsáveis por causar mudanças expressivas na comunidade de diatomáceas e dinoflagelados, ocasionando um aumento na abundância de dinoflagelados em relação a de diatomáceas, com os dinoflagelados se tornando dominantes juntamente com as diatomáceas ou sendo o único grupo dominante (XIE et al., 2015; LIU et al., 2016; SIEMERING et al., 2016; CARRETO et al., 2018).

Xiao et al. (2018) observaram que diatomáceas preferem temperaturas mais baixas e alta concentração de nutrientes, enquanto dinoflagelados apresentam menor sensibilidade a

variações na temperatura e na concentração de nutrientes. Esses diferentes traços podem ser responsáveis por mudanças nos padrões de dominância na área de descarga do efluente térmico das usinas nucleares.

Li et al. (2011) relataram que quando a temperatura da água atingiu 35 °C na área de descarga de uma usina nuclear ou 3,7 °C acima da temperatura registrada na área de referência, dinoflagelados foram favorecidos sobre as diatomáceas, as quais constituíam o grupo dominante em temperaturas menores que 30 °C. Dinoflagelados, como *Ceratium furca*, *C. fusus*, *C. trichoceros*, *Dinophysis caudate* e *Protoperdinium depressum*, cresceram significativamente, representando cerca de 50 % da abundância total de fitoplâncton. Esses resultados são consistentes com aqueles observados por Xiao et al. (2018), que reportaram uma inibição no crescimento de diatomáceas e aumento na abundância de dinoflagelados a altas temperaturas. Contudo, resultados contrastantes foram encontrados no Mar do Norte e na porção nordeste do Atlântico, onde um aumento da temperatura do mar provocou um aumento na abundância relativa de diatomáceas vs. dinoflagelados (HINDER et al., 2012), o que pode ser explicado pela existência de outras variáveis ambientais envolvidas. A resposta das diatomáceas a altas temperaturas pode não ser negativa desde que o estresse da temperatura não seja acompanhado pelo estresse adicional da limitação de nutrientes, por exemplo (Xiao et al. 2018).

Estudos vêm mostrando que as cianobactérias respondem positivamente ao aumento de temperatura (LV et al., 2014). Ahamed et al. (1992) concluíram que as cianobactérias são geralmente mais tolerantes ao efluente térmico do que outros organismos, tornando-se o grupo dominante quando a temperatura excede 30 °C. Kim (1999), por sua vez, comparando a biomassa de cianobactérias entre diferentes pontos de amostragem, observou que a maior biomassa foi encontrada em uma região próxima a uma saída artificial de água residual aquecida. Altas temperaturas estimulam diretamente o crescimento de cianobactérias porque acredita-se que tenham temperaturas ótimas mais altas do que outros grupos de algas (ROBARTS; ZOHARY, 1987). Paerl (2014) relatou que a temperatura ótima das cianobactérias é superior a 25 °C, sobrepondo-se à das algas verdes (27-32.8 °C), mas sendo claramente diferente da faixa de temperatura ótima dos dinoflagelados (17-27 °C) e diatomáceas (17-22 °C), o que tornaria esse grupo um forte competidor na área de descarga do efluente térmico, sobretudo nas regiões tropicais. Experimentos revelaram ainda que o aumento da temperatura causa um aumento no teor de toxinas desses organismos (BRUTEMARK et al., 2015).

Além disso, cianobactérias conseguem regular sua flutuabilidade, uma vez que são capazes de formar vesículas intracelulares preenchidas de gás, as quais possibilitam que esses

organismos se mantêm estáveis em ambientes submetidos a intensa estratificação térmica e prevaleçam sobre outros táxons (PAERL; HUISMAN, 2008).

No entanto, é importante notar que, devido às suas proporções microscópicas, a passagem do fitoplâncton não é bloqueada pelo sistema de captação de água da usina (BIENFANG; JOHNSON, 1980). Por consequência, há um constante influxo desses indivíduos da área de captação para a área de descarga, unindo populações de diferentes locais, o que poderia dificultar a determinação do efeito da temperatura causado na população natural da área impactada.

Além disso, outras características do efluente podem causar alterações nas comunidades na área impactada, atrapalhando, assim, a distinção entre o que é efeito do aumento da temperatura e o que é causado por outras variáveis. Poornima et al. (2006) indicaram que a concentração de cloro do efluente causou uma maior redução na produtividade do fitoplâncton em comparação ao estresse térmico, o que é consistente com os resultados de Brook e Baker (1972), para o qual obteve-se uma redução nas taxas de fotossíntese e respiração, principalmente atribuída à cloração.

Segundo Grimes (1975), os efeitos causados pelo aumento de temperatura são geralmente detectados a partir de alterações na composição das comunidades biológicas, reiterando os resultados do presente trabalho, segundo o qual alterações foram observadas, primariamente, em parâmetros ecológicos referentes a estrutura e composição das comunidades, como abundância, distribuição espacial, dominância, densidade e riqueza de espécies.

Mudanças na estrutura de uma comunidade podem refletir alterações graduais nas condições ambientais durante um longo período, assim como são capazes de refletir alterações bruscas causadas por eventos catastróficos (GILLER et al., 1991; POULARD; BLANCHARD, 2005). Nesse sentido, investigações sobre mudanças na estrutura e composição das comunidades, a partir da avaliação dos padrões de distribuição e de métricas de riqueza, diversidade, dominância e abundância das espécies, podem ser úteis para medir a natureza e a extensão dos impactos em uma determinada comunidade (ATTRILL; DEPLEDGE, 1997). Contudo, essa abordagem possui limitações, uma vez que se baseia apenas na identidade das espécies (LAMARRE et al., 2020).

Por outro lado, usar atributos biológicos mensuráveis, chamadas de traços funcionais, têm permitido detectar alterações na performance dos organismos e nos processos ecossistêmicos, de modo que inferências podem ser feitas mesmo que existam lacunas no que diz respeito à história natural das espécies (MCGILL et al., 2006; VIOLLE et al., 2007).

Espécies que compartilham atributos funcionais semelhantes podem ter respostas semelhantes às flutuações de temperatura, e essas respostas podem ser mais assertivas do que abordagens que avaliem somente quais espécies aumentaram ou diminuíram em abundância (DIDHAM et al., 1996). É importante que se leve em consideração o papel que as espécies desempenham no ecossistema para que seja possível prever a magnitude do impacto naquele local (REGOS et al., 2019).

#### 4.3 METANÁLISE

O tamanho de efeito geral encontrado demonstrou que houve um aumento significativo de temperatura nas áreas de descarga do efluente térmico em relação às áreas de referência e essa tendência foi mais pronunciada nos ambientes subtropicais e temperados (*i.e.* altas latitudes) em comparação com os ambientes tropicais (*i.e.* baixas latitudes).

Os maiores valores de  $\Delta T$  nos ambientes subtropicais e temperados podem estar relacionados às variações climáticas sazonais. Em regiões de altas latitudes, por exemplo, há uma grande amplitude térmica entre as estações do ano, como inverno e verão, o que não ocorre nos ambientes tropicais (LINACRE; GEETS, 1997). Desta forma, ainda que a temperatura da água liberada na saída de descarga seja a mesma ao longo de todo o ano, em estações mais frias como o inverno, por exemplo, a diferença entre esse efluente térmico e a água nas áreas de referência tende a ser maior, principalmente em regiões de altas latitudes, onde as variações sazonais são mais extremas.

TANG et al. (2003), conduzindo um estudo de sensoriamento remoto em uma usina da China, reportou que durante os meses de inverno, a pluma térmica se localiza em uma área dentro de alguns quilômetros da usina, e a diferença de temperatura entre as áreas sob influência da pluma e áreas que não estão sujeitas a ela é de cerca de 1,5 °C. Durante os meses de verão e outono, a pluma térmica aumenta seu alcance, se estendendo de 8 a 10 km, e a diferença de temperatura é de cerca de 1,0 °C. Isso mostra que a variação em torno da diferença entre as médias de temperatura da água é influenciada, em parte, pelas diferenças climáticas entre estações do ano, as quais são mais acentuadas em regiões de altas latitudes. No entanto, sugere-se que essa relação seja melhor investigada para determinar quais propriedades físicas da pluma térmica em associação às condições climáticas sazonais contribuem para que essa diferença seja observada.

As recomendações do Grupo Internacional de Especialistas sobre os Aspectos Científicos da Poluição Marinha são de que o  $\Delta T$  entre a área de descarga do efluente e as áreas de referências não ultrapasse 7 °C nas águas subtropicais e 5 °C em águas tropicais (GESAMP,

1984). Essa diferença está relacionada ao fato de que as temperaturas em regiões tropicais são naturalmente altas, principalmente durante o verão, de modo que um aumento adicional pode desencadear efeitos deletérios nas comunidades biológicas locais (SURESH et al., 1993).

Estudos mostram que espécies de regiões tropicais tendem a ser mais sensíveis ao aumento da temperatura uma vez que vivem muito próximas ao seu limite térmico e evoluíram em um ambiente com limitadas flutuações de temperatura. Diante dessa condição, a faixa de tolerância térmica dessas espécies é geralmente mais estreita do que aquela observada para espécies de regiões temperadas, capazes de se adaptar a condições variadas de temperatura (TEWKSBURY et al. 2008; BOZINOVIC et al., 2011). Para essas espécies que vivem em altas latitudes, onde a temperatura tende a ser mais fria, o aumento causado pela descarga do efluente das usinas pode aumentar taxas metabólicas, favorecer o crescimento e estender a época reprodutiva (YU et al., 2007; SANDSTRÖM et al., 1997).

Os parâmetros utilizados como um proxy para o volume de água liberado na descarga (i.e. capacidade de geração elétrica e número de reatores) não foram significativos, o que pode estar relacionado a ação de outros fatores, que atuam no sentido de mascarar qualquer possível efeito causado pela capacidade de geração elétrica e pelo número de reatores da usina. Sabe-se que a magnitude da temperatura e o alcance da pluma térmica nos corpos d'água variam de acordo com muitos fatores naturais. Esses fatores incluem ondas, velocidade e direção das correntes marítimas (ZHANG et al., 2013; JIA et al., 2016), velocidade e direção do vento (LENTZ; LARGIER, 2006), topografia do fundo (CHENG et al., 2011) e profundidade (LIU et al., 2017). A exposição a ventos em alta velocidade, por exemplo, poderia dispersar e misturar a pluma térmica mais rapidamente, de modo que, mesmo com um grande volume de água sendo liberado na descarga, a diferença de temperatura entre área impactada e área de referência não seria tão evidente.

Outros fatores importantes associados a isso são a velocidade e fluxo de descarga do próprio efluente, além da distância em relação à descarga utilizada para a medição de temperatura (ABELSON; DENNY, 1997; HUANG et al., 2019). Quanto mais afastado do ponto de descarga, a tendência é de que menores sejam as temperaturas registradas (HUANG et al., 2019). Como cada estudo estabelece uma distância diferente para as amostragens, é possível que temperaturas mais altas sejam registradas em uma usina que libere menor volume de água devido a medição ter sido realizada no ponto mais próximo à descarga, enquanto em outras usinas, mesmo com um grande volume de água liberado, essa medição pode ter sido conduzida a uma distância maior, o que mascararia qualquer efeito imediato que o efluente poderia ter sobre a temperatura da água.

#### 4.4 LIMITAÇÕES DOS ESTUDOS PRIMÁRIOS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A qualidade dos resultados gerados pelos estudos primários e o fornecimento de detalhes metodológicos são fundamentais para a realização de um bom trabalho qualitativo e metanalítico. Contudo, dificilmente todas as informações necessárias estão presentes, ou, caso estejam, são apresentadas de diferentes formas, o que pode dificultar sua padronização para que sejam incluídas na análise.

Alguns estudos foram excluídos por não apresentarem o tipo específico de usina, suas coordenadas geográficas ou nome que permitisse identificá-la, tratando, de maneira mais genérica, como usinas térmicas. Isso faz com que informações sobre o impacto térmico de usinas nucleares possam estar sendo perdidas pela falta de detalhamento do artigo.

Em outro caso, um estudo confirmou que o trabalho foi conduzido em uma usina nuclear e, após atender outros critérios, foi incluído na análise. Porém, não apresentou as coordenadas geográficas indicando a localização da usina nem seu nome para que as coordenadas fossem acessadas, indicando apenas que se situava na porção norte de Taiwan. Felizmente, as únicas duas usinas nucleares situadas nessa região já haviam sido citadas em outros artigos e sua inclusão no mapa já havia sido feita. Assim, foi possível garantir a veracidade no número total de usinas investigadas ( $n = 31$ ). Além disso, esse artigo não foi utilizado na metanálise, uma vez que as informações de temperatura fornecidas inviabilizavam a obtenção do desvio padrão. Contudo, se não houvesse esse impeditivo, a ausência de coordenadas geográficas seria um fator limitante, já que a latitude foi utilizada como moderador na análise do tamanho de efeito da diferença de temperatura.

Neste estudo, foram utilizados a diferença de temperatura média entre as áreas impactada e referência, o desvio padrão e o  $n$  amostral. Contudo, alguns artigos apresentavam um único valor de temperatura, inviabilizando o cálculo da média e do desvio padrão, e por isso, não foram incluídos na metanálise. Neste tipo de estudo, em que se avalia o efeito da temperatura sobre os organismos, é esperado que haja um detalhamento não só referente aos dados de temperatura obtidos, como também em relação à metodologia utilizada para medi-la. Alguns artigos não informavam a que profundidade da coluna d'água as medições haviam sido realizadas, seja de forma quantitativa (em  $m$ ) seja de forma qualitativa (superfície x fundo), o que seria fundamental para explicar, por exemplo, baixas diferenças de temperatura entre área impactada e de referência no caso de medições conduzidas próximas ao substrato, ou seja, fora da zona de influência da pluma térmica. Muitos não eram claros a respeito de quantas vezes

foram realizadas as medições de temperatura, de modo que, para os casos em que faltavam informações no texto, os dados foram extraídos de gráficos de temperatura e o n amostral foi determinado pela proponente do presente estudo. Todos os fatores citados fazem com que informações sejam perdidas ou não sejam representadas da maneira mais fiel possível.

Sugere-se, portanto, que os artigos indiquem a que profundidade a temperatura foi medida, incluindo a descrição da profundidade máxima do local amostrado para servir de referencial. Além disso, recomenda-se que forneçam os valores médios de temperatura associados ao desvio padrão e ao n amostral e, se possível, que incluam os valores brutos em material suplementar, juntamente com as datas e horário de coleta. Essas informações contribuirão com futuras análises, otimizando o tempo gasto na padronização do material e melhorando a qualidade de apresentação dos dados.

Embora a temperatura tenha sido a variável investigada neste estudo, já foi reportado que a combinação com outros fatores, como estação do ano, profundidade, turbidez, disponibilidade de luz e nutrientes, parece ser mais importante do que o efeito causado por um fator isolado, especialmente em situações não controladas, em que múltiplos fatores interagem entre si, dificultando a determinação do papel de cada um sobre o efeito observado (LOTZE; WORM, 2002; WINDER; SOMMER, 2012). Na operação de uma usina nuclear, existem ainda dois fatores adicionais responsáveis por provocar alterações significativas nas comunidades biológicas, sendo eles: o uso de cloro como biocida para impedir a bioincrustação nas tubulações (JENNER et al., 1997) e a alta velocidade do fluxo de água liberado, capaz de interferir no assentamento de larvas de invertebrados na área de descarga (ABELSON; DENNY, 1997).

Chuang et al. (2009) observaram que a concentração de cloro foi o principal fator responsável pela diminuição da produtividade primária do fitoplâncton na área de descarga. Carpenter et al. (1974), ao avaliar a sobrevivência de copépodes captados pelo sistema de refrigeração, sugeriu que estes morrem após alguns dias devido ao estresse causado durante a passagem pelos dutos. Fox e Moyer (1975), por sua vez, estudando o efeito da cloração na produtividade estuarina observaram que o efeito combinado da passagem dos organismos pela usina e da cloração diminuiu a produtividade primária média em 57 %. Na ausência de cloro, um  $\Delta T$  de 4.4-5.5 °C provocou uma redução de apenas 13 % da produtividade. Portanto, reportar alterações na biota de áreas sob influência da descarga térmica não necessariamente significa que essas alterações foram causadas pela diferença de temperatura, embora, no geral, seja a variável mais discrepante. É necessário que se considerem outros parâmetros, comparando seus valores entre as áreas impactada e referência, a fim de gerar resultados mais

fidedignos. Nesse contexto, a realização de experimentos em laboratório se qualifica como uma metodologia complementar essencial ao entendimento da resposta de diferentes organismos a fatores isolados e combinados (CHUANG et al., 2009; ANDERSON et al., 2022).

Na metanálise, além da latitude, da capacidade de geração e do número de reatores, outros fatores poderiam atuar como moderadores, como, por exemplo, a distância dos locais amostrados em relação à descarga do efluente, velocidade do vento e velocidade e vazão do efluente térmico. Diferentemente do observado para a capacidade de geração e número de reatores, há uma ampla variedade de estudos na literatura que suportam a hipótese de que a velocidade do vento e de correntes são fatores capazes de alterar a dinâmica térmica do ambiente (LENTZ; LARGIER, 2006; JIA et al., 2016; ZHANG et al., 2013). Além disso, a inclusão de dados de distância poderia ajudar a explicar o porquê de menores ou maiores diferenças de temperatura entre área impactada e referência, uma vez que quanto mais afastado da descarga é o ponto de medição da temperatura, menores tendem a ser as temperaturas registradas, o que levaria a diferenças de temperatura pouco pronunciadas. Contudo, a maioria dos estudos primários não apresentava essas informações e, portanto, elas não foram utilizadas. Recomenda-se, portanto, que em futuros trabalhos conduzidos *in situ* dentro dessa temática, esses dados sejam incluídos na metodologia, ainda que não sejam utilizados pelos pesquisadores.

Um dos principais desafios para monitorar o impacto das atividades humanas na biodiversidade é identificar quais mudanças são naturais e quais são resultantes de atividades antrópicas (HEWITT et al., 2001). Isso tem levado ao desenvolvimento e aprimoramento de muitas metodologias de avaliação de impacto. Nos estudos primários avaliados, o método de Controle-Impacto (CI) foi o mais utilizado. Essa abordagem é utilizada para casos em que o impacto já ocorreu e, por isso, se baseia na comparação entre locais que sofreram a intervenção e locais próximos, sob condições naturais, definidos como controle (SMOKOROWSKI; RANDALL, 2017).

Ao definir a abordagem para avaliar o impacto térmico de usinas nucleares, o maior problema a ser superado é que geralmente há apenas um local potencialmente impactado (STEWART-OATEN et al., 1986). Nesse contexto, alguns trabalhos têm utilizado apenas um local de controle para contrastar com o potencialmente impactado (*e.g.* CHEN et al., 2004). No entanto, essa abordagem assume que ambas as áreas apresentavam características físico-químicas e biológicas similares antes da perturbação ocorrer, podendo levar a resultados enviesados, como, por exemplo, à inferência de que as diferenças observadas decorreram do impacto causado pelo aumento da temperatura, quando poderiam ser resultado de diferenças

naturais entre os locais comparados (UNDERWOOD, 1992). Em contrapartida, um resultado que reportasse a ausência de diferenças entre os dois locais amostrados não seria uma evidência de que o impacto de fato não existe, uma vez que ele poderia nunca ser detectado se houvesse uma flutuação simultânea no local de controle.

Um método mais adequado envolve a escolha de mais de um local de controle, com amostragens replicadas, tanto localmente quanto temporalmente, e de preferência considerando também o período de antes e depois da ocorrência do impacto (UNDERWOOD, 1994). Assim, seria possível não só discernir o que é resultado de uma variabilidade natural do que é causado por fatores externos, como também esclareceria informações de como eram as condições ambientais antes do impacto ocorrer naquele local.

#### 4.5 PERSPECTIVAS FUTURAS

Embora as usinas prevejam um programa permanente de monitoramento da fauna e da flora para cumprir com exigências legais, os resultados obtidos através desse programa não parecem ser convertidos em artigos científicos e/ou publicados com detalhamento metodológico e estatístico, uma vez que a única obrigatoriedade é de que sejam apresentados no formato de relatórios perante os órgãos ambientais competentes (*e.g.* ELETRONUCLEAR, 2017). É importante, portanto, que pesquisadores vinculados a instituições de ensino e pesquisa conduzam monitoramentos de longa duração nessas áreas, a fim de formular perguntas direcionadas a grupos taxonômicos específicos e gerar resultados mais detalhados, publicizando esse estudo para toda a comunidade científica.

Esses resultados servem de base para orientar políticas ambientais no que concerne a instalação e operação das usinas nucleares. Além disso, o estudo dos efeitos do aumento de temperatura na área de saída do efluente térmico pode servir como uma simulação, em escala local, para prever possíveis consequências do agravamento do aquecimento global a longo prazo.

O próximo passo deste estudo inclui verificar se os parâmetros ecológicos afetados nos estudos primários estão variando mais no sentido de aumento ou diminuição, associando-os com as características climáticas locais. Dessa forma, será possível entender melhor as consequências do aumento de temperatura de acordo com variações em fatores externos.

Considerando os projetos de construção de novas usinas nucleares nos próximos anos e buscando reduzir o impacto causado pelo efluente térmico, medidas mitigadoras podem ser adotadas como a escolha dos locais de instalação de novas usinas costeiras considerando características ambientais que forneçam rápida dispersão da pluma térmica e o controle da

temperatura da água na área de descarga para que esta coincida com a tolerância térmica dos organismos mais sensíveis (CAPUZZO, 1980).

## 5 CONCLUSÃO

Neste estudo, foi confirmado que há um aumento significativo de temperatura nas áreas de descarga do efluente térmico em relação às áreas de referência. O aumento de temperatura na área de saída do efluente térmico provoca alterações nos organismos marinhos, com estudos registrando, majoritariamente, mudanças na estrutura e composição das comunidades locais, sendo o fitoplâncton o grupo mais citado dentre aqueles suscetíveis ao impacto. Alterações nesses organismos, que constituem a base da cadeia trófica, são capazes de causar mudanças na dinâmica de todo o ecossistema aquático.

Quanto ao cenário da produção científica nessa área de estudo, foi observado que o número de publicações tem aumentado a cada década e que o maior número de publicações se concentra nos periódicos *Marine Pollution Bulletin*, *Journal of Thermal Biology* e *Hydrobiologia*. O cálculo de conectância revelou uma baixa interação entre os autores e a análise de palavras-chave mostrou que os termos ‘Phytoplankton’ e ‘Daya Bay’ foram os mais citados.

Estes resultados destacam a importância da condução de estudos cienciométricos e meta-analíticos para se ter uma visão global da produção científica sobre o impacto térmico de usinas nucleares, além de permitir que sejam feitas generalizações cuidadosas no ramo da ecologia, contribuindo assim, com a tomada de decisões baseadas em evidências. Por fim, a utilização de dados provenientes de estudos primários auxilia na detecção de limitações metodológicas e de lacunas na apresentação de resultados a fim de orientar a execução e o aprimoramento de futuros trabalhos.

## REFERÊNCIAS

- ABELSON, A.; DENNY, M. Settlement of marine organisms in flow. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 28, p. 317–339, 1997.
- AHAMED, M.S. *et al.* Effect of cooling water chlorination on primary productivity of entrained phytoplankton at Kalpakkam, east coast of India. **Hydrobiologia**, v. 271, p. 165–168, 1993.
- AHAMED, M.S. *et al.* Effect of power plant heated effluent on distribution of sedentary fauna and flora. **Indian Journal of Marine Sciences**, v. 21, p. 188–191, 1992.
- ALAM, F.; SARKAR, R.; CHOWDHURY, H. Nuclear power plants in emerging economies and human resource development: A review. **Energy Procedia**, v. 160, p. 3–10, 2019.
- ALMENDE, B.V. *et al.* (2021). visNetwork: Network Visualization using 'vis.js' Library. R package version 2.1.0. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=visNetwork>. Acesso em: jul. 2022.
- ANDERSON, D.M.; GLIBERT, P.M.; BURKHOLDER, J.M. Harmful algal blooms and eutrophication: nutrient sources, composition, and consequences. **Estuaries**, v. 25, n. 4, p. 704–726, 2002.
- ANDERSON, S.I. *et al.* The interactive effects of temperature and nutrients on a spring phytoplankton community. **Limnology and Oceanography**, v. 67, n. 3, p. 634–645, 2022.
- ARAÚJO, J.P.G.; KUBOTA, A.H. Sampling frequency evaluation of the marine flora monitoring program at Almirante Álvaro Alberto Nuclear Complex, Rio de Janeiro, Brazil. **Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras**, v. 45, n. 2, p. 375–383, 2016.
- ASSAN, D. *et al.* Effects of Climate Change on Marine Organisms. **American Journal of Climate Change**, v. 9, n. 3, p. 204–216, 2020.
- ATTIA, S.I. The influence of condenser cooling water temperature on the thermal efficiency of a nuclear power plant. **Annals of Nuclear Energy**, v. 80, p. 371–378, 2015.
- ATTRILL, M.J.; DEPLEDGE, M.H. Community and population indicators of ecosystem health: targeting links between levels of biological organisation. **Aquatic toxicology**, v. 38, n. 1-3, p. 183–197, 1997.
- BAMBER, R.N. The influence of rising background temperature on the effects of marine thermal effluents. **Journal of Thermal Biology**, v. 20, n. 1-2, p. 105–110, 1995.
- BENDER-DEMOLL, S. (2021). ndtv: Network Dynamic Temporal Visualizations. R package version 0.13.2. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=ndtv>. Acesso em: jul. 2022
- BIENFANG, P.; JOHNSON, W. Response of subtropical phytoplankton to power plant entrainment. **Environmental Pollution Series A, Ecological and Biological**, v. 22, n. 3, p. 165–178, 1980.

- BOJANOWSKI, M. (2015). Intergraph: Coercion Routines for Network Data Objects. R package version 2.0-2. Disponível em: <http://mbojan.github.io/intergraph>. Acesso em: jul. 2022.
- BOPP, L. *et al.* Potential impact of climate change on marine export production. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 15, p. 81–89, 2001.
- BOUCHET-VALAT, M. (2020). SnowballC: Snowball Stemmers Based on the C 'libstemmer' UTF-8 Library. R package version 0.7.0. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=SnowballC>. Acesso em: jun. 2022.
- BOZINOVIC, F.; CALOSI, P.; SPICER, J.I. Physiological correlates of geographic range in animals. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 42, p. 155–179, 2011.
- BROOK, A.J.; BAKER, A.L. Chlorination at power plants: impact on phytoplankton productivity. **Science**, v. 176, n. 4042, p. 1414–1415, 1972.
- BRUTEMARK, A. *et al.* Growth, toxicity and oxidative stress of a cultured cyanobacterium (*Dolichospermum* sp.) under different CO<sub>2</sub>/pH and temperature conditions. **Phycological Research**, v. 63, p. 56–63, 2015.
- BUTTS, C.T. *et al.* (2021). networkDynamic: Dynamic Extensions for Network Objects. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/networkDynamic/networkDynamic.pdf>. Acesso em: jun. 2022.
- CAPUZZO, J.M. Impact of power-plant discharges on marine zooplankton: A review of thermal, mechanical and biocidal effects. **Helgoländer Meeresuntersuchungen**, v. 33, p. 422–432, 1980.
- CARPENTER, E.J.; PECK, B.B.; ANDERSON, S.J. Survival of copepods passing through a nuclear power station on northeastern Long Island Sound, USA. **Marine Biology**, v. 24, p. 49–55, 1974.
- CARRETO, J.I. *et al.* Mycosporine-like amino acids and xanthophyll-cycle pigments favour a massive spring bloom development of the dinoflagellate *Prorocentrum minimum* in Grande Bay (Argentina), an ozone hole affected area. **Journal of Marine Systems.**, v. 178, p. 15–28, 2018.
- CHAN, A.T. Comparative physiological study of marine diatoms and dinoflagellates in relation to irradiance and cell size. i. growth under continuous light. **Journal of Phycology**, v. 14, n. 4, p. 396–402, 1978.
- CHEN, C.Y.; SHAO, K.T.; TU, Y.Y. Effect of thermal discharges on the fish assemblages of a nuclear power plant in northern Taiwan. **Journal of Marine Science and Technology**, v. 12, n. 5, p. 404–410, 2004.
- CHENG, Y.L.; HAO, Q.Z.; HU, J. Effects of topography on diffusion of thermal discharge in power plant. **Procedia Environmental Sciences**, v. 11, p. 618–623, 2011.

- CHUANG, Y.L.; YANG, H.H.; LIN, H.J. Effects of a thermal discharge from a nuclear power plant on phytoplankton and periphyton in subtropical coastal Waters. **Journal of Sea Research**, v. 61, p. 197–205, 2009.
- COLLINS, S.; BOYD, P.W.; DOBLIN, M.A. Evolution, microbes, and changing ocean conditions. **Annual Review of Marine Science**, v. 12, p. 181–208, 2020.
- COTTINGHAM, K.L. Nutrients and zooplankton as multiple stressors of phytoplankton communities: Evidence from size structure. **Limnology and Oceanography**, v. 44, p. 810–827, 1999.
- CSARDI, G.; NEPUSZ, T. The igraph software package for complex network research. **InterJournal, complex systems**, v. 1695, n. 5, p. 1–9, 2006.
- DAVIS, A.J. *et al.* Making mistakes when predicting shifts in species range in response to global warming. **Nature**, v. 391, p. 783–786, 1998.
- DESCY, J.P.; MOUVET, C. Impact of the Tihange nuclear power plant on the periphyton and the phytoplankton of the Meuse River (Belgium). **Hydrobiologia**, v. 119, n. 2, p. 119–128, 1984.
- DI PANE, J. *et al.* Environmentally induced functional shifts in phytoplankton and their potential consequences for ecosystem functioning. **Global Change Biology**, v. 28, n. 8, p. 2804–2819, 2022.
- DIAS, C.D.O.; BONECKER, S.L.C. Long-term study of zooplankton in the estuarine system of Ribeira Bay, near a power plant (Rio de Janeiro, Brazil). **Hydrobiologia**, v. 614, p. 65–81, 2008.
- DIDHAM, R.K. *et al.* Insects in fragmented forests: a functional approach. **Trends in ecology & evolution**, v. 11, n. 6, p. 255–260, 1996.
- DONG, Z.G. *et al.* Response of growth and development of the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) to thermal discharge from a nuclear power plant. **BMC Ecology**, v. 18, 2018.
- DORMANN, C.F. *et al.* Indices, graphs and null models: analyzing bipartite ecological networks. **The Open Ecology Journal**, v. 2, n. 1, 2009.
- DROTTZ-SJÖBERG, B.M.; SJOBERG, L. Risk perception and worries after the Chernobyl accident. **Journal of Environmental Psychology**, v. 10, n. 2, p. 135–149, 1990.
- EGGER, M. *et al.* Bias in meta-analysis detected by a simple, graphical test. **BMJ**, v. 315, p. 629–634, 1997.
- ELETROBRAS ELETRONUCLEAR. **Relatório das ações desenvolvidas pela Eletrobras Eletronuclear em atendimento aos programas ambientais**. 2017. Disponível em: [licenciamento.ibama.gov.br](http://licenciamento.ibama.gov.br).
- FEHLING, J. *et al.* The relationship between phytoplankton distribution and water column characteristics in North West European shelf sea waters. **PloS one**, v. 7, n. 3, p. e34098, 2012.

- FEINERER, I.; HORNIK, K. (2020). tm: Text Mining Package. R package version 0.7-8. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=tm>. Acesso em: jul. 2022.
- FELLOWS, I. (2018). wordcloud: Word Clouds. R package version 2.6. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=wordcloud>. Acesso em: jun. 2022.
- FIELD, C.B. *et al.* Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components. **Science**, v. 281, p. 237–240, 1998.
- FOX, J.L.; MOYER, M.S. Effect of power plant chlorination on estuarine productivity. **Chesapeake Science**, v. 16, n. 1, p. 66–68, 1975.
- GARFIELD, E. The meaning of the impact factor. **International Journal of Clinical and Health Psychology**, v. 3, n. 2, p. 363–369, 2003.
- GESAMP (IMO/FAO/UNESCO/WMO/WHO/IAEA/ UNEP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution). Thermal discharges in the marine environment. **Reports and Studies**, n. 24, p. 1–44, 1984.
- GILLER, P.S.; SANGPRADUB, N.; TWOMEY, H. Catastrophic flooding and macroinvertebrate community structure. **Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen**, v. 24, n. 3, p. 1724–1729, 1991.
- GITTINGS, J.A. *et al.* Impacts of warming on phytoplankton abundance and phenology in a typical tropical marine ecosystem. **Scientific reports**, v. 8, n. 1, p. 1–12, 2018.
- GLÄNZEL, W. National characteristics in international scientific co-authorship relations. **Scientometrics**, v. 51, p. 69–115, 2001.
- GONZÁLEZ, A.G.; ZYCH, I. Análisis de los criterios de la Comisión Nacional Evaluadora de la Actividad Investigadora (CNEAI) para la concesión de los tramos de investigación en Educación. **Bordón: Revista de pedagogía**, v. 63, n. 2, p. 117–140, 2011.
- GRIMES, C.B. Entrapment of fishes on intake water screens at a steam electric generating station. **Chesapeake Science**, v. 16, n. 3, p. 172–177, 1975.
- HANDCOCK, M. *et al.* (2018). ERGM: Fit, Simulate and Diagnose Exponential-Family Models for Networks. R package version 3.9.4. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=ergm>. Acesso em: jul. 2022.
- HAO, Y. *et al.* Environmental ecological response to increasing water temperature in the Daya Bay, southern China in 1982-2012. **Natural Resources**, v. 7, p. 184–192, 2016.
- HAWKINS, S.J. *et al.* Consequences of climate-driven biodiversity changes for ecosystem functioning of North European rocky shores. **Marine Ecology Progress Series**, v. 396, p. 245–259, 2009.
- HAYASHI, M.; HUGHES, L. The Fukushima nuclear accident and its effect on global energy security. **Energy policy**, v. 59, p. 102–111, 2013.

- HEIN, M.K.; KOPPEN, J.D. Effects of thermally elevated discharges on the structure and composition of estuarine periphyton diatom assemblages. **Estuarine and Coastal Marine Science**, v. 9, p. 385–401, 1979.
- HENSON, S.A. *et al.* Future phytoplankton diversity in a changing climate. **Nature communications**, v. 12, n. 1, p. 1–8, 2021.
- HEWITT, J.E.; THRUSH, S.E.; CUMMINGS, V. J. Assessing environmental impacts: Effects of spatial and temporal variability at likely impact scales. **Ecological Applications**, v. 11, n. 5, p. 1502–1516, 2001.
- HIGGINS, J.P. *et al.* Measuring inconsistency in meta-analyses. **BMJ**, v. 327, p. 557–560, 2003.
- HINDER, S.L. *et al.* Changes in marine dinoflagellate and diatom abundance under climate change. **Nature Climate Change**, v. 2, p. 271–275, 2012.
- HUNG, T.C.; HUANG, C.C.; SHAO, K.T. Ecological survey of coastal water adjacent to nuclear power plants in Taiwan. **Chemistry and Ecology**, v. 15, p. 129–142, 1998.
- HWANG, D.F. *et al.* Levels of heavy metals and vitamin C in deformed thornfish found in thermal waters and effect of vitamin C on deformation of thornfish. **Fisheries Science**, v. 64, n. 2, p. 291–294, 1998.
- ILUS, E.; KESKITALO, J. The response of phytoplankton to increased temperature in the Loviisa archipelago, Gulf of Finland. **Boreal Environment Research**, v. 13, p. 503–516, 2008.
- INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate**. United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2019.
- JANSEN, D.; VON GÖRTZ, R.; HEIDLER, R. Knowledge production and the structure of collaboration networks in two scientific fields. **Scientometrics**, v. 83, n. 1, p. 219–241, 2009.
- JENNER, H.A. *et al.* Chlorination by-products in chlorinated cooling water of some European coastal power stations. **Marine Environmental Research**, v. 43, n. 4, p. 279–293, 1997.
- JIA, H.L. *et al.* Influence of geographic setting on thermal discharge from coastal power plants. **Marine Pollution Bulletin**, v. 111, n. 1-2, p. 106–114, 2016.
- JONES, K.J.; GOWEN, R.J. Influence of stratification and irradiance regime on summer phytoplankton composition in coastal and shelf seas of the British Isles. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 30, p. 557–567, 1990.
- JOURNAL CITATION REPORTS (2021). Disponível em: <https://jcr-clarivate.ez25.periodicos.capes.gov.br/jcr/home>. Acesso em: jul. 2022.
- KATZ, B.R.; MARTIN, J.S. What is research collaboration?. **Research Policy**, v. 26, n. 1, p. 1–18, 1997.

- KEIRSTEAD, J. (2015). scholar: Analyse Citation Data from Google Scholar. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/scholar/scholar.pdf>. Acesso em: jul. 2022.
- KESER, M.; SWENARTON, J.T.; FOERTCH, J.F. Effects of thermal input and climate change on growth of *Ascophyllum nodosum* (Fucales, Phaeophyceae) in eastern Long Island Sound (USA). **Journal of Sea Research**, v. 54, p. 211–220, 2005.
- KESHAVMURTHY, S. *et al.* Symbiont communities and host genetic structure of the brain coral *Platygyra verweyi*, at the outlet of a nuclear power plant and adjacent areas. **Molecular Ecology**, v. 21, n. 17, p. 4393–4407, 2012.
- KIM, B.H. Ecology of a cyanobacterial mat community in a Korean thermal wastewater stream. **Aquatic Ecology**, v. 33, p. 331–338, 1999.
- KIM, H.G.; RHO, H.S.; OH, C.W. Seasonal and spatial variations in nematode assemblages affected by thermal influence of nuclear power plant in Korea (East Sea, Pacific Ocean). **Marine Biology Research**, v. 9, n. 8, p. 725–738, 2013.
- KIM, Y.S.; CHOI, H.G.; NAM, K.W. Seasonal variations of marine algal community in the vicinity of Uljin nuclear power plant, Korea. **Journal of Environmental Biology**, v. 29, n. 4, p. 493–499, 2008.
- KORDAS, R.L.; HARLEY, C.D.G.; O'CONNOR, M.I. Community ecology in a warming world: The influence of temperature on interspecific interactions in marine systems. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, v. 400, p. 218–226, 2011.
- KORICHEVA, J.; JENNIONS, M.D.; LAU, J. Temporal trends in effect sizes: Causes, detection and implications. *In*: KORICHEVA, J.; GUREVITCH, J.; Mengersen, K. (org.). **The handbook of meta-analysis in ecology and evolution**. Princeton: Princeton University Press, 2013. p. 237–254.
- LAMARRE, P.A. *et al.* Chapter Eight - Monitoring tropical insects in the 21st century. *In*: DUMBRELL, A.J.; TURNER, E.C.; FAYLE, T.M. (org.). **Advances in Ecological Research**, Academic Press, 2020. p. 295–330
- LANDSBERG, J.H. The effects of harmful algal blooms on aquatic organisms. **Reviews in fisheries science**, v. 10, n. 2, p. 113–390, 2002.
- LANG, D; CHIEN, G. wordcloud2: Create Word Cloud by 'htmlwidget'. R package version 0.2.1., 2018. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=wordcloud2>. Acesso em: jun. 2022.
- LANGFORD, T.E. Thermal discharges and pollution. **Encyclopedia of Ocean Sciences**, p. 2933–2940, 2001.
- LARDICCI, C.; ROSSI, F.; MALTAGLIATI, F. Detection of thermal pollution: variability of benthic communities at two different spatial scales in an area influenced by a coastal power station. **Marine Pollution Bulletin**, v. 38, p. 296–303, 1999.
- LAWS, E.A. Aquatic Pollution – An Introductory Text. John Wiley and Sons Inc., New York. p. 611, 1993.

- LENTZ, S.J.; LARGIER, J. The Influence of Wind Forcing on the Chesapeake Bay Buoyant Coastal Current. **Journal of Physical Oceanography**, v. 36, n. 7, p. 1305–1316, 2006.
- LEWANDOWSKA, A.M. *et al.* Responses of primary productivity to increased temperature and phytoplankton diversity. **Journal of Sea Research**, v. 72, p. 87–93, 2012.
- LEWANDOWSKA, A.M. *et al.* Temperature effects on phytoplankton diversity — The zooplankton link. **Journal of Sea Research**, v. 85, p. 359–364, 2014.
- LI, K. *et al.* Short-term variation in zooplankton Community from Daya Bay with outbreaks of *Penilia avirostris*. **Oceanologia**, v. 56, n. 3, p. 583–602, 2014.
- LI, T. *et al.* Diatom to dinoflagellate shift in the summer phytoplankton community in a bay impacted by nuclear power plant thermal effluent. **Marine Ecology Progress Series**, v. 424, p. 75–85, 2011.
- LIN, J.; ZOU, X.; HUANG, F. Effects of the thermal discharge from an offshore power plant on plankton and macrobenthic communities in subtropical China. **Marine Pollution Bulletin**, v. 131, p. 106–114, 2018.
- LINACRE, E.T.; GEERTS, B. **Climates and Weather Explained**. 1 ed. Abingdon: Routledge, 1997. 464 p.
- LIU, R. *et al.* Research on effect of water depth and flow intensity in coastal power plant outfall on warming area. **Journal of Waterway and Harbor**, v. 38, n. 1, p. 26–30, 2017.
- LIU, X. *et al.* Responses of phytoplankton communities to environmental variability in the East China Sea. **Ecosystems**, v. 19, p. 832–849, 2016.
- LO, W.T. *et al.* Phytoplankton communities impacted by thermal effluents off two coastal nuclear power plants in subtropical areas of northern Taiwan. **Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences**, v. 27, n. 1, p. 107–120, 2016.
- LOTZE, H.K.; WORM, B. Complex interactions of climatic and ecological controls on macroalgal recruitment. **Limnology and Oceanography**, v. 47, n. 6, p. 1734–1741, 2002.
- LV, H. *et al.* Temperature and nutrients are significant drivers of seasonal shift in phytoplankton community from a drinking water reservoir, subtropical China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 21, p. 5917–5928, 2014.
- MABE, M. The growth and number of journals. **Serials**, v. 16, n. 2, p. 191–198, 2003.
- MARTINEZ-ARROYO, A.; ABUNDES, S.; GONZALEZ, M.E.; ROSAS, I. On the influence of hot-water discharges on phytoplankton communities from a coastal zone of the Gulf of Mexico. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 119, n. 1, p. 209–230, 2000.
- MCCALLEN, E. *et al.* Trends in ecology: shifts in ecological research themes over the past four decades. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 17, n. 2, p. 109–116, 2019.
- MCGILL, B.J. *et al.* Rebuilding community ecology from functional traits. **Trends in ecology & evolution**, v. 21, n. 4, p. 178–185, 2006.

- MOHER, D., SHAMSEER, L.; CLARKE, M. Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 Statement. **Systematic Reviews**, v. 4, n. 1, 2015.
- NAHAS, F.X.; FERREIRA, L.M. A escolha do periódico. **Acta Cirúrgica Brasileira**, v. 20, p. 26–27, 2005.
- NAKAGAWA, S.; SANTOS, E.S.A. Methodological issues and advances in biological meta-analysis. **Evolutionary Ecology**, v. 26, n. 5, p. 1253–1274, 2012.
- NAM, H.; KONISHI, S.; NAM, K.W. Comparative analysis of decision making regarding nuclear policy after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident: Case study in Germany and Japan. **Technology in Society**, v. 67, p. 101735, 2021.
- NELSON, D.M. *et al.* Production and dissolution of biogenic silica in the ocean: Revised global estimates, comparison with regional data and relationship to biogenic sedimentation. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 9, p. 359–372, 1995.
- PAERL, H.W. Mitigating harmful cyanobacterial blooms in a human- and climatically impacted world. **Life**, v. 4, n. 4, p. 998–1012, 2014.
- PAERL, H.W.; HUISMAN, J. Blooms Like It Hot. **Science**, v. 320, p. 57–58, 2008.
- PAN, J.; WANG, Z. **Annual Research Reports (II), Marine Biology Research Station at Daya Bay**. Beijing, China: Science Publishing House (*in Chinese*), 1998.
- PANKHURST, N.W.; MUNDAY, P.L. Effects of climate change on fish reproduction and early life history stages. **Marine and Freshwater Research**, v. 62, n. 9, p. 1015–1026, 2011.
- POORNIMA, E.H. *et al.* Impact of thermal discharge from a tropical coastal power plant on phytoplankton. **Journal of Thermal Biology**, v. 30, n. 4, p. 307–316, 2005.
- POORNIMA, E.H. *et al.* Use of coastal waters as condenser coolant in electric power plants: Impact on phytoplankton and primary productivity. **Journal of Thermal Biology**, v. 31, p. 556–564, 2006.
- POULARD, J.C.; BLANCHARD, F. The impact of climate change on the fish community structure of the eastern continental shelf of the Bay of Biscay. **ICES Journal of Marine Science**, v. 62, n. 7, p. 1436–1443, 2005.
- PRĂVĂLIE, R.; BANDOC, G. Nuclear energy: Between global electricity demand, worldwide decarbonisation imperativeness, and planetary environmental implications. **Journal of environmental management**, v. 209, p. 81–92, 2018.
- QUINTANA, X.D. *et al.* Predation and Competition Effects on the Size Diversity of Aquatic Communities. **Aquatic Sciences**, v. 77, n. 1, p. 45–57, 2015.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <http://www.R-project.org/>. Acesso em: jul. 2022

- REGOS, A. *et al.* Effects of species traits and environmental predictors on performance and transferability of ecological niche models. **Scientific Reports**, v. 9, n. 4221, 2019.
- REUSCH, T.B.H.; BOYD, P.W. Experimental evolution meets marine phytoplankton. **Evolution**, v. 67, p. 1849–1859, 2013.
- RICHARDSON, A.J.; SCHOEMAN, D.S. Climate impact on plankton ecosystems in the Northeast Atlantic. **Science**, v. 305, n. 5690, p. 1609–1612, 2004.
- ROBARTS, R.D.; ZOHARY, T. Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom-forming cyanobacteria. **New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research**, v. 21, p. 391–399, 1987.
- ROHATGI, A. (2015). WebPlotDigitizer (Version 3.9). Disponível em: <http://arohatgi.info/WebPlotDigitizer>. Acesso em: mai. 2022.
- SANDSTRÖM, O. *et al.* Temperature effects on spawning and egg development in Eurasian perch. **Journal of Fish Biology**, v. 51, p. 1015–1024, 1997.
- SCHNEEGANS, S.; STRAZA, T.; LEWIS, J. (eds.). **UNESCO Science Report: the race against time for smarter development**. Paris: UNESCO Publishing, 2021.
- SCHREURS, M.A.; MIRANDA, A. The ethics of nuclear energy: Germany's energy politics after Fukushima. **The Journal of Social Science**, v. 77, p. 9–29, 2014.
- SIEMERING, B. *et al.* Phytoplankton distribution in relation to environmental drivers on the North West European Shelf sea. **PLoS One**, v. 11, p. e0164482, 2016.
- SMOKOROWSKI, K.E.; RANDALL, R.G. Cautions on using the Before-After-Control-Impact design in environmental effects monitoring programs. **FACETS**, v. 2, p. 212–232, 2017.
- SPEIGHT, J.G. Source of water pollution. *In*: \_\_\_\_\_ (org.). **Natural Water Remediation**. Elsevier, 2020. p.165–198.
- STEINHAUSER, G.; BRANDL, A.; JOHNSON, T.E. Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: a review of the environmental impacts. **Science of the Total Environment**, v. 470, p. 800–817, 2014.
- STEWART-OATEN, A.; MURDOCH, W.W.; PARKER, K.R. Environmental impact assessment: "Pseudoreplication" in time?. **Ecology**, v. 67, n. 4, p. 929–940, 1986.
- SURESH, K. *et al.* Impact of power plant heated effluent on the abundance of sedentary organisms, off Kalpakkam, East coast of India. **Hydrobiologia**, v. 268, p. 109–114, 1993.
- SZÉCHY, M.T.M.; KOUTSOUKOS, V.S.; BARBOZA, C.A.M. Long-term decline of brown algal assemblages from southern Brazil under the influence of a nuclear power plant. **Ecological Indicators**, v. 80, p. 258–267.
- TANG, D. *et al.* AVHRR satellite remote sensing and shipboard measurements of the thermal plume from the Daya Bay, nuclear power station, China. **Remote Sensing of Environment**, 84, n. 4, p. 506–515, 2003.

- TEIXEIRA, T.P.; NEVES, L.M.; ARAÚJO, F.G. Effects of a nuclear power plant thermal discharge on habitat complexity and fish community structure in Ilha Grande Bay, Brazil. **Marine Environmental Research**, v. 68, n. 4, p. 188, 2009.
- TEIXEIRA, T.P.; NEVES, L.M.; ARAÚJO, F.G. Thermal impact of a nuclear power plant in a coastal area in Southeastern Brazil: effects of heating and physical structure on benthic cover and fish communities. **Hydrobiologia**, v. 684, p. 161–175, 2012.
- TEWKSBURY, J.J.; HUEY, B.B.; DEUTSCH, C.A. Putting the heat on tropical animals. **Science**, v. 320, p. 1296–1297, 2008.
- UNDERWOOD, A.J. Beyond BACI: the detection of environmental impacts on populations in the real, but variable, world. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, v. 161, n. 2, p. 145–178, 1992.
- UNDERWOOD, A.J. On Beyond BACI: Sampling Designs that Might Reliably Detect Environmental Disturbances. **Ecological Applications**, v. 4, n. 1, p. 3–15, 1994.
- VIECHTBAUER, W. Conducting meta-analyses in R with the metafor package. **Journal of Statistical Software**, v. 36, n. 3, p. 1–48, 2010.
- VILANOVA, E. *et al.* The impact of a nuclear power plant discharge on the sponge community of a tropical bay (SE Brazil). **Bollettino dei musei e degli istituti biologici dell'Universita di Genova**, v. 68, p. 647–654, 2004.
- VIOLLE, C. *et al.* Let the concept of trait be functional!. **Oikos**, v. 116, n. 5, p. 882–892, 2007.
- WALTHER, G.R. *et al.* Ecological responses to recent climate change. **Nature**, v. 416, n. 6879, p. 389–395, 2002.
- WANG, Y.S. *et al.* Ecological environment changes in Daya Bay, China, from 1982 to 2004. **Marine Pollution Bulletin**, v. 56, p. 1871–1879, 2008.
- WANG, Y.S. *et al.* Identification of water quality and benthos characteristics in Daya Bay, China, from 2001 to 2004. **International Journal of Oceanography and Hydrobiology**, v. 40, n. 1, p. 82–95, 2011.
- WANG, Y.S. *et al.* Identification of water quality and zooplankton characteristics in Daya Bay, China, from 2001 to 2004. **Environmental Earth Sciences**, v. 66, p. 655–671, 2012.
- WANG, Y.S. *et al.* Multivariate statistical analysis of water quality and phytoplankton characteristics in Daya Bay, China, from 1999 to 2002. **Oceanologia**, v. 48, n. 2, p. 193–211, 2006.
- WEN, W.Y.; HE, Y.Q.; ZHEN, Q.H. Environmental study of Daya Bay. **Tropical Ocean**, v. 11, n. 2, p. 25–30, 1992.
- WICKHAM, H. (2019). stringr: Simple, Consistent Wrappers for Common String Operations. R package version 1.4.0. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=stringr>. Acesso em: jul. 2022.

- WICKHAM, H. *et al.* Welcome to the Tidyverse. **Journal of open source software**, v. 4, n. 43, p. 1686, 2019.
- WICKHAM, H. **ggplot2: Elegant graphics for data analysis**. Springer-Verlag, New York, 2016.
- WICKHAM, H; *et al.* (2022). dplyr: A Grammar of Data Manipulation. R package version 1.0.9. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>. Acesso em: jul. 2022.
- WOLF, M.A.; SFRISO, A.; MORO, I. Thermal pollution and settlement of new tropical alien species: the case of *Grateloupia yinggehaiensis* (Rhodophyta) in the Venice Lagoon. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 147, p. 11–16, 2014.
- WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements. Disponível em: <https://www.world-nuclear.org/>. Acesso em: jul. 2022.
- XIAO, W. *et al.* Warming and eutrophication combine to restructure diatoms and dinoflagellates. **Water research**, v. 128, p. 206–216, 2018.
- XIE, Y. *et al.* Effect of increases in temperature and nutrients on phytoplankton community structure and photosynthesis in the western English Channel. **Marine Ecology Progress Series**, v. 519, p. 61–73, 2015.
- YU, J. *et al.* Changes of water temperature and harmful algal bloom in the Daya Bay in the northern South China Sea. **Marine Science Bulletin**, v. 9, n. 2, 2007.
- ZEHR, J.P. Nitrogen fixation by marine cyanobacteria. **Trends in Microbiology**, v. 19, p. 162–73, 2011.
- ZHANG, H.R. *et al.* Study on the temperature rise characteristics and influence effects of thermal discharge from coastal power plant in Xiangshan Bay. **Journal of Shanghai Ocean University**, v. 22, n. 2, p. 274–281, 2013.
- ZHOU, Y. Why is China going nuclear?. **Energy Policy**, v. 38, n. 7, p. 3755–3762, 2010.

**APÊNDICE A:** Lista dos artigos incluídos na revisão sistemática e na metanálise. Os artigos que não entraram na metanálise (n = 24) estão destacados em negrito.

ACHARY, M.S. *et al.* Nutrient dynamics and seasonal variation of phytoplankton assemblages in the coastal waters of southwest Bay of Bengal. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 186, p. 5681–5695, 2014.

AHAMED, M.S. *et al.* Effect of power plant heated effluent on distribution of sedentary fauna and flora. **Indian Journal of Marine Sciences**, v. 21, p. 188–191, 1992.

AHAMED, M.S. *et al.* Effect of cooling water chlorination on primary productivity of entrained phytoplankton at Kalpakkam, east coast of India. **Hydrobiologia**, v. 271, p. 165–168, 1993.

**BARNETT, P.R.O. Some changes in intertidal sand communities due to thermal pollution. Proceedings of the Royal Society of London Series B., v. 177, p. 353–364, 1971.**

BOBERG, G.; GANNING, B.; YTTERBORN, K.H. Distribution and biomass of *Fucus vesiculosus* L. near a cooling-water effluent from a nuclear power plant in the Baltic Sea estimated by aerial photography. **International Journal of Remote Sensing**, v. 7, n. 12, p. 1797–1807, 1986.

CARPENTER, E.J.; PECK, B.B.; ANDERSON, S.J. Survival of copepods passing through a nuclear power station on northeastern Long Island Sound, USA. **Marine Biology**, v. 24, p. 49–55, 1974.

**CHEN, C.T. *et al.* Water temperature records from corals near the nuclear power plant in southern Taiwan. Science in China (Series D), v. 44, p. 356–362, 2001.**

CHEN, C.Y.; SHAO, K.T.; TU, Y.Y. Effect of thermal discharges on the fish assemblages of a nuclear power plant in northern Taiwan. **Journal of Marine Science and Technology**, v. 12, n. 5, p. 404–410, 2004.

CHIOU, S.F. *et al.* Analysis of the coral associated bacterial community structures in healthy and diseased corals from off-shore of southern Taiwan. **Journal of Environmental Science and Health Part B**, v. 45, p. 408–415, 2010.

CHUANG, Y.L.; YANG, H.H.; LIN, H.J. Effects of a thermal discharge from a nuclear power plant on phytoplankton and periphyton in subtropical coastal Waters. **Journal of Sea Research**, v. 61, p. 197–205, 2009.

DAVID, V.; SAUTOUR, B.; CHARDY, P. Successful colonization of the calanoid copepod *Acartia tonsa* in the oligo-mesohaline area of the Gironde estuary (SW France) – Natural or anthropogenic forcing?. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 71, p. 429–442, 2007.

DIAS, C.D.O.; BONECKER, S.L.C. Long-term study of zooplankton in the estuarine system of Ribeira Bay, near a power plant (Rio de Janeiro, Brazil). **Hydrobiologia**, v. 614, p. 65–81, 2008.

- DONG, Z.G. *et al.* Response of growth and development of the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) to thermal discharge from a nuclear power plant. **BMC Ecology**, v. 18, 2018.
- EDGREN, M.; OLSSON, M.; REUTERGÄRDH, L. A one year study of the seasonal variations of sDDT and PCB levels in fish from heated and unheated areas near a nuclear power plant. **Chemosphere**, v. 10, n. 5, p. 447–452, 1981.
- FLORIN, A.B. *et al.* First records of Conrad's false mussel, *Mytilopsis leucophaeata* in the Southern Bothnian Sea, Sweden, near a nuclear power plant. **BioInvasions Records**, v. 2, n. 4, p. 303–309, 2013.
- HAO, Y. *et al.* Environmental ecological response to increasing water temperature in the Daya Bay, southern China in 1982-2012. Natural Resources**, v. 7, p. 184–192, 2016.
- HEIN, M.K.; KOPPEN, J.D. Effects of thermally elevated discharges on the structure and composition of estuarine periphyton diatom assemblages. **Estuarine and Coastal Marine Science**, v. 9, p. 385–401, 1979.
- HILLEBRAND, H.; SOININEN, J.; SNOEIJIS, P. Warming leads to higher species turnover in a coastal ecosystem. **Global Change Biology**, v. 16, p. 1181–1193, 2010.
- HOAGLAND, K.E.; TURNER, R.D. Range extensions of teredinids (shipworms) and polychaetes in the vicinity of a temperate-zone nuclear generating station. Marine Biology**, v. 58, p. 55–64, 1980.
- HSU, C.M. *et al.* Temporal and spatial variations in symbiont communities of catch bowl coral *Isopora palifera* (Scleractinia: Acroporidae) on reefs in Kenting National Park, Taiwan. **Zoological Studies**, v. 51, n. 8, p. 1343–1353, 2012.
- HUGGETT, J.A.; COOK, P.A. The effects of entrainment on plankton at Koeberg nuclear power station. **South African Journal of Marine Sciences**, v. 11, p. 211–226, 1991.
- HUNG, T.C.; HUANG, C.C.; SHAO, K.T. Ecological survey of coastal water adjacent to nuclear power plants in Taiwan. **Chemistry and Ecology**, v. 15, p. 129–142, 1998.
- HUSSAIN, K.J. *et al.* Abundance pattern of wedge clam *Donax cuneatus* (L.) in different spatial scale in the vicinity of a coastal nuclear power plant. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 163, p. 185–194, 2010.
- HWANG, D.F. *et al.* Levels of heavy metals and vitamin C in deformed thornfish found in thermal waters and effect of vitamin C on deformation of thornfish. Fisheries Science**, v. 64, n. 2, p. 291–294, 1998.
- ILUS, E.; KESKITALO, J. The response of phytoplankton to increased temperature in the Loviisa archipelago, Gulf of Finland. **Boreal Environment Research**, v. 13, p. 503–516, 2008.
- JAN, R.Q. *et al.* Long-term monitoring of the coral reef fish communities around a nuclear power plant. **Aquatic Ecology**, v. 35, p. 233–243, 2001.

- KAO, K.W. *et al.* Repeated and prolonged temperature anomalies negate Symbiodiniaceae genera shuffling in the coral *Platygyra verweyi* (Scleractinia; Merulinidae). **Zoological Studies**, v. 57, n. 55, 2018.
- KARAS, P. Zooplankton entrainment at Swedish nuclear power plants. **Marine Pollution Bulletin**, v. 24, p. 27–32, 1992.
- KASTENDIEK, J.; SCHROETER, S.C.; DIXON, J. The effect of the seawater cooling system of a nuclear generating station on the growth of mussels in experimental populations. **Marine Pollution Bulletin**, v. 12, p. 402–407, 1981.
- KENNISH, M.J.; OLSSON, R.K. Effects of thermal discharges on the microstructural growth of *Mercenaria mercenaria*. **Environmental Geology**, v. 1, p. 41–64, 1975.
- KESER, M.; SWENARTON, J.T.; FOERTCH, J.F. Effects of thermal input and climate change on growth of *Ascophyllum nodosum* (Fucales, Phaeophyceae) in eastern Long Island Sound (USA). **Journal of Sea Research**, v. 54, p. 211–220, 2005.
- KESHAVMURTHY, S. *et al.* Symbiont communities and host genetic structure of the brain coral *Platygyra verweyi*, at the outlet of a nuclear power plant and adjacent areas. **Molecular Ecology**, v. 21, v. 17, p. 4393–4407, 2012.
- KESHAVMURTHY, S. *et al.* Can resistant coral-Symbiodinium associations enable coral communities to survive climate change? A study of a site exposed to long-term hot water input. **PeerJ**, v. 2, 2014.
- KESHAVMURTHY, S. *et al.* Specificity trumps flexibility — location-based stable associations between Symbiodiniaceae genera and *Platygyra verweyi* (Scleractinia; Merulinidae). **PeerJ**, v. 8, 2020.
- KHOSRAVI, M. *et al.* Impact of warming on biofouling communities in the northern Persian Gulf. **Journal of Thermal Biology**, v. 85, 2019.
- KIM, H.G.; RHO, H.S.; OH, C.W. Seasonal and spatial variations in nematode assemblages affected by thermal influence of nuclear power plant in Korea (East Sea, Pacific Ocean). **Marine Biology Research**, v. 9, n. 8, p. 725–738, 2013.
- KIM, Y.S.; CHOI, H.G.; NAM, K.W. Seasonal variations of marine algal community in the vicinity of Uljin nuclear power plant, Korea. **Journal of Environmental Biology**, v. 29, n. 4, p. 493–499, 2008.
- KOKAJI, I. The present status for thermal discharge of nuclear power plant. **Progress in Nuclear Energy**, v. 29, p. 413–420, 1995.
- LAINE, A.O.; MATTILA, J.; LEHIKONEN, A. First record of the brackish water dreissenid bivalve *Mytilopsis leucophaeata* in the northern Baltic Sea. **Aquatic Invasions**, v. 1, p. 38–41, 2006.
- LEE, P.W.; TSENG, L.C.; HWANG, J.S. Comparison of mesozooplankton mortality impacted by the cooling systems of two nuclear power plants at the northern Taiwan coast, southern East China Sea. **Marine Pollution Bulletin**, v. 136, p. 114–124, 2018.

- LI, K. *et al.* Short-term variation in zooplankton Community from Daya Bay with outbreaks of *Penilia avirostris*. **Oceanologia**, v. 56, n. 3, p. 583–602, 2014.
- LI, T. *et al.* Diatom to dinoflagellate shift in the summer phytoplankton community in a bay impacted by nuclear power plant thermal effluent. **Marine Ecology Progress Series**, v. 424, p. 75–85, 2011.
- LIN, J.; ZOU, X.; HUANG, F. Effects of the thermal discharge from an offshore power plant on plankton and macrobenthic communities in subtropical China. **Marine Pollution Bulletin**, v. 131, p. 106–114, 2018.
- LIN, L. *et al.* Size-dependent spatio-temporal dynamics of eukaryotic plankton community near nuclear power plant in Beibu Gulf, China. **Journal of Oceanology and Limnology**, v. 39, p. 1910–1925, 2021.
- LO, W.T. *et al.* Phytoplankton communities impacted by thermal effluents off two coastal nuclear power plants in subtropical areas of northern Taiwan. **Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences**, v. 27, n. 1, p. 107–120, 2016.
- LOI, T.N.; WILSON, B.J. Macroinfaunal structure and effects of thermal discharges in a mesohaline habitat of Chesapeake Bay, near a nuclear power plant. **Marine Biology**, v. 55, p. 3–16, 1979.
- LUKSIENE, D.; SANDSTRÖM, O. Reproductive disturbance in a roach (*Rutilus rutilus*) population affected by cooling water discharge. **Journal of Fish Biology**, v. 45, p. 613–625, 1994.
- MASUDA, R. Tropical fishes vanished after the operation of a nuclear power plant was suspended in the Sea of Japan. **PLoS ONE**, v. 15, n. 5, 2020.
- MAYER-PINTO, M. *et al.* How much is too little to detect impacts? A case study of a nuclear power plant. **PLoS ONE**, v. 7, n. 10, 2012.
- MAZIK, K. *et al.* Sublethal effects of a chlorinated and heated effluent on the physiology of the mussel, *Mytilus edulis* L.: A reduction in fitness for survival?. **Marine Pollution Bulletin**, v. 77, n. 1-2, p. 123–131, 2013.
- MUTHULAKSHMI, A.L. *et al.* Impact assessment of nuclear power plant discharge on zooplankton abundance and distribution in coastal waters of Kalpakkam, India. **Ecological Processes**, v. 8, n. 22, 2019.
- NATESAN, U. *et al.* Impact of thermal discharge from a tropical coastal power plant on physico-chemical properties with special nutrients of Kalpakkam coastal Area, southeastern coast of India. **Indian Journal of Geo-Marine Sciences**, v. 44, n. 12, p. 1750–1761, 2015.
- NEUMAN, E.; THORESSON, G.; SANDSTRÖM, O. Swimming activity of perch, *Perca fluviatilis*, in relation to temperature, day-length and consumption. **Annales Zoologici Fennici**, v. 33, p. 669–678, 1996.
- NITSCHKE, P.; MATHER, M.; JUANES, F. Evidence for density-dependent mortality in recruitment of a temperate reef fish, cunner *Tautoglabrus adspersus*, among

similar reefs in the vicinity of an anthropogenic disturbance. **Marine Ecology Progress Series**, v. 226, p. 165–178, 2002.

POORNIMA, E.H. *et al.* Impact of thermal discharge from a tropical coastal power plant on phytoplankton. **Journal of Thermal Biology**, v. 30, p. 307–316, 2005.

POORNIMA, E.H. *et al.* Use of coastal waters as condenser coolant in electric power plants: Impact on phytoplankton and primary productivity. **Journal of Thermal Biology**, v. 31, p. 556–564, 2006.

POTAPOVA, M.; SNOEIJIS, P. The natural life cycle in wild populations of *Diatom moniliformis* (Bacillariophyceae) and its disruption in an aberrant environment. **Journal of Phycology**, v. 33, p. 924–937, 1997.

RAO, T.S. Comparative effect of temperature on biofilm formation in natural and modified marine environment. **Aquatic Ecology**, v. 44, p. 463–478, 2010.

REN, L. *et al.* Bacterioplankton metacommunity processes across thermal gradients: weaker species sorting but stronger niche segregation in summer than in winter in a subtropical bay. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 85, 2019.

ROWINSKI, P.K. *et al.* Warming alters the body shape of European perch *Perca fluviatilis*. **Journal of Fish Biology**, v. 87, p. 1234–1247, 2015.

SANDSTRÖM, O. *et al.* Temperature effects on spawning and egg development in Eurasian perch. **Journal of Fish Biology**, v. 51, p. 1015–1024, 1997.

SANDSTRÖM, O.; NEUMAN, E.; THORESSON, G. Effects of temperature on life history variables in perch. **Journal of Fish Biology**, v. 47, p. 652–670, 1995.

SARAVANAN, P. *et al.* Effects of thermal discharge from a nuclear power plant on culturable bacteria at a tropical coastal location in India. **Journal of Thermal Biology**, v. 33, p. 385–394, 2008.

SASIKUMAR, N.; AZARIAH, J.; NAIR, K.V.K. Changes in the composition of a tropical marine fouling community at a power plant discharge. **Biofouling**, v. 6, p. 221–234, 1993.

SAZYKINA, T.G. Phytoplankton specimen bank for assessing ecological state of NPP cooling ponds. **The Science of the Total Environment**, v. 139/140, 287–295, 1993.

SCHIEL, D.R.; STEINBECK, J.R.; FOSTER, M.S. Ten years of induced ocean warming causes comprehensive changes in marine benthic communities. **Ecology**, v. 85, n. 7, p. 1833–1839, 2004.

SCHNEIDER, C.W. The effect of elevated temperature and reactor shutdown on the benthic marine flora of the Millstone thermal quarry, Connecticut. **Journal of Thermal Biology**, v. 6, p. 1–6, 1981.

SCHROETER, S.C. *et al.* Detecting the ecological effects of environmental impacts: a case study of kelp forest invertebrates. **Ecological Applications**, v. 3, n. 2, p. 331–350, 1993.

- SELLNER, K.G.; KACHUR, M.E.; LYONS, L. Alterations in carbon fixation during power plant entrainment of estuarine phytoplankton. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 21, p. 359–374, 1984.
- SHIAH, F.K. *et al.* A case study of system and planktonic responses in a subtropical warm plume receiving thermal effluents from a power plant. **Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences**, v. 16, n. 2, p. 513–528, 2005.
- SHIAH, F.K. *et al.* Thermal effects on heterotrophic processes in a coastal ecosystem adjacent to a nuclear power plant. **Marine Ecology Progress Series**, v. 309, p. 55–65, 2006.
- SNOEIJIS, P.J.M. **Ecological effects of cooling water discharge on hydrolittoral epilithic diatom communities in the northern Baltic Sea. Diatom Research**, v. 4, n. 2, p. 373–398, 1989.
- SNOEIJIS, P.J.M. **Effects of increasing water temperatures and flow rates on epilithic fauna in a cooling-water discharge basin. Journal of Applied Ecology**, v. 26, p. 935–956, 1989.
- SNOEIJIS, P.J.M. Effects of temperature on spring bloom dynamics of epilithic diatom communities in the Gulf of Bothnia. **Journal of Vegetation Science**, v. 1, p. 599–608, 1990.
- SNOEIJIS, P.J.M.; PRENTICE, I.C. Effects of cooling water discharge on the structure and dynamics of epilithic algal communities in the northern Baltic. **Hydrobiologia**, v. 184, p. 99–123, 1989.
- SONG, X. *et al.* Variation of phytoplankton biomass and primary production in Daya Bay during spring and summer. **Marine Pollution Bulletin**, v. 49, p. 1036–1044, 2004.
- STEINBECK, J.R.; SCHIEL, D.R.; FOSTER, M.S. **Detecting long-term change in complex communities: a case study from the rocky intertidal zone. Ecological Applications**, v. 15, n. 5, p. 1813–1832, 2005.
- SUN, C.C. *et al.* Seasonal variation of water quality and phytoplankton response patterns in Daya Bay, China. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 8, p. 2951–2966, 2011.
- SURESH, K. *et al.* Environmental physiology of the mole crab *Emerita asiatica*, at a power plant discharge area on the east coast of India. **Environmental Pollution**, v. 88, p. 133–136, 1995.
- SURESH, K. *et al.* **Impact of power plant heated effluent on the abundance of sedentary organisms, off Kalpakkam, East coast of India. Hydrobiologia**, v. 268, p. 109–114, 1993.
- SURESH, K.; DURAIRAJ, G.; NAIR, K.V.K. **Harpacticoid copepod distribution on a sandy shore in the vicinity of a power plant discharge, at Kalpakkam, along the east coast of India. Indian Journal of Marine Sciences**, v. 25, p. 307–311, 1996.

- SVENSSON, R.; WIGREN-SVENSSON, M. Effects of cooling water discharge on the vegetation in the Forsmark Biotest Basin, Sweden. **Aquatic Botany**, v. 42, p. 121–141, 1992.
- SZÉCHY, M.T.M.; KOUTSOUKOS, V.S.; BARBOZA, C.A.M. Long-term decline of brown algal assemblages from southern Brazil under the influence of a nuclear power plant. *Ecological Indicators*, v. 80, p. 258–267.**
- TEIXEIRA, T.P.; NEVES, L.M.; ARAÚJO, F.G. Effects of a nuclear power plant thermal discharge on habitat complexity and fish community structure in Ilha Grande Bay, Brazil. **Marine Environmental Research**, v. 68, n. 4, p. 188, 2009.
- TEIXEIRA, T.P.; NEVES, L.M.; ARAÚJO, F.G. The development of a preliminary rock reef fish multimetric index for assessing thermal and urban impacts in a tropical bay. **Marine Pollution Bulletin**, v. 109, n. 1, p. 290–300, 2016.
- TEIXEIRA, T.P.; NEVES, L.M.; ARAÚJO, F.G. Thermal impact of a nuclear power plant in a coastal area in Southeastern Brazil: effects of heating and physical structure on benthic cover and fish communities. **Hydrobiologia**, v. 684, p. 161–175, 2012.
- VILANOVA, E. *et al.* The impact of a nuclear power plant discharge on the sponge community of a tropical bay (SE Brazil). **Bollettino dei musei e degli istituti biologici dell'Universita di Genova**, v. 68, p. 647–654, 2004.
- WANG, J. *et al.* Effects of Liaoning Hongyanhe nuclear power plant on the zooplankton community in summer of 2017. **Journal of Ocean University of China (Oceanic and Coastal Sea Research)**, v. 19, n. 5, p. 1140–1152, 2020.
- WANG, Y.S. *et al.* Ecological environment changes in Daya Bay, China, from 1982 to 2004. *Marine Pollution Bulletin*, v. 56, p. 1871–1879, 2008.**
- WANG, Y.S. *et al.* Identification of water quality and zooplankton characteristics in Daya Bay, China, from 2001 to 2004. **Environmental Earth Sciences**, v. 66, p. 655–671, 2012.
- WANG, Y.S. *et al.* Multivariate statistical analysis of water quality and phytoplankton characteristics in Daya Bay, China, from 1999 to 2002. *Oceanologia*, v. 48, n. 2, p. 193–211, 2006.**
- WANG, Y.S. *et al.* Identification of water quality and benthos characteristics in Daya Bay, China, from 2001 to 2004. **International Journal of Oceanography and Hydrobiology**, v. 40, n. 1, p. 82–95, 2011.
- WANG, Z. *et al.* Phytoplankton community structure and environmental parameters in aquaculture areas of Daya Bay, South China Sea. **Journal of Environmental Sciences**, v. 21, p. 1268–1275, 2009.
- WONG, C.K.; HWANG, J.S.; CHEN, Q.C. Taxonomic composition and grazing impact of calanoid copepods in coastal waters near nuclear power plants in northern Taiwan. **Zoological Studies**, v. 37, n. 4, p. 330–339, 1998.

- XU, C. *et al.* Flexible feeding patterns of copepod *Centropages tenuiremis* in fluctuating conditions: a possible survival strategy to cope with disturbance. **Acta Oceanologica Sinica**, v. 39, n. 2, p. 59–68, 2020.
- YANG, Y.F. *et al.* Zooplankton community structure of the sea surface microlayer near nuclear power plants and marine fish culture zones in Daya Bay. **Chinese Journal of Oceanology and Limnology**, v. 20, n. 2, p. 129–134, 2002.
- YOUNG, J.S.; FRAME, A.B. Some effects of a power plant effluent on estuarine epibenthic organisms. **Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie**, v. 61, n. 1, 37–61, 1976.
- YU, J. *et al.* Changes of water temperature and harmful algal bloom in the Daya Bay in the northern South China Sea. **Marine Science Bulletin**, v. 9, n. 2, 2007.
- YUE, W.Z. *et al.* Effect of temperature on the accumulation of marine biogenic gels in the surface microlayer near the outlet of nuclear power plants and adjacent areas in the Daya Bay, China. **PLoS ONE**, v. 13, n. 6, 2018.

**APÊNDICE B** – Número de artigos incluídos na revisão sistemática por periódico científico.

<b>Periódico</b>	<b>Artigos publicados (n)</b>
Annales Zoologici Fennici	1
Applied and Environmental Microbiology	1
Aquatic Botany	1
Aquatic Ecology	2
Aquatic Invasions	1
Biofouling	1
BioInvasions Records	1
BMC Ecology	1
Boll. Mus. Ist. Biol. Univ. Genova	1
Boreal Environment Research	1
Chemistry and Ecology	1
Chemosphere	1
Diatom Research	1
Ecological Applications	2
Ecological Indicators	1
Ecological Processes	1
Ecology	1
Environmental Earth Sciences	1
Environmental Geology	1
Environmental Monitoring and Assessment	2
Environmental Pollution	1
Estuarine and Coastal Marine Science	1
Estuarine Coastal and Shelf Science	1
Fisheries Science	1
Global Change Biology	1
Hydrobiologia	5
Indian Journal of Geo-Marine Sciences	1
Indian Journal of Marine Sciences	2
Int. J. Environ. Res. Public Health	1
International Journal of Remote Sensing	1
Int. Rev. Ges. Hydrobiologie und Hydrographie	1
Journal of Applied Ecology	1
Journal of Environmental Biology	1
J. Environ. Sci. Health B	1
Journal of Environmental Sciences	1
Journal of Fish Biology	4
Journal of Marine Science and Technology	1

---

Journal of Ocean University of China	1
Journal of Oceanology and Limnology	2
Journal of Phycology	1
Journal of Sea Research	2
Journal of Thermal Biology	5
Journal of Vegetation Science	1
Marine Biology	3
Marine Biology Research	1
Marine Ecology Progress Series	3
Marine Environmental Research	1
Marine Pollution Bulletin	9
Molecular Ecology	1
Natural Resources	1
Oceanologia	2
Oceanologia Sinica	1
Oceanological and Hydrobiological Studies	1
PeerJ	2
PLoS ONE	3
Proceedings of the Royal Society of London Series B	1
Progress in Nuclear Energy	1
Science in China Series D	1
South African Journal of Marine Science	1
Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences	2
The Science of the Total Environment	1
Water, Air and Soil Pollution	1
Zoological Studies	3

---

**APÊNDICE C** – Número de reatores e capacidade de geração elétrica (MWe) das usinas nucleares estudadas pelos artigos incluídos na revisão sistemática. Os artigos incluídos na revisão sistemática estão identificados por ID, primeiro autor e ano de publicação.

<b>ID</b>	<b>Autor</b>	<b>Ano</b>	<b>Usina nuclear</b>	<b>Reatores (n)</b>	<b>Capacidade de geração (MWe)</b>
1	MS Achary et al	2014	Usina nuclear de Madras	2	410
2	MS Ahamed et al	1992	Usina nuclear de Madras	2	410
3	G Boberg et al	1986	Usina nuclear de Oskarshamn	2	1111
4	CY Chen et al	2004	Usina nuclear de Kuosheng	2	1970
5	CT Chen et al	2001	Usina nuclear de Maanshan	2	1874
6	SF Chiou et al	2010	Usina nuclear de Maanshan	2	1874
7	YL Chuang et al	2009	Usina nuclear de Kuosheng	2	1970
8	V David et al	2007	Usina nuclear de Blayais	4	3640
9	CD Dias & SLC Bonecker	2008	Central nuclear Almirante Álvaro Alberto	2	1884
10	Z Dong et al	2018	Usina nuclear de Tianwan	2	2000
11	M Edgren et al	1981	Usina nuclear de Oskarshamn	2	1111
12	AB Florin et al	2013	Usina nuclear de Forsmark	3	3283
13	YJ Hao et al	2012	Usina nuclear de Daya Bay	2	1888
13	YJ Hao et al	2012	Usina nuclear de Ling Ao	4	3914
14	MK Hein & JD Koppen	1979	Central nuclear de Oyster Creek	1	619
15	H Hillebrand et al	2010	Usina nuclear de Forsmark	3	3283
16	CM Hsu et al	2012	Usina nuclear de Maanshan	2	1874
17	JA Huggett & PA Cook	1991	Usina nuclear de Koeberg	2	1854
18	TC Hung et al	1998	Usina nuclear de Maanshan	2	1874
18	TC Hung et al	1998	Usina nuclear de Kuosheng	2	1970
19	KJ Hussain et al	2010	Usina nuclear de Madras	2	410
20	E Ilus & J Kesitalo	2008	Usina nuclear de Loviisa	2	1014
21	KW Kao et al	2018	Usina nuclear de Maanshan	2	1874
22	P Karås	1992	Usina nuclear de Oskarshamn	2	1111
22	P Karås	1992	Usina nuclear de Forsmark	3	3283
22	P Karås	1992	Usina nuclear de Barsebäck	2	1200
22	P Karås	1992	Usina nuclear de Ringhals	2	1733
23	J Kastendiek	1981	Central nuclear de San Onofre	3	2586
24	MJ Kennish & RK Olsson	1975	Central nuclear de Oyster Creek	1	619
25	M Keser et al	2005	Usina nuclear de Millstone	2	1510
26	S Keshavmurthy et al	2012	Usina nuclear de Maanshan	2	1874
27	S Keshavmurthy et al	2020	Usina nuclear de Maanshan	2	1874
28	S Keshavmurthy et al	2014	Usina nuclear de Maanshan	2	1874
29	M Khosravi et al	2019	Usina nuclear de Bushehr	1	915
30	YS Kim et al	2008	Usina nuclear de Hanul	2	1933
31	HG Kim et al	2013	Usina nuclear de Kori	4	3239
32	AO Laine et al	2006	Usina nuclear de Loviisa	2	1014
33	PW Lee et al	2018	Usina nuclear de Kuosheng	2	1970
33	PW Lee et al	2018	Usina nuclear de Jinshan	2	1208

34	T Li et al	2011	Usina nuclear de Daya Bay	2	1888
34	T Li et al	2011	Usina nuclear de Ling Ao	4	3914
35	K Li et al	2014	Usina nuclear de Daya Bay	2	1888
36	J Lin et al	2018	Usina nuclear de Ningde	2	2036
37	L Lin et al	2021	Usina nuclear de Changjiang	2	1202
38	WT Lo et al	2016	Usina nuclear de Jinshan	2	1208
38	WT Lo et al	2016	Usina nuclear de Kuosheng	2	1970
39	TN Loi et al	1979	Usina nuclear de Calvert Cliffs	2	1732
40	D Luksiene & O Sandström	1994	Usina nuclear de Forsmark	3	3283
41	R Masuda	2020	Usina nuclear de Takahama	4	3220
42	M Mayer-Pinto et al	2012	Central nuclear Almirante Álvaro Alberto	2	1884
43	K Mazik et al	2013	Usina nuclear de Heysham	4	2300
44	AL Muthulakshmi et al	2019	Usina nuclear de Madras	2	410
45	U Natesan et al	2015	Usina nuclear de Madras	2	410
46	E Neuman et al	1996	Usina nuclear de Forsmark	3	3283
47	P Nitschke	2002	Usina nuclear de Pilgrim	1	677
48	EH Poornima et al	2005	Usina nuclear de Madras	2	410
49	M Potapova & PJM Snoeijs	1997	Usina nuclear de Forsmark	3	3283
50	TS Rao	2010	Usina nuclear de Madras	2	410
51	L Ren et al	2019	Usina nuclear de Daya Bay	2	1888
51	L Ren et al	2019	Usina nuclear de Ling Ao	4	3914
52	PK Rowinski et al	2015	Usina nuclear de Forsmark	3	3283
53	O Sandstrom et al	1995	Usina nuclear de Forsmark	3	3283
54	P Saravanan et al	2008	Usina nuclear de Madras	2	410
55	N Sasikumar et al	1993	Usina nuclear de Madras	2	410
56	TG Sazykina	1993	Usina nuclear de Leningrado	2	1850
57	DR Schiel et al	2004	Usina nuclear de Diablo Canyon	2	2256
58	SC Schroeter et al	1993	Central nuclear de San Onofre	3	2586
59	KG Sellner et al	1984	Usina nuclear de Calvert Cliffs	2	1732
60	FK Shiah et al	2005	Usina nuclear de Kuosheng	2	1970
61	FK Shiah et al	2006	Usina nuclear de Kuosheng	2	1970
62	PJM Snoeijs & IC Prentice	1989	Usina nuclear de Forsmark	2	2111
63	PJM Snoeijs	1989	Usina nuclear de Forsmark	2	2111
64	PJM Snoeijs	1990	Usina nuclear de Forsmark	3	3283
65	PJM Snoeijs	1989	Usina nuclear de Forsmark	2	2111
66	X Song et al	2004	Usina nuclear de Daya Bay	2	1888
66	X Song et al	2004	Usina nuclear de Ling Ao	2	1900
67	JR Steinbeck et al	2005	Usina nuclear de Diablo Canyon	2	2256
68	CC Sun et al	2011	Usina nuclear de Daya Bay	2	1888
68	CC Sun et al	2011	Usina nuclear de Ling Ao	2	1900
69	K Suresh et al	1993	Usina nuclear de Madras	2	410
70	K Suresh et al	1996	Usina nuclear de Madras	2	410
71	K Suresh et al	1995	Usina nuclear de Madras	2	410
72	MTMD Széchy et al	2017	Central nuclear Almirante Álvaro Alberto	2	1884
73	TP Teixeira et al	2009	Central nuclear Almirante Álvaro Alberto	2	1884
74	TP Teixeira et al	2012	Central nuclear Almirante Álvaro Alberto	2	1884

75	TP Teixeira et al	2016	Central nuclear Almirante Álvaro Alberto	2	1884
76	YS Wang et al	2012	Usina nuclear de Daya Bay	2	1888
76	YS Wang et al	2012	Usina nuclear de Ling Ao	2	1900
77	YS Wang et al	2011	Usina nuclear de Daya Bay	2	1888
77	YS Wang et al	2011	Usina nuclear de Ling Ao	2	1900
78	J Wang et al	2020	Usina nuclear de Hongyanhe	4	4244
79	Z Wang	2009	Usina nuclear de Daya Bay	2	1888
80	Z Wang et al	2009	Usina nuclear de Daya Bay	2	1888
81	CK Wong et al	1998	Usina nuclear de Jinshan	2	1970
82	CL Xu et al	2020	Usina nuclear de Daya Bay	2	1888
82	CL Xu et al	2020	Usina nuclear de Ling Ao	4	3914
83	JS Young & AB Frame	1976	Central nuclear de Oyster Creek	1	619
84	WZ Yue et al	2018	Usina nuclear de Daya Bay	2	1888
84	WZ Yue et al	2018	Usina nuclear de Ling Ao	4	3914
85	P Barnett	1971	Usina nuclear de Hunterston	2	300
86	CW Schneider	1981	Usina nuclear de Millstone	2	1510
87	EJ Carpenter et al	1974	Usina nuclear de Millstone	1	641
88	KE Hoagland & RD Turner	1980	Central nuclear de Oyster Creek	1	619
89	D Hwang et al	1998	NA	NA	NA
90	R Jan et al	2001	Usina nuclear de Maanshan	2	1874
91	I Kokaji	1995	Usina nuclear de Takahama	4	3220
92	EH Poornima et al	2006	Usina nuclear de Forsmark	3	3283
93	O Sandstrom et al	1997	Usina nuclear de Oskarshamn	3	2511
94	MS Ahamed et al	1993	Usina nuclear de Madras	2	410
95	R Svensson & M Wigren-Svensson	1992	Usina nuclear de Forsmark	3	3283
96	E Vilanova et al	2004	Central nuclear Almirante Álvaro Alberto	2	1884
97	Y Wang et al	1999	Usina nuclear de Daya Bay	2	1888
97	Y Wang et al	1999	Usina nuclear de Ling Ao	2	1900
98	J Yu et al	2007	Usina nuclear de Daya Bay	2	1900
98	J Yu et al	2007	Usina nuclear de Ling Ao	2	1888
99	Y Yang et al	2002	Usina nuclear de Daya Bay	2	1900

---

**APÊNDICE D** – Gráficos de diagnóstico de pressupostos do modelo de efeito misto utilizado na metanálise. Neste modelo foi considerada a identidade dos estudos (ID) como fator randômico e a latitude das usinas nucleares como moderador.

