



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA**

PROGRAMA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA VOLUNTÁRIA – PICVOL

**PEÇONHA DEFINIÇÃO DE ÁREAS ESTRATÉGICAS PARA A
DEFESA DA SAÚDE PÚBLICA**

**Efeito das mudanças climáticas na distribuição das espécies de *Conus*
(Gastropoda: Conidae)**

Área do conhecimento: Ecologia.
Subárea do conhecimento: Ecologia Aplicada.
Especialidade do conhecimento: Biologia Computacional.

Relatório Final
Período da bolsa: de setembro de 2022 a agosto de 2023

Este projeto é desenvolvido com bolsa de iniciação científica

PICVOL

Orientador: Prof. Dr. Pablo Ariel Martinez.

Autora: Tuany Siqueira Silva.



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA**

Sumário

1. Introdução	3
2. Objetivos.....	6
3. Metodologia.....	6
4. Resultados e discussões	8
5. Conclusões	16
6. Perspectivas de futuros trabalhos	17
7. Referências bibliográficas.....	17
8. Outras atividades.....	24
9. Material suplementar	25



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA

1. Introdução

As mudanças climáticas têm afetado a distribuição de plantas e animais ao redor do planeta, tanto em ambientes terrestres como em aquáticos (Assan et al., 2020; Taheri et al., 2021). Com a intensificação desse fenômeno pelas ações antrópicas, alterações nos padrões de temperatura são esperadas para as próximas décadas (Hewitt et al., 2016; Assan et al., 2020). Visto que os limites de tolerância térmica de cada espécie estão entre os principais fatores que determinam sua distribuição (Bennett et al., 2021; Martinez et al., 2022), algumas espécies são capazes de persistir através do deslocamento para áreas climaticamente favoráveis (Araújo & Rahbek, 2006; Taheri et al., 2021). Nesse contexto, a distribuição geográfica da espécie em questão poderia ser expandida para outras regiões, a fim de acompanhar as condições climáticas ótimas para sua fisiologia (Taheri et al., 2021; Martinez et al., 2022). Além disso, caso as condições climáticas locais se tornem mais favoráveis à espécie, sua abundância em seus locais de ocorrência também pode aumentar (Assan et al., 2020). No entanto, caso haja uma retração nas áreas climaticamente favoráveis, há um maior risco de extinção para a espécie frente as mudanças climáticas (Assan et al., 2020; Taheri et al., 2021; Martinez et al., 2022).

A maioria dos animais peçonhentos são ectotérmicos (e.g. águas-vivas, moluscos, aracnídeos, insetos, serpentes) (Zhang, 2015), dependendo diretamente da temperatura do ambiente para sua termorregulação. Mudanças relativamente sutis nas temperaturas com as mudanças climáticas podem modificar suas distribuições geográficas e/ou sua abundância de forma drástica (Gómez et al., 2008; Heuer et al., 2019; Assan et al., 2020), resultando em impactos aos ecossistemas e à saúde humana. Os animais peçonhentos estão fortemente associados ao contexto ecológico em que estão inseridos, sendo seus principais papéis biológicos a predação e a defesa (Zhang, 2015). A evolução da peçonha é, de forma geral, vista como uma adaptação predatória, impulsionando uma corrida armada evolutiva entre predadores (através da diversificação da peçonha) e presas



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA

(através da seleção de indivíduos resistentes) (Richards et al., 2012; Zhang, 2015). De forma similar, o uso da peçonha de forma defensiva pode impulsionar a evolução de composições distintas desta em algumas linhagens, como nos moluscos gastrópodes marinhos e carnívoros do gênero *Conus* (Dutertre et al., 2014). Nesse contexto, um dos principais serviços ecossistêmicos dos animais peçonhentos é o fornecimento de uma grande diversidade de compostos moleculares a partir de suas toxinas, que servem como princípios ativos para o desenvolvimento de novos fármacos (Schendel et al., 2019). Por exemplo, na década de 1970, foi desenvolvido um medicamento antihipertensivo a partir de uma das moléculas presentes na peçonha da jararaca (*Bothrops jararaca*) (Cushman & Ondetti, 1991). Além disso, moléculas derivadas de uma das toxinas de *Conus* estão presentes em um medicamento comercial utilizado para o tratamento dor crônica (Pennington et al., 2018). No entanto, com as mudanças climáticas, algumas dessas espécies poderão ser extintas devido a condições climáticas desfavoráveis, tanto em ecossistemas aquáticos como terrestres, resultando na perda de potenciais recursos de importância farmacológica (Martinez et al., 2022). Outra possível consequência é o deslocamento de espécies peçonhentas para locais onde antes não estavam presentes, o que pode trazer consequências graves à saúde pública devido a envenenamentos (Needleman et al., 2018).

Os ecossistemas aquáticos estão entre os menos representados em estudos ecológicos, de conservação e de biodiversidade, principalmente em relação às pesquisas em ecossistemas terrestres (Richardson & Poloczanska, 2008; Poloczanska et al., 2016). No entanto, todos os ecossistemas aquáticos, desde costeiros a marinhos, estão sendo afetados pelas mudanças climáticas (Hewitt et al., 2016). Além disso, os ambientes costeiros representam áreas de alto uso pelos seres humanos, o que pode representar tanto desafios para a conservação de algumas espécies como riscos à saúde humana pelo maior contato com animais peçonhentos (Hewitt et al., 2016; Needleman et al., 2018). Visto que mais de 95% das espécies aquáticas são ectotérmicas e, muitas vezes, poiquilotérmicas, torna-se



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA

fundamental compreender como as mudanças climáticas podem afetar suas distribuições nos ecossistemas (Assan et al., 2020; Taheri et al., 2021). Nesse contexto, sabe-se que a temperatura está fortemente associada a processos metabólicos e à reprodução de gastrópodes (Bancin et al., 2020; Kho et al., 2020). No caso do gênero *Conus* (Gastropoda: Conidae), espera-se que o aumento da temperatura nos oceanos seja um dos principais fatores ambientais que possa elevar seus riscos de extinção (Peters et al., 2013). No entanto, também é possível que algumas espécies de *Conus* modifiquem sua distribuição a fim de acompanhar suas condições climáticas ótimas, levando a sua ocorrência em regiões onde antes não estavam presentes (Needleman et al., 2018; Taheri et al., 2021). Nesse sentido, por serem animais costeiros, peçonhentos e com algumas espécies de grande importância médica (e.g. *Conus geographus*, responsável pela maior parte das fatalidades por acidentes no gênero) (Kohn, 2016), é imprescindível avaliar possíveis redistribuições com as mudanças climáticas.

Modelos de Nicho Ecológico (do inglês “Ecological Niche Models”, ENMs) representam importantes ferramentas da Biologia e da Ecologia, sendo uma de suas aplicações prever a distribuição potencial de espécies (Vaz et al., 2015; Osorio-Olvera et al., 2019). Além disso, ENMs podem ser projetados para outras regiões geográficas e para o futuro, permitindo avaliar a adequabilidade climática de uma espécie em outras regiões e/ou sob diferentes cenários de mudanças climáticas (Pearson & Dawson, 2003; Melo-Merino et al., 2020). Dessa forma, tivemos como objetivo analisar a adequabilidade climática de três espécies de importância médica de gastrópodes do gênero *Conus* (nativos de águas costeiras do Indo-Pacífico) (Kohn, 2016), através de ENMs projetados na costa brasileira, sob diferentes cenários para as mudanças climáticas no futuro (anos de 2050 e 2090). A partir dos mapas de tais projeções, buscamos avaliar quais áreas da costa brasileira poderiam ser de maior risco de acidentes caso *Conus geographus*, *C. textile* e/ou *C. obscurus* fossem introduzidos (intencional ou acidentalmente) no litoral do país.



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA**

2. Objetivos

- Realizar um levantamento de três espécies do gênero *Conus* potencialmente perigosas para a saúde humana (*C. geographus*, *C. textile* e *C. obscurus*).
- Realizar Modelos de Nicho Ecológico (ENMs) para avaliar a distribuição potencial das espécies em suas respectivas áreas nativas.
- Projetar os ENMs no futuro (para 2050 e 2090), sob os principais cenários das mudanças climáticas (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5), na costa brasileira.
- Caracterizar as áreas de risco de acidentes com *C. geographus*, *C. textile* e/ou *C. obscurus* no Brasil no futuro.

3. Metodologia

3.1. Espécies utilizadas e dados de ocorrência

Selecionamos três das principais espécies de moluscos do gênero *Conus* de importância para a saúde pública: *Conus geographus*, *C. textile* e *C. obscurus* (Kohn, 2016). Então, obtivemos dados de ocorrência georreferenciados de sua área nativa a partir da base de dados Global Biodiversity Information Facility (GBIF, <https://www.gbif.org/>) (Tabela S1). A distribuição nativa das espécies foi delimitada a partir das bases de dados SeaLifeBase (www.sealifebase.org; Palomares & Pauly, 2022) e Lista Vermelha da União Internacional para a Conservação da Natureza e dos Recursos Naturais das espécies ameaçadas (IUCN Red List, <https://www.iucnredlist.org/>).

3.2. Variáveis bioclimáticas oceânicas

Foram coletados dados de variáveis bioclimáticas oceânicas para o presente e para o futuro nas bases de dados Bio-ORACLE v2.2 (<https://www.bio-oracle.org>;



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA

Tyberghein et al., 2011; Assis et al., 2017) e NOAA's Climate Change Web Portal: CMIP6 (NOAA Physical Sciences Laboratory; <https://psl.noaa.gov/ipcc/cmip6/>). As variáveis do presente do Bio-ORACLE foram baixadas na resolução de 5 arcos-minutos (quadrículas com lados de aproximadamente 0,083 graus), na profundidade mínima dos bentos, sendo Temperatura (em °C) e Salinidade (em Escala de Salinidade Prática). As variáveis do NOAA foram baixadas na resolução de 1 grau por 1 grau, sendo Concentração de Carbono Inorgânico Dissolvido (em mol.m⁻³, abreviado para CID), pH e Produtividade Primária (em 1.E-9.mol.m⁻².s⁻¹, abreviado para PP). As mesmas variáveis foram baixadas em suas projeções para o futuro, nos intervalos 2040-2050 e 2090-2100 (Bio-ORACLE), e nos intervalos 2030-2059 e 2070-2099 (NOAA); além disso, foram baixadas nos quatro principais cenários de mudanças climáticas: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5 (O'Neill et al., 2016).

A fim de utilizar a mesma resolução, as variáveis do Bio-ORACLE foram convertidas para a resolução de 1 grau por 1 grau com auxílio dos pacotes “raster” (Hijmans, 2022) e “rgdal” (Bivand et al., 2022) na plataforma R v.4.2.2 (R Core Team, 2022). Então, as variáveis foram cortadas para os mesmos limites geográficos que as espécies de *Conus* utilizadas (35° N, 33° S, 180° E, 180° W), com o auxílio dos pacotes “raster” (Hijmans, 2022) e “rgdal” (Bivand et al., 2022) na plataforma R v.4.2.2 (R Core Team, 2022). Com o objetivo de avaliar a colinearidade entre essas variáveis na escala geográfica de interesse, foi realizado um teste de correlação de Pearson, também na plataforma R v.4.2.2 (R Core Team, 2022), sendo que somente as variáveis de correlação menor que |0.75| seriam utilizadas para a construção dos modelos de nicho ecológico (ENMs). Sendo assim, todas as variáveis previamente mencionadas (Temperatura, Salinidade, CID, pH e PP) foram utilizadas por atenderem a esse critério (Tabela S2).

3.3. Modelos de Nicho Ecológico (“Ecological Niche Models”, ENMs)

Para a construção dos ENMs de cada espécie, utilizamos o algoritmo de máxima entropia MaxEnt (Phillips et al., 2006), com auxílio dos pacotes “ENMTools”



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA

(Warren & Dinnage, 2021) e “ENMeval” (Kass et al., 2021) na plataforma R v.4.2.2 (R Core Team, 2022). Esse algoritmo baseia-se em pontos de ocorrência para a modelagem da distribuição potencial de cada espécie, sendo uma vantagem em relação a outros métodos para construção de ENMs (Elith et al., 2011). Nas análises, foram utilizados 10000 pontos de background, representando coordenadas sorteadas aleatoriamente no espaço geográfico e que não coincidem com os pontos de ocorrência da espécie. Para a construção dos modelos, dois principais parâmetros foram ajustados e combinados: “feature classes” (fc) e multiplicadores de regularização (rm). Para o modelo de cada espécie, foram testadas as combinações entre quatro fc – linear (L), linear quadrático (LQ), linear quadrático hinge (LQH) e hinge (H) – e cinco coeficientes de rm, totalizando em 20 modelos para cada espécie. Os modelos foram testados pelo método de bloco geográfico, em os dados são divididos em quatro grupos espacialmente distintos, porém com números de ocorrência parecidos; dois desses grupos são utilizados para treinar o modelo, e os outros dois para testá-lo (Muscarella et al., 2014). Então, escolhemos a melhor combinação de parâmetros para o modelo com base no menor valor do critério de informação de Akaike corrigido (AICc). A projeção do modelo escolhido no espaço geográfico foi realizada com o auxílio do pacote “dismo” (Hijmans et al., 2022), também na plataforma R v.4.2.2 (R Core Team, 2022). Os modelos para o presente foram projetados na área nativa das espécies, enquanto que os modelos para o futuro foram projetados no Atlântico Ocidental. Por fim, a capacidade do modelo escolhido em prever a distribuição potencial da espécie foi avaliada pelo método da área sob a curva (AUC) (Phillips et al., 2006). Os valores de AUC variam entre 0 e 1, considerando-se bons modelos com valores de $AUC > 0.75$ (Phillips & Dudík, 2008).

4. Resultados e discussões

Nossos modelos de nicho ecológico para as três espécies de *Conus* (*C. geographus*, *C. obscurus* e *C. textile*) apresentaram alta acurácia (AUCtrain e



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA

AUCtest > 0.75). Para as todas as espécies, as principais variáveis explicativas foram Temperatura e Produtividade Primária (Tabela S3). O nicho ecológico de *C. geographus* foi explicado 79.4% pela Temperatura e 9.1% pela Produtividade Primária. Similarmente, o nicho de *C. obscurus* foi explicado 78.4% pela Temperatura e 11.5% pela Produtividade Primária. Por fim, o nicho ecológico de *C. textile* foi explicado 87.1% pela Temperatura e 8.3% pela Produtividade Primária.

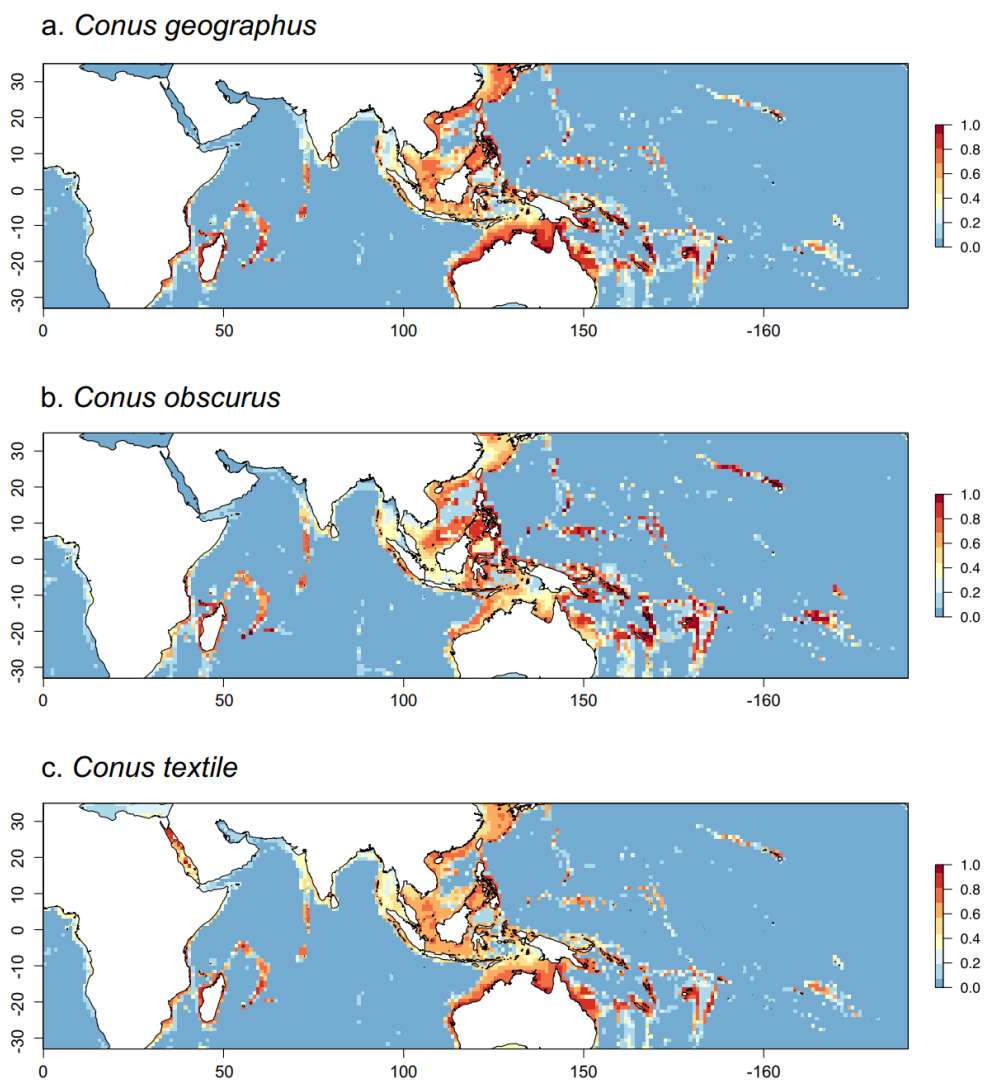


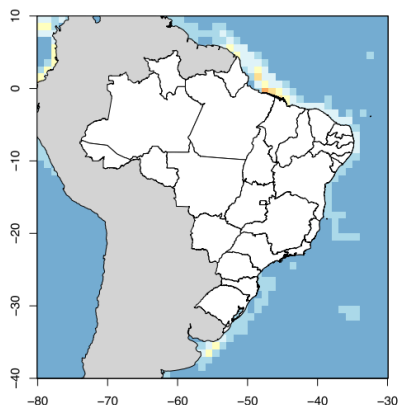
Figura 1. Modelos de nicho ecológico para *Conus geographus* (a), *C. obscurus* (b) e *C. textile* (c), projetados para o presente na região geográfica que compreende sua área nativa.



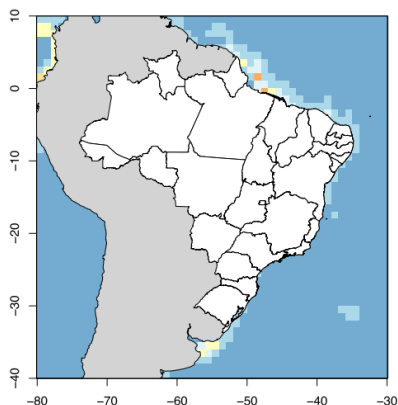
SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA

Para o presente, nossos ENMs demonstram uma adequabilidade climática semelhante para *C. geographus*, *C. obscurus* e *C. textile* em sua área nativa (Fig. 1). Para *C. geographus*, há uma maior adequabilidade climática nas regiões costeiras no norte da Austrália, na Indonésia, na Malásia, no Mar da China Meridional, no Mar da China Oriental, nas Filipinas, nas Maldivas, no Sri Lanka, em Seychelles, nas Ilhas Maurício, em Madagascar, no leste da África, e em algumas ilhas ao longo das regiões da Melanésia, Micronésia e Polinésia (Fig. 1a). Já a espécie *C. obscurus* apresenta maior adequabilidade climática em somente algumas regiões costeiras no norte da Austrália, nas Filipinas, na Malásia, em parte da Indonésia, no Mar da China Meridional, nas Maldivas, em Seychelles, nas Ilhas Maurício, em Madagascar, na costa leste de Quênia, Moçambique e Tanzânia, e em ilhas nas regiões da Melanésia, Micronésia e Polinésia (Fig. 1b). Para *C. textile*, as regiões de maior adequabilidade climática foram semelhantes às de *C. geographus*, somadas a uma alta adequabilidade na região do Mar Vermelho (Fig. 1c).

a. *Conus geographus* (2050)



b. *Conus geographus* (2090)





SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA

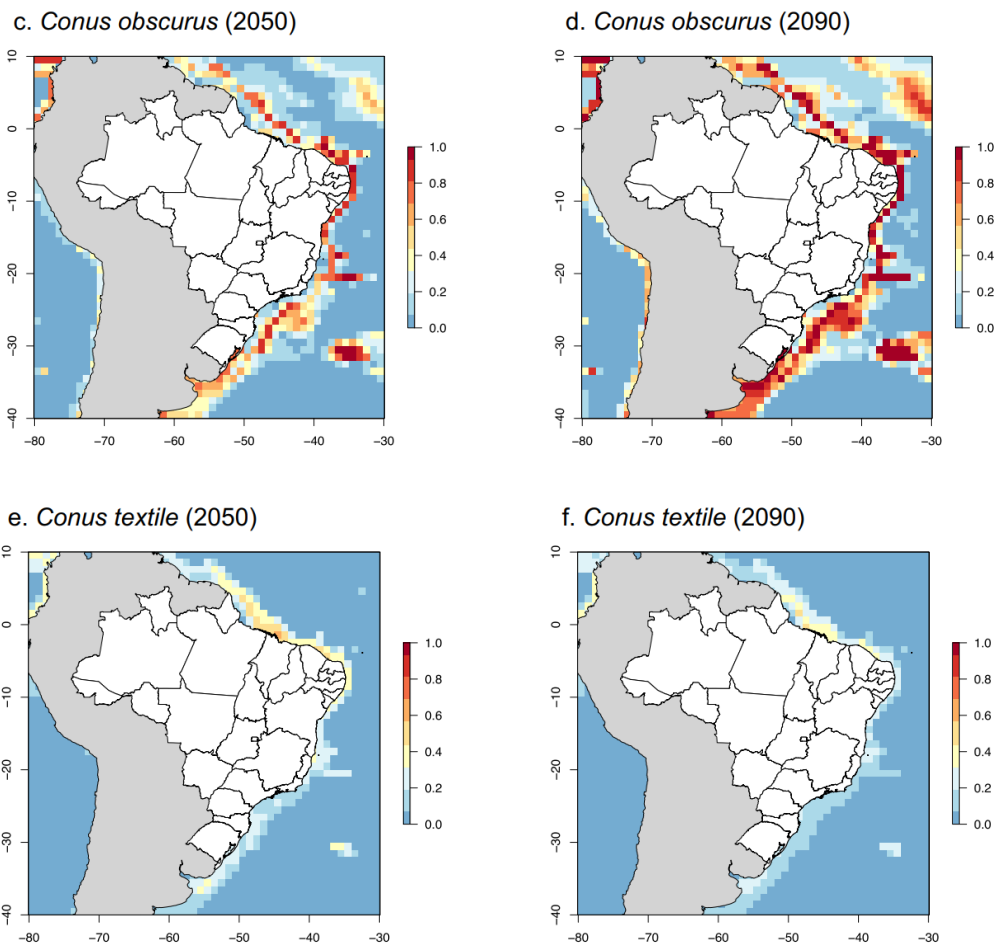


Figura 2. Projeções dos modelos de nicho ecológico de *Conus geographus* (a, b), *C. obscurus* (c, d) e *C. textile* (e, f), na costa do Brasil, no cenário intermediário SSP2-4.5 das mudanças climáticas, para os anos de 2050 e 2090.

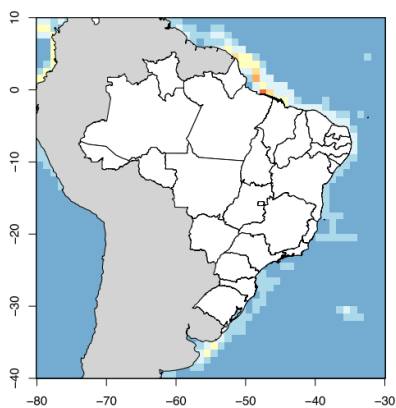
Através da projeção de nossos modelos de nicho ecológico, também pudemos avaliar a adequabilidade climática dessas três espécies de *Conus* no litoral do Brasil no futuro (Figs. 2 e 3). No cenário climático intermediário SSP2-4.5, tanto para 2050 como 2090, haverá baixa adequabilidade climática para *C. geographus* (Figs. 2a,b) e *C. textile* (Figs. 2e,f) no litoral brasileiro, exceto por valores intermediários de adequabilidade no litoral norte. Por outro lado, haverá alta adequabilidade climática para *C. obscurus* ao longo de todo o litoral em 2050 (Fig. 2c) e 2090 (Fig. 2d), no cenário SSP2-4.5. Considerando o cenário mais pessimista para mudanças climáticas (SSP5-8.5), padrões semelhantes foram observados (Fig. 3). Para *C. geographus* em 2050, haverá adequabilidade



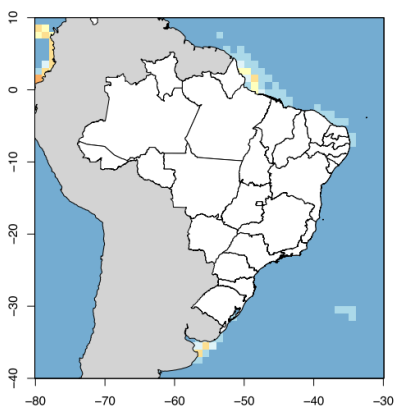
SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA

climática moderada somente em partes do litoral do Amapá e do Pará, com baixos valores no restante do litoral brasileiro (Fig. 3a); já em 2090, haverá uma redução na adequabilidade nesses estados (Fig. 3b). O mesmo padrão será observado para *C. textile* (Figs. 3e,f), porém uma adequabilidade climática moderada no litoral norte-nordeste como um todo no ano de 2050 (Fig. 3e). Em contrapartida, *C. obscurus* terá alta adequabilidade climática em todo o litoral brasileiro nos anos de 2050 (Fig. 3c) e 2090 (Fig. 3d) no cenário SSP5-8.5, com valores maiores do que os esperados no cenário SSP2-4.5 para o ano de 2090.

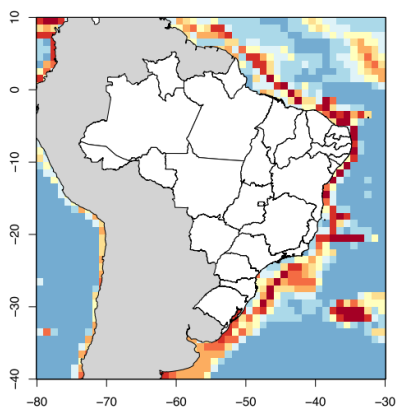
a. *Conus geographus* (2050)



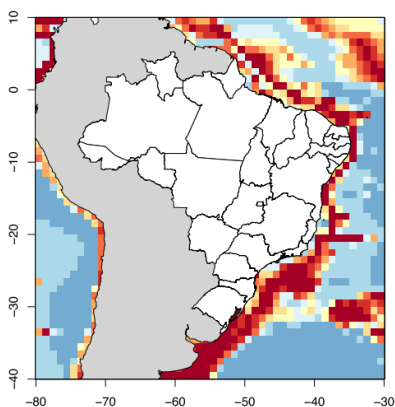
b. *Conus geographus* (2090)



c. *Conus obscurus* (2050)



d. *Conus obscurus* (2090)



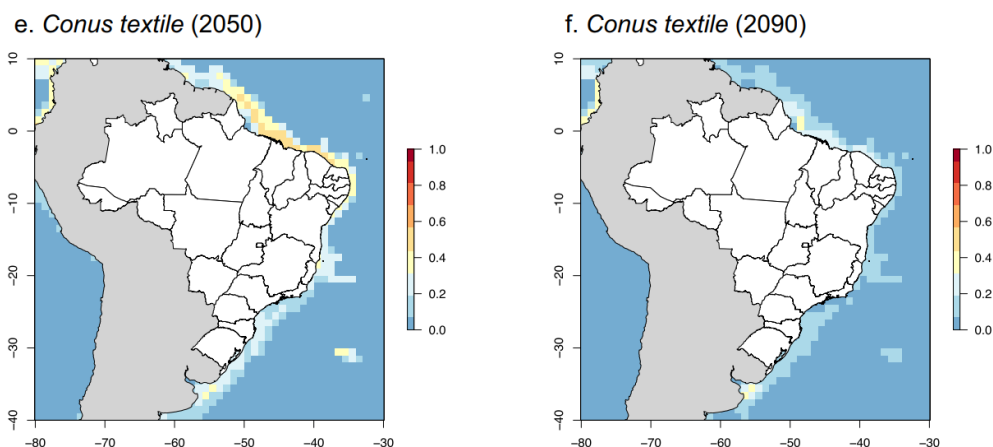


Figura 3. Projeções dos modelos de nicho ecológico de *Conus geographus* (a, b), *C. obscurus* (c, d) e *C. textile* (e, f), na costa do Brasil, no cenário pessimista SSP5-8.5 das mudanças climáticas, para os anos de 2050 e 2090.

Através de modelos de nicho ecológico (ENMs), geramos mapas da distribuição potencial de *Conus geographus*, *C. obscurus* e *C. textile* em sua área nativa, além de projeções na costa brasileira sob diferentes cenários das mudanças climáticas no futuro. Para as três espécies, as áreas climaticamente favoráveis do presente correspondem a suas áreas nativas no Indopacífico (Fig. 1), demonstrando a eficácia dos ENMs para prever a distribuição potencial dessas espécies. Além disso, em nossas projeções na costa brasileira no futuro, apenas *C. obscurus* apresentou alta adequabilidade climática ao longo de toda a costa, enquanto que *C. geographus* e *C. textile* tiveram adequabilidades moderadas somente no litoral norte do país (Figs. 2, 3).

Nossos modelos de nicho demonstraram que as três espécies de *Conus* analisadas ocorrem em áreas associadas a recifes de corais do Indopacífico, desde aqueles presentes no litoral leste da África aos da Oceania, corroborando com sua área nativa descrita (Fig. 1; Kohn, 2013; Duda, 2013a, 2013b). *Conus geographus*, de forma geral, habita recifes e escombros de corais, assim como regiões arenosas adjacentes e lagoas costeiras (Kohn, 2013). Já *C. obscurus*, além de recifes e escombros de corais, também habita outros substratos de recife e planícies



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA

rochosas nas zonas intertidais (Kohn, 1959a; Kohn & Weaver, 1962; Duda, 2013a). *C. textile*, além habitar diferentes partes de recifes de corais, também pode ocorrer em areia sem vegetação, rochas e corais mortos em substrato lodoso (Röckel et al., 1995; Duda, 2013b). Os principais fatores ambientais que determinaram a distribuição potencial das espécies em nossos modelos foram a temperatura e a produtividade primária (Tabela S3). A variável que mais influenciou a distribuição potencial das três espécies de *Conus* em nossos modelos foi a temperatura média nos bentos (78.4% a 87.1%, Tabela S3). A temperatura é um dos principais fatores ambientais que influencia a ocorrência de espécies *Conus* de forma geral, influenciando processos metabólicos e reprodutivos desses moluscos (Peters et al., 2013; Bancin et al., 2020; Kho et al., 2020). Já a segunda variável de maior importância para os modelos das três espécies de *Conus* foi a produtividade primária (8.3% a 11.5%, Tabela S3), o que corrobora com sua ocorrência em recifes de corais tropicais, que são ambientes altamente produtivos (van Hoytema et al., 2016; Adams et al., 2020). Uma maior produtividade primária está associada a mais energia e recursos na base da teia alimentar, favorecendo também a manutenção de uma maior diversidade de consumidores no ecossistema (Bindoff et al., 2019; Tagliabue et al., 2021), como os moluscos mesopredadores do gênero *Conus*.

Invasões biológicas (mediadas pelo ser humano) de moluscos marinhos ao redor do mundo ocorrem, em sua maioria, através da água de lastro e de bioincrustação em embarcações, além da introdução para aquicultura (Carlton, 1999; Darrigran et al., 2020). Por exemplo, o bivalve marinho *Magallana gigas* (Ostreidae), nativo do Pacífico, foi introduzido no Brasil na década de 1970 através da aquicultura, sendo atualmente considerado uma espécie invasora (Melo et al., 2010). Já para o molusco *Isognomon bicolor* (Isognomonidae), por sua vez, foi introduzido por água de lastro de embarcações e por plataformas de petróleo, também sendo uma espécie invasora (Breves-Ramos et al., 2010; Agostini & Ozorio, 2016). No caso do gênero *Conus*, uma possibilidade para sua introdução no Brasil seria através da água de lastro, em que haveria a superação de barreiras



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA**

geográficas e de seus limites de dispersão, como ocorre com outros moluscos (Carlton, 1999). Entretanto, o estabelecimento de *Conus* sp. na costa brasileira, em caso de introdução pelo ser humano, dependeria também da adequabilidade climática para cada espécie ao longo do litoral (Jiménez-Valverde et al., 2011). Nossos modelos de nicho demonstraram que, em diferentes cenários de mudanças climáticas no futuro, haverá áreas climaticamente favoráveis às três espécies em partes ou em todo o litoral brasileiro (Figs. 2, 3), o que facilitaria seu estabelecimento caso fossem introduzidas.

C. geographus é responsável pela maior parte dos acidentes e das fatalidades por envenenamentos por *Conus* em outras regiões do mundo representando um alto risco para a saúde pública (Kohn, 2016). Para essa espécie piscívora, é projetada uma adequabilidade climática moderada em algumas áreas correspondentes ao Recife Amazonas; tanto no cenário SSP2-4.5 como no SSP5-8.5, as projeções para 2050 (Figs. 2a, 3a) apresentaram mais áreas favoráveis que as de 2090 (Figs. 2b, 3b). Entretanto, é possível que o estabelecimento de *C. geographus*, embora com adequabilidade climática moderada em alguns pontos do Recife Amazonas, seja dificultado pela profundidade desse. Ao passo em que *C. geographus* ocorre de 0 m a 20 m de profundidade (Kohn, 2013), a maior parte do Recife Amazonas ocorre encontra-se a mais de 70 m de profundidade (Francini-Filho et al., 2018). Essa restrição ambiental pela profundidade pode dificultar ou até impedir que *C. geographus*, caso seja introduzido, se estabeleça nos pontos de maior adequabilidade climática em nossas projeções, representando uma menor ameaça à saúde pública. Dentre os *Conus* moluscívoros, *C. textile* é o principal responsável por casos de envenenamentos em seres humanos (Kohn, 2016). As projeções em ambos os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 apresentaram áreas com adequabilidade climática baixa a intermediária ao longo do litoral norte somente para 2050, com maiores valores no Recife Amazonas (Figs. 2e, 3e). Essa espécie ocorre em profundidade de até 50 m (Duda, 2013b), o que também representa uma restrição para sua ocorrência nas áreas climaticamente favoráveis em nossos modelos. *C. obscurus* é uma espécie piscívora filogeneticamente próxima a *C.*



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA**

geographus, pertencendo ao mesmo subgênero (*Gastridium*), que também tem casos registrados de envenenamentos (Puillandre et al., 2014; Kohn, 2016). Diferente das outras duas espécies analisadas, as projeções dos modelos de *C. obscurus* apresentaram alta adequabilidade climática ao longo da costa brasileira, em todos os cenários e períodos de tempo avaliados (Figs. 2c,d, 3c,d). Embora não seja responsável por casos graves de envenenamento (Kohn, 2016; Wiere et al., 2022), a presença de *C. obscurus* na costa brasileira pode impactar as redes tróficas e, conseqüentemente, a estrutura das comunidades em ecossistemas marinhos nativos (Molnar et al., 2008).

Nosso estudo demonstra a utilidade de ENMs para prever a distribuição potencial de espécies de interesse médico do gênero *Conus* no futuro, levando em consideração diferentes cenários de mudanças climáticas. Além disso, essa metodologia nos permitiu avaliar o potencial de invasão de espécies de *Conus*, caso fossem introduzidas acidental ou intencionalmente na costa brasileira. Nossos resultados mostraram que *C. geographus*, responsável por casos graves e fatalidades devido a envenenamentos, dificilmente conseguiria se estabelecer na costa brasileira em diferentes cenários de mudanças climáticas no futuro. Similarmente, *C. textile*, responsável pela maioria dos envenenamentos, também apresenta poucas áreas climaticamente favoráveis na costa brasileira. Por fim, somente *C. obscurus* teria uma maior probabilidade de estabelecimento em toda a costa brasileira no futuro; porém, não representaria um perigo grave à saúde pública, sendo responsável por casos menos graves de envenenamento. Dessa forma, a costa brasileira estaria relativamente resguardada das espécies de *Conus* responsáveis por acidentes graves, sendo um ponto positivo para a saúde pública no país.

5. Conclusões

- Em diferentes cenários de mudanças climáticas no futuro, *Conus geographus* e *C. textile* apresentariam regiões climaticamente favoráveis na costa



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA

brasileira relativamente restritas ao litoral norte do país; no entanto, por limitações de profundidade, dificilmente se estabeleceriam nesses locais.

- Haveria alta adequabilidade climática para *C. obscurus* em toda a costa brasileira, considerando diferentes cenários de mudanças climáticas no futuro. No entanto, os impactos de uma possível invasão biológica por essa espécie não seriam tão graves para a saúde pública, mas sim para os ecossistemas costeiros nativos.

6. Perspectivas de futuros trabalhos

Futuros trabalhos poderiam avaliar a distribuição potencial de outras espécies de *Conus* relevantes para a saúde humana no futuro, com as mudanças climáticas. Além disso, poderia ser analisado a distribuição potencial das espécies deste estudo em sua área nativa no futuro, a fim de avaliar possíveis redistribuições com as mudanças climáticas. Ademais, caso variáveis associadas ao tipo de sedimento sejam disponibilizadas em escala global e boa resolução, uma nova modelagem de nicho pode ser realizada para as espécies de *Conus*.

7. Referências bibliográficas

- 1) Adams, M. S. et al. Coral reef productivity and diversity - Contributions from enhanced photosynthesis via demand for carbohydrate from the host. **Marine Ecology**, v. 41, e12618, 2020.
- 2) Agostini, V. O.; Ozorio, C. P. Colonization record of *Isognomon bicolor* (Mollusca: Bivalvia) on pipeline monobuoys in the Brazilian south coast. **Marine Biodiversity Records**, v. 9, n. 48, 2016.
- 3) Araújo, M. B.; Rahbek, C. How does climate change affect biodiversity? **Science**, v. 313, p. 1396-1397, 2006.



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA**

- 4) Assan, D. et al. Effects of Climate Change on Marine Organisms. **American Journal of Climate Change**, v. 9, p. 204-216, 2020.
- 5) Assis, J. et al. Bio-ORACLE v2.0: Extending marine data layers for bioclimatic modelling. **Global Ecology and Biogeography**, v. 27, n. 3, p. 277-284, 2017.
- 6) Bancin, I. R.; Suharsono, S.; Hernawati, D. DIVERSITAS GASTROPODA DI PERAIRAN LITORAL PANTAI SANCANG KABUPATEN GARUT. **Jurnal Biosains**, v. 6, n. 3, p. 72-81, 2020. [Indonésio]
- 7) Bennett, J. M. et al. The evolution of critical thermal limits of life on Earth. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, 2021.
- 8) Bindoff, N. L. et al. Changing ocean, marine ecosystems, dependent communities. In: Pörtner, D. C. R. et al. **IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate**. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. pp. 447-587.
- 9) Bivand, R.; Keitt, T.; Rowlingson, B. **rgdal: Bindings for the ‘Geospatial’ Data Abstraction Library**. R package version 1.6-2, 2022. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=rgdal>>.
- 10) Breves-Ramos, A. et al. Population structure of the invasive bivalve *Isognomon bicolor* on rocky shores of Rio de Janeiro State (Brazil). **Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom**, v. 90, n. 3, p. 453-459, 2010.
- 11) Carlton, J. T. Molluscan Invasions in Marine and Estuarine Communities. **Malacologia**, v. 41, n. 2, p. 439-454, 1999.
- 12) Cushman, D.W.; Ondetti M.A. History of the design of captopril and related inhibitors of angiotensin converting enzyme. **Hypertension**, v. 17, n. 4, p. 589-592, 1991.



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA**

- 13) Darrigran, G. et al. Non-native mollusks throughout South America: emergent patterns in an understudied continent. **Biol Invasions**, v. 22, p. 853-871, 2020.
- 14) Duda, T. *Conus obscurus*. **The IUCN Red List of Threatened Species**, 2013. e.T192424A2092504. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2013-1.RLTS.T192424A2092504.en>>. Acesso em: 24 de fevereiro de 2023.
- 15) Duda, T. *Conus textile*. **The IUCN Red List of Threatened Species**, 2013. e.T192316A2071675. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2013-1.RLTS.T192316A2071675.en>>. Acesso em: 24 de Fevereiro de 2023.
- 16) Dutertre, S. et al. Intraspecific variations in *Conus geographus* defence-evoked venom and estimation of the human lethal dose. **Toxicon**, v. 91, p. 135-144, 2014.
- 17) Elith J. et al. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. **Diversity Distrib**, v. 17, p. 43-57, 2011.
- 18) Francini-Filho, R. B. et al. Perspectives on the Great Amazon Reef: Extension, Biodiversity, and Threats. **Front Mar Sci**, v. 5, n. 142, 2018.
- 19) **Global Biodiversity Information Facility (GBIF)**, 2023. Disponível em: <<https://www.gbif.org/>>. Acesso em: novembro e dezembro de 2022.
- 20) Gómez, J. J.; Goy, A.; Canales, M. L. Seawater temperature and carbon isotope variations in belemnites linked to mass extinction during the Toarcian (Early Jurassic) in Central and Northern Spain. Comparison with other European sections. **Palaeoecology**, v. 258, n. 1-2, p. 28-58, 2008.
- 21) Heuer, R. M. et al. Effects of Temperature on Athletic Performance in the Pelagic Mahi-Mahi (*Coryphaena hippurus*). **The FASEB Journal**, v. 33, p. 723-726, 2019.



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA**

- 22) Hewitt, J. E.; Ellis, J. I.; Thrush, S. F. Multiple Stressors, Nonlinear Effects and the Implications of Climate Change Impacts on Marine Coastal Ecosystems. **Global Change Biology**, v. 22, p. 2665-2675, 2016.
- 23) Hijmans, R. J. et al. **dismo: Species Distribution Modeling**. R package version 1.3-9, 2022. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=dismo>>.
- 24) Hijmans, R. J. **raster: Geographic Data Analysis and Modeling**. R package version 3.6-3, 2022. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=raster>>.
- 25) IUCN. **The IUCN Red List of Threatened Species**, version 2022-2, 2023. Disponível em: <<https://www.iucnredlist.org>>. Acesso em: novembro e dezembro de 2022.
- 26) Jiménez-Valverde, A. et al. Use of niche models in invasive species risk assessments. **Biol Invasions**, v. 13, p. 2785-2797, 2011.
- 27) Kass, J. M. et al. ENMeval 2.0: Redesigned for customizable and reproducible modeling of species' niches and distributions. **Methods Ecol Evol**, v. 12, n. 9, p. 1602-1608, 2021.
- 28) Kho, D. N. et al. Gastropods of mangrove forests in the coastal waters of Ambon island, Indonesia. **Ecol Environ Conserv**, v. 26, n. 1, p. 356-364, 2020.
- 29) Kohn, A. *Conus geographus*. **The IUCN Red List of Threatened Species**, 2013. e.T192772A2158685. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2013-1.RLTS.T192772A2158685.en>>. Acesso em: 24 de fevereiro de 2023.
- 30) Kohn, A. J. Human injuries and fatalities due to venomous marine snails of the family Conidae. **International Journal of Clinical Pharmacology and Therapeutics**, v. 54, n. 7, p. 524-538, 2016.



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA**

- 31) Kohn, A. J. The ecology of *Conus* in Hawaii. **Ecological Monographs**, v. 29, n. 1, p. 47-90, 1959.
- 32) Kohn, A. J.; Weaver, C. S. Additional records and notes on *Conus* in Hawaii. **Pac Sci**, v. 16, n. 4, p. 349-358, 1962.
- 33) Martinez, P. A. et al. Venomous animals in a changing world. **Global Change Biology**, v. 28, p. 3750-3753, 2022.
- 34) Melo, C. M. R. et al. *Crassostrea gigas* in natural oysterbanks in Southern Brazil. **Biol Invasions**, v. 12, p. 441-449, 2010.
- 35) Melo-Merino, S. M.; Reyes-Bonilla, H.; Lira-Noriega, A. Ecological niche models and species distribution models in marine environments: A literature review and spatial analysis of evidence. **Ecological Modelling**, v. 415, 2020.
- 36) Molnar, J. L. et al. Assessing the global threat of invasive species to marine biodiversity. **Front Ecol Environ**, v. 6, n. 9, p. 485-492, 2008.
- 37) Muscarella R., et al. ENMeval: an R package for conducting spatially independent evaluations and estimating optimal model complexity for Maxent ecological niche models. **Methods Ecol Evol**, v. 5, p. 1198-1205, 2014.
- 38) Needleman, R. K. et al. Environmental and Ecological Effects of Climate Change on Venomous Marine and Amphibious Species in the Wilderness. **Wilderness & Environmental Medicine**, v. 29, p. 343-356, 2018.
- 39) NOAA's Climate Change Web Portal: CMIP6. NOAA Physical Sciences Laboratory, Boulder/Colorado, [s.d.]. Disponível em: <<https://psl.noaa.gov/ipcc/cmip6/>>. Acesso em: dezembro de 2022 e janeiro de 2023.
- 40) O'Neill, B. C. et al. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. **Geosci Model Dev**, v. 9, p. 3461-3482, 2016.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA

- 41) Osorio-Olvera, L.; Soberón, J.; Falconi, M. On population abundance and niche structure. **Ecography**, v. 42, p. 1415-1425, 2019.
- 42) Palomares, M. L. D.; Pauly, D. **SeaLifeBase**, version 12, 2022. Disponível em: <www.sealifebase.org>. Acesso em: novembro e dezembro de 2022.
- 43) Pearson, R. G.; Dawson, T. P. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? **Glob Ecol Biogeogr**, v. 12, p. 361-371, 2003.
- 44) Pennington, M. W.; Czerwinski, A.; Norton, R. S. Peptide therapeutics from venom: Current status and potential. **Bioorg Med Chem**, v. 26, p. 2738-2758, 2018.
- 45) Peters, H. et al. *Conus*: First comprehensive conservation red list assessment of a marine gastropod mollusc genus. **Plos One** 8, v. 12, p. 1-12, 2013.
- 46) Phillips S. J.; Dudík, M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. **Ecography**, v. 31, n. 2, p. 161-175, 2008.
- 47) Phillips, S. J.; Anderson, R. P.; Schapire, R. E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. **Ecol Modell**, v. 190, p. 231-259, 2006.
- 48) Poloczanska, E. S. et al. Responses of Marine Organisms to Climate Change across Oceans. **Frontiers in Marine Science**, v. 3, 2016.
- 49) Puillandre, N. et al. Molecular phylogeny and evolution of the cone snails (Gastropoda, Conoidea). **Mol Phylogenet Evol**, v. 78, p. 290-303, 2014.
- 50) R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2022. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA**

- 51) Richards, D. P.; Barlow, A.; Wüster, W. Venom lethality and diet: differential responses of natural prey and model organisms to the venom of the saw-scaled vipers (*Echis*). **Toxicon**, v. 59, n. 1, p. 110-116, 2012.
- 52) Richardson, A. J.; Poloczanska, E. S. Under-Resourced, Under Threat. **Science**, v. 320, n. 5881, p. 1294-1295, 2008.
- 53) Röckel, D.; Korn, W.; Kohn, A. J. **Manual of the Living Conidae**, Vol 1. Verlag Christa Hemmen, 1995.
- 54) Schendel, V. et al. The Diversity of Venom: The Importance of Behavior and Venom System Morphology in Understanding Its Ecology and Evolution. **Toxins**, v. 11, n. 666, 2019.
- 55) Tagliabue, A. et al. Persistent Uncertainties in Ocean Net Primary Production Climate Change Projections at Regional Scales Raise Challenges for Assessing Impacts on Ecosystem **Services Front Clim**, v. 3, e738224, 2021.
- 56) Taheri, S. et al. Improvements in reports of species redistributions under climate change are required. **Sci Adv**, v. 7, 2021.
- 57) Tyberghein, L. et al. Bio-ORACLE: a global environmental dataset for marine species distribution modelling. **Global Ecology and Biogeography**, v. 21, n. 2, p. 272-281, 2011.
- 58) van Hoytema, N. et al. The influence of seasonality on benthic primary production in a Red Sea coral reef. **Marine Biology**, v. 163, p. 1-14, 2016.
- 59) Vaz, U. L.; Cunha, H. F.; Nabout, J. C. Trends and biases in global scientific literature about ecological niche models. **Braz J Biol**, v. 75, n. 4, supl. 1, p. S17-S24, 2015.



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA**

- 60) Warren, D.; Dinnage, R. **ENMTools: Analysis of Niche Evolution using Niche and Distribution Models**. R package version 1.0.7, 2021. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=ENMTools>>.
- 61) Wiere, S. et al. Research into the Bioengineering of a Novel α -Conotoxin from the Milked Venom of *Conus obscurus*. **Int J Mol Sci**, v. 23, n. 12096, 2022.
- 62) Zhang, Y. Why do we study animal toxins? **Zoological Research**, v. 36, n. 4, p. 183-222, 2015.

8. Outras atividades

Participei como ouvinte do evento online “I Simpósio de Biologia Marinha: Bio Maré”, da Liga Acadêmica de Zoologia e Biodiversidade da Universidade Federal de Goiás, dos dias 1 a 3 de março de 2023, com carga horária de 10 horas.

Colaborei em um artigo submetido à revista *The Lancet Planetary Health*, intitulado “PREDICTING RANGE SHIFTS OF VENOMOUS SNAKES: THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON PUBLIC HEALTH AND BIODIVERSITY”, com o prof. Dr. Pablo Ariel Martinez como primeiro autor (nº de referência do manuscrito TLplanetaryhealth-D-22-00659), atualmente em revisão.

A partir deste projeto, publiquei um artigo na revista *Marine Environmental Research*, intitulado “Impacts of climate change on the distribution of medically important *Conus* (Gastropoda: Conidae) species”, como primeira autora e em colaboração com o prof. Dr. Pablo Ariel Martinez (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.106237>).

Participei do XXVIII Encontro Brasileiro de Malacologia & XII Congresso Latinoamericano de Malacología, dos dias 2 a 6 de outubro de 2023 (carga horária: 40 horas), no qual apresentei o trabalho “Impacts of climate change on the distribution of medically important *Conus* (Gastropoda: Conidae) species”.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA

9. Material suplementar

Tabela S1. Dados de ocorrência de *Conus geographus*, *C. obscurus* e *C. textile*, acompanhados da citação automática gerada pelo GBIF.

Espécie	Citação automática
<i>Conus geographus</i>	GBIF.org (21 November 2022) GBIF Occurrence Download https://doi.org/10.15468/dl.4ud25y
<i>Conus obscurus</i>	GBIF.org (13 December 2022) GBIF Occurrence Download https://doi.org/10.15468/dl.teczg4
<i>Conus textile</i>	GBIF.org (13 December 2022) GBIF Occurrence Download https://doi.org/10.15468/dl.p54qaw

Tabela S2. Teste de correlação de Pearson entre as variáveis bioclimáticas oceânicas: Concentração de Carbono Inorgânico Dissolvido (CID), Produtividade Primária (PP), pH, Salinidade e Temperatura.

	CID	PP	pH	Salinidade	Temperatura
CID	1	-0.2788	0.2150	0.5488	-0.2097
PP	-0.2788	1	-0.4493	-0.2502	0.2925
pH	0.2150	-0.4493	1	0.0884	0.0632
Salinidade	0.5488	-0.2502	0.0884	1	-0.0136
Temperatura	-0.2097	0.2925	0.0632	-0.0136	1

Tabela S3. Modelos de nicho ecológico (ENMs) de *Conus geographus*, *C. obscurus* e *C. textile*.

Espécie	n	feature	rm	AUCtrain	AUCtest	Variável 1	Variável 2
<i>Conus geographus</i>	392	LQH	3	0.938	0.919	Temperatura (79.4%)	Prod. Primária (9.1%)
<i>Conus obscurus</i>	188	LQH	2	0.938	0.92	Temperatura (78.4%)	Prod. Primária (11.5%)
<i>Conus textile</i>	1272	LQH	3	0.905	0.891	Temperatura (87.1%)	Prod. Primária (8.3%)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA

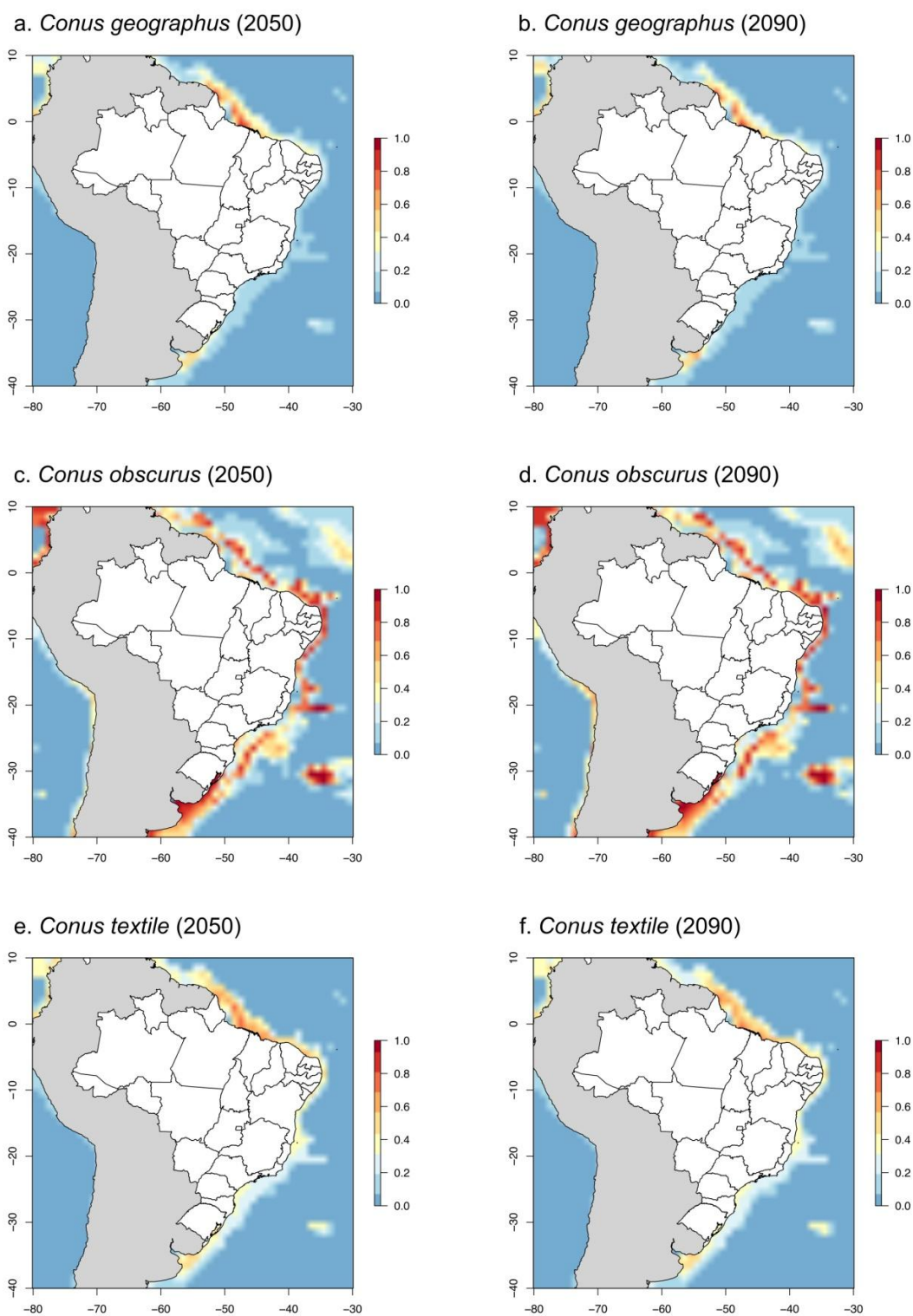


Figura S1. Projeções dos modelos de nicho ecológico de *Conus geographus* (a, b), *C. obscurus* (c, d) e *C. textile* (e, f), na costa do Brasil, no cenário SSP1-2.6 das mudanças climáticas, para os anos de 2050 e 2090.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA

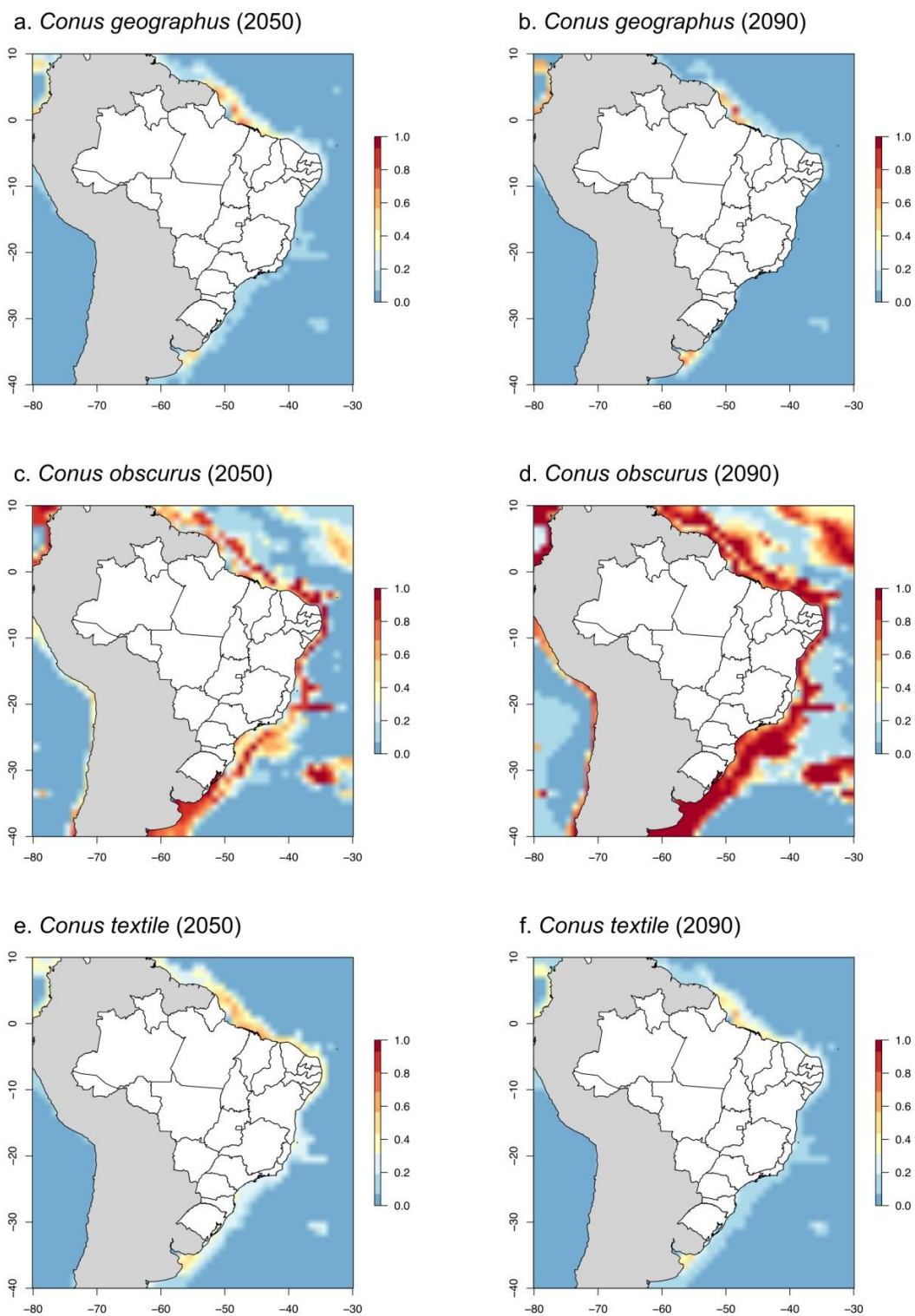


Figura S2. Projeções dos modelos de nicho ecológico de *Conus geographus* (a, b), *C. obscurus* (c, d) e *C. textile* (e, f), na costa do Brasil, no cenário SSP3-7.0 das mudanças climáticas, para os anos de 2050 e 2090.