



Campus
Urutaí

**INSTITUTO FEDERAL GOIANO DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA, CAMPUS URUTAÍ – GO
LICENCIATURA EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS**

**EFEITO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE ESPÉCIES DE PLANTAS
PERIGOSAS ÀS ABELHAS: O CASO DA TULIPEIRA AFRICANA E NIM**

KEYLA JAMILLE DA SILVA OLIVEIRA

**URUTAÍ
2026**

KEYLA JAMILLE DA SILVA OLIVEIRA

**EFEITO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE ESPÉCIES DE PLANTAS
PERIGOSAS ÀS ABELHAS: O CASO DA TULIPEIRA AFRICANA E NIM**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao curso em Licenciatura em
Ciências Biológicas do Instituto Federal
Goiano – Campus Urutaí como parte dos
requisitos para conclusão do curso de
graduação, sob orientação da professora
Luciana Aparecida Siqueira Silva

**URUTAÍ
2026**

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

O48e Oliveira, Keyla Jamille da Silva
 Efeito das mudanças climáticas sobre espécies de plantas
 perigosas às abelhas: o caso da tulipeira africana e do nim /
 Keyla Jamille da Silva Oliveira. Urutaí 2026.

19f. il.

Orientadora: Prof^a. Dra. Luciana Aparecida Siqueira Silva.
Tcc (Licenciado) - Instituto Federal Goiano, curso de 0122053 -
Licenciatura em Ciências Biológicas - Urutaí (Campus Urutaí).

1. Espécies invasoras. 2. Modelagem de distribuição. 3. Abelhas.
4. Clima. I. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO

PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICAS

NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- ☐ Tese (doutorado)
☐ Dissertação (mestrado)
☐ Monografia (especialização)
☒ TCC (graduação)

- ☐ Artigo científico
☐ Capítulo de livro
☐ Livro
☐ Trabalho apresentado em evento

☐ Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Keyla Jamille da Silva Oliveira

Matrícula:

2022101220530122

Título do trabalho:

EFEITO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE ESPÉCIES DE PLANTAS PERIGOSAS ÀS ABELHAS: O CASO DA TULIPEIRA AFRICANA E NIM

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 13 / 03 / 2026

O documento está sujeito a registro de patente? ☒ Sim ☐ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☐ Sim ☒ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Urutaí/ GO

Local

13

03

2026

Data

gov.br
Documento assinado digitalmente
KEYLA JAMILLE DA SILVA OLIVEIRA
Data: 11/03/2026 16:54:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

gov.br
Documento assinado digitalmente
LUCIANA APARECIDA SIQUEIRA SILVA
Data: 11/03/2026 22:04:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 5/2026 - CCLCB-URT/GE-UR/DE-UR/CMPURT/IFGOIANO

ANEXO III							
ATA DE APRESENTAÇÃO DE TRABALHO DE CURSO							
Às 13 horas e 30 minutos do dia 06 de março de 2026, a Banca Examinadora do Trabalho de Curso intitulado “EFEITO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE ESPÉCIES DE PLANTAS PERIGOSAS ÀS ABELHAS: O CASO DA TULIPEIRA AFRICANA E NIM” composta pelos professores: 1 Orientadora Professora Doutora Luciana Aparecida Siqueira Silva 2* Professora Doutora Rejane Araújo Guimarães (x) Presencial () Remoto 3* Professor Doutor Leandro Carvalho Ribeiro (x) Presencial () Remoto se reuniu para a sessão de defesa pública do citado trabalho, requisito parcial para a obtenção do Grau de Licenciado em Ciências Biológicas. A Presidente da Banca Examinadora, Prof.^a Luciana Aparecida Siqueira Silva, passou a palavra à licencianda Keyla Jamille da Silva Oliveira para apresentação de seu trabalho. Após a arguição pelos membros da Banca Examinadora e respectiva defesa do(a) discente, a Banca Examinadora se reuniu, sem a presença do(a) discente e do público, para expedição do resultado final. A Banca Examinadora considerou que o(a) discente foi (x) APROVADO / () REPROVADO, tendo sido atribuído a nota (__9,8__) ao seu trabalho. O resultado foi comunicado publicamente ao(a) discente pelo Presidente da Banca Examinadora. Nada mais havendo a tratar, o Presidente da Banca Examinadora deu por encerrada a defesa.							
<table border="1"><thead><tr><th>Assinatura dos membros da Banca Examinadora</th><th>Notas</th></tr></thead><tbody><tr><td>1. Luciana Aparecida Siqueira Silva</td><td>10,0</td></tr><tr><td></td><td></td></tr></tbody></table>		Assinatura dos membros da Banca Examinadora	Notas	1. Luciana Aparecida Siqueira Silva	10,0		
Assinatura dos membros da Banca Examinadora	Notas						
1. Luciana Aparecida Siqueira Silva	10,0						

2. Leandro Carvalho Ribeiro	9,4
3. Rejane Araújo Guimarães	10,0
Média final:	

Urutaí-GO, 06 de março de 2026.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Luciana Aparecida Siqueira Silva**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 06/03/2026 14:39:40.
- **Leandro Carvalho Ribeiro**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 06/03/2026 14:42:06.
- **Rejane Araujo Guimaraes**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 06/03/2026 14:46:56.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 06/03/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 797059

Código de Autenticação: 0903297bc3



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Urutaí
Rodovia Geraldo Silva Nascimento, Km 2.5, SN, Zona Rural, URUTAÍ / GO, CEP 75790-000
(64) 3465-1900

À memória da minha avó, que acompanhou com carinho e orgulho o início desta trajetória, mas não pôde presenciar sua conclusão. Sua sabedoria, força e exemplo de vida continuam sendo fonte de inspiração e motivação para mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela força e sabedoria concedidas em todos os momentos desta caminhada, permitindo que eu superasse os desafios e chegasse até aqui. Aos meus pais Antônio Magno e Antônia Pereira, pelo amor incondicional, apoio constante e por nunca deixarem de acreditar em mim. Todo o esforço, dedicação e paciência de vocês foram fundamentais para que eu alcançasse esta conquista. Ao meu amado, Danilo, pelo carinho, compreensão e incentivo durante cada etapa deste percurso. Sua presença foi essencial para me manter firme e confiante. Aos meus amigos, que tornaram essa jornada mais leve e repleta de boas lembranças. Em especial, à Sândila e ao João Pedro, pela amizade sincera, companheirismo e apoio em todos os momentos. Agradeço aos professores Leandro Carvalho, Tânia Maria, Estevão Alves e Luciana Siqueira pelo conhecimento compartilhado, pela dedicação e pelo apoio ao longo do curso. Ao professor Daniel de Paiva Silva, agradeço pela paciência, disponibilidade e comprometimento durante todo o processo. Sua atenção e incentivo foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho e para o meu crescimento como estudante e futura profissional. Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa trajetória, deixo aqui o meu mais sincero muito obrigada.

RESUMO

As mudanças climáticas e a intensificação das atividades humanas têm favorecido a introdução e a expansão de espécies exóticas invasoras, configurando uma das principais ameaças à biodiversidade global. Entre os impactos associados a essas espécies destacam-se a alteração de ecossistemas, a substituição da flora nativa e prejuízos a serviços ecossistêmicos essenciais, como a polinização. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo analisar a distribuição potencial atual e futura da tulipeira africana (*Spathodea campanulata* P. Beauv.; Bignoniaceae) e do nim (*Azadirachta indica* A. Juss.; Meliaceae) na América do Sul, espécies reconhecidas por seu potencial invasor e por efeitos negativos sobre polinizadores, especialmente as abelhas. Para isso, foram utilizados modelos de distribuição de espécies (SDMs), empregando diferentes algoritmos de modelagem e variáveis climáticas e edáficas, com projeções realizadas sob distintos cenários de mudanças climáticas. A avaliação dos modelos foi realizada por meio do índice de similaridade de Jaccard. De modo geral, os resultados indicaram que ambas as espécies apresentam ampla adequabilidade ambiental no continente sul-americano, embora com padrões espaciais distintos, refletindo nichos ecológicos complementares. *S. campanulata* mostrou maior associação a regiões tropicais úmidas, enquanto *A. indica* apresentou maior adequação a ambientes secos e semiáridos. A expansão dessas espécies representa risco adicional às abelhas, uma vez que há registros de toxicidade do néctar e do pólen, bem como de redução da diversidade floral disponível, comprometendo o desenvolvimento das colônias e os serviços de polinização. Assim, os resultados reforçam a importância da modelagem preditiva como ferramenta para identificar áreas suscetíveis à invasão e subsidiar estratégias de monitoramento, manejo e conservação da biodiversidade, especialmente frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

Palavras-chave: Espécies invasoras, Modelagem de distribuição, Abelhas, Clima.

ABSTRACT

Climate change and the intensification of human activities have facilitated the introduction and spread of invasive alien species, posing a major threat to global biodiversity. Among the impacts associated with these species are ecosystem alteration, replacement of native flora, and negative effects on essential ecosystem services, such as pollination. In this context, this study aimed to analyze the current and future potential distribution of *Spathodea campanulata* P. Beauv. (Bignoniaceae) and *Azadirachta indica* A. Juss. (Meliaceae) in South America, species recognized for their invasive potential and for their negative effects on pollinators, especially bees. Species distribution models (SDMs) were applied using multiple algorithms and climatic and edaphic variables, with projections under distinct climate change scenarios. Model performance was evaluated using the Jaccard similarity index. Overall, the results indicated that both species exhibit broad environmental suitability across South America, though with distinct spatial patterns reflecting complementary ecological niches. *Spathodea campanulata* showed a stronger association with humid tropical regions, whereas *A. indica* exhibited greater suitability for dry and semi-arid environments. The expansion of these species poses additional risks to bees, including reports of nectar and pollen toxicity and reductions in floral diversity, which may compromise colony development and pollination services. Thus, the results highlight the importance of predictive modeling as a tool for identifying areas susceptible to invasion and supporting monitoring, management, and biodiversity conservation strategies, especially in the face of climate change challenges.

Keywords: Invasive species, Species distribution modeling, Bees, Climate.

1. INTRODUÇÃO

A perda de biodiversidade é um dos maiores desafios ambientais do século XXI e decorre, principalmente, da intensificação das atividades humanas como o desmatamento, fragmentação de habitats e poluição que modificam ecossistemas naturais (Testa et al. 2020). Entre as principais causas da perda de biodiversidade destacam-se a perda de hábitat e fragmentação (Pereira, 2017; Arraes et al. 2012), com consequentes expansão agrícola e urbanização (Martini et al. 2025), deposição de compostos nitrogenados e outros poluentes em corpos aquáticos e atmosfera (Galloway et al. 2008), as mudanças climáticas (IPCC, 2021) e a introdução de espécies exóticas (Vaissière et al., 2022). Nesse contexto, a globalização desempenha papel crucial ao intensificar o comércio e a movimentação de pessoas e produtos entre diferentes regiões do planeta, ampliando as rotas de transporte e favorecendo o deslocamento accidental ou intencional de organismos para áreas fora de sua distribuição natural (Bellard et al. 2022). Assim, espécies antes restritas a determinados habitats passam a colonizar novos ambientes, muitas vezes sem predadores naturais ou barreiras ecológicas, o que facilita seu estabelecimento e expansão.

As invasões biológicas também estão entre as principais causas de perda de biodiversidade global, gerando efeitos ecológicos, culturais e econômicos significativos (Vaissière et al., 2022). Do ponto de vista ambiental, espécies invasoras podem competir com espécies nativas por recursos, alterar cadeias tróficas e modificar o funcionamento de ecossistemas inteiros. Culturalmente, tais espécies transformam paisagens tradicionais e ameaçam práticas locais de manejo e o valor simbólico da fauna e flora nativas (Carvalho, 2019). Elas substituem plantas e animais nativos utilizados para alimentação, medicina, artesanato ou rituais, alterando o aspecto visual e ecológico do território (Jaric et al., 2025). Como consequência, técnicas tradicionais de manejo do solo, rotação de culturas e criação de animais podem ser prejudicadas e a perda de espécies com significado cultural reduzem a presença de elementos do patrimônio cultural das comunidades locais (Carvalho, 2019; Costanza et al., 2017). Economicamente, as espécies exóticas invasoras acarretam em prejuízos para a agricultura, pecuária e silvicultura, além de elevarem os custos de controle e erradicação (Pimentel et al., 2001). Quando espécies exóticas invasoras encontram condições favoráveis, como ausência de predadores, clima adequado e disponibilidade de recursos, elas podem se expandir rapidamente, gerando impactos ambientais, econômicos e sociais (Pysek et al. 2020).

Para melhor descrever o processo de invasão biológica, Blackburn et al. (2011) propuseram um quadro unificado deste processo, dividindo-o em quatro fases: transporte, introdução, estabelecimento e dispersão. Na fase de transporte, os organismos são deslocados

de sua área de origem por ação natural ou humana. Na introdução, os organismos entram em contato com o novo ambiente. Na fase de estabelecimento, indivíduos conseguem se reproduzir e manter populações viáveis. Por fim, na fase da dispersão, indivíduos invasores expandem-se para novas áreas.

Os desequilíbrios ecológicos causados por espécies exóticas invasoras manifestam-se em múltiplos níveis, afetando desde interações bióticas até processos ecossistêmicos amplos (Carneiro et al., 2025). A competição direta com espécies nativas é um dos impactos mais evidentes, como observado na substituição de gramíneas nativas do Cerrado por *Melinis minutiflora* P. Beauv. (Poaceae), o que altera o regime de fogo e dificulta a regeneração da vegetação original (Pivello et al., 1999). Além disso, espécies invasoras podem modificar cadeias tróficas, como ocorre com o sapo-cururu (*Rhinella marina* L.; Bufonidae) na Austrália, cujo veneno é letal para predadores locais, causando declínios populacionais severos (Shine, 2010). Alterações em ciclos de nutrientes também são relatadas, como a fixação excessiva de nitrogênio por *Acacia mearnsii* De Wildeman (Fabaceae) em ecossistemas pobres desse elemento, levando à eutrofização e à perda de biodiversidade (Yelenik et al., 2004). Tais transformações podem comprometer a estrutura e o funcionamento dos ecossistemas, resultando, em casos extremos, na extinção de espécies nativas e na homogeneização biótica global. Nesse sentido, Lockwood et al. (2009) destacam que o aumento no número de espécies e indivíduos introduzidos potencializa as chances de estabelecimento e expansão, sintetizado na máxima de que “quanto mais se introduz, mais se obtém”, o que enfatiza a importância de políticas preventivas no controle das introduções biológicas.

Detectar áreas suscetíveis à invasão por espécies exóticas invasoras é, portanto, uma etapa essencial para o manejo preventivo e a conservação da biodiversidade (Catford et al., 2011). No entanto, a efetividade dessas ações é limitada pelo chamado déficit Wallaceano, que corresponde à falta de informações sobre a distribuição geográfica de muitas espécies (Hortal et al., 2015; Whittaker et al., 2005). Apesar de serem espécies com distribuições geralmente amplas e irrestritas às barreiras biogeográficas naturais, as espécies exóticas invasoras também são afetadas pela falta de informações biogeográficas atualizadas. Essa lacuna de conhecimento compromete a capacidade de prever novas invasões e planejar medidas de contenção adequadas, tornando necessário o uso de ferramentas analíticas que auxiliem na previsão de áreas potenciais de ocorrência (Silva, 2022 e Vaissière et al., 2022).

Diante da importância de entender como a distribuição dessas espécies pode ser influenciada pelas mudanças climáticas, este estudo visa analisar o potencial de expansão

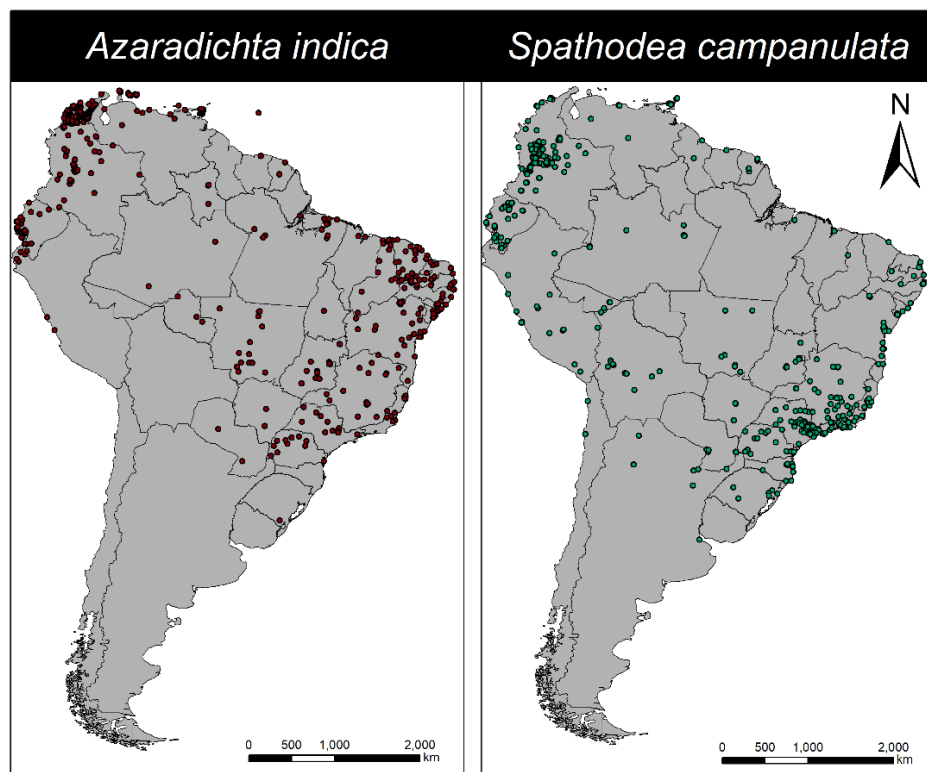
dessas espécies invasoras no território sul-americano, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias eficazes de monitoramento e de manejo ambiental. Nesse sentido, compreender a distribuição atual dessas espécies na América do Sul é fundamental tanto para avaliar seu potencial de uso sustentável quanto para acompanhar seus impactos negativos sobre os ecossistemas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Dados das espécies

Coletamos os dados de ocorrência de *Spathodea campanulata* e *Azadirachta indica*, a partir dos bancos de dados *Global Biological Information Facility* (GBIF; <https://www.gbif.org/>) e SpeciesLink. <https://splink.cria.org.br/>. Para selecionar registros válidos, excluimos dados duplicados, inconsistentes ou que apresentassem coordenadas geográficas fora do alcance conhecido das espécies ou nos oceanos. Assim, foi criada e organizada uma planilha em que estavam incluídas informações das coordenadas geográficas (latitude e longitude), nome das espécies, país, estado e cidade. Ao final do processo de limpeza e padronização, restaram 1.215 registros válidos para *S. campanulata*: <https://doi.org/10.15468/dl.wd2kef> e 1.228 para *A. indica* <https://doi.org/10.15468/dl.j4wwht>, que foram utilizados nas etapas subsequentes de modelagem (Figura 1).

Figura 1. O mapa da esquerda corresponde à distribuição atual dos registros de ocorrência de *Azadirachta indica* na América do Sul. Já o mapa da direita corresponde à distribuição atual dos registros de *Spathodea campanulata*. Esses mapas mostram onde cada espécie foi registrada e evidenciam as diferenças espaciais entre suas áreas de ocorrência.



Fonte: Elaborado pela autora

2.2 Variáveis Ambientais

As variáveis ambientais utilizadas na modelagem foram obtidas do banco de dados WorldClim, versão 2.1 (<https://www.worldclim.org/>), com resolução espacial de 2,5 arc-minutos (aproximadamente 5 km² por pixel). Além das variáveis bioclimáticas, foram consideradas também variáveis edáficas provenientes do banco de dados *Soil Grids* (<https://www.isric.org/explore/soilgrids>), totalizando, inicialmente, um conjunto de 49 camadas ambientais. Esse pré-processamento foi essencial para assegurar que as projeções futuras fossem comparáveis ao cenário atual, preservando a integridade analítica dos modelos. A combinação de variáveis climáticas e edáficas foi adotada por seu potencial para aprimorar o desempenho dos modelos de distribuição de espécies vegetais e tornar as projeções futuras mais robustas, conforme discutido por Beauregard e Blois et al. (2014).

As camadas ambientais foram inicialmente padronizadas por meio da transformação em que se subtrai a média e se divide pelos desvios-padrão de cada variável, garantindo que todas apresentassem média zero e desvio padrão igual a 1. Essa padronização assegura que nenhuma variável influencie desproporcionalmente os modelos devido à sua escala original. Em seguida, foi aplicada uma análise de componentes principais (PCA). Esta análise permitiu reduzir a dimensionalidade dos dados, selecionando apenas os componentes principais ortogonais (não correlacionados) que explicam a maior parte da variação (De Marco Júnior;

Siqueira, 2009). Foram retidos nove componentes principais, que representavam 95% da variação dos dados originais. Esses mesmos componentes foram projetados para cenários climáticos futuros, mantendo a consistência e a comparabilidade entre o cenário presente e os futuros. A utilização da PCA reduz a colinearidade entre variáveis, diminui o número de camadas ambientais e evita que variáveis altamente correlacionadas prejudiquem o ajuste dos modelos (De Marco; Nóbrega, 2018).

Diferentes decisões socioeconômicas como a matriz energética utilizada pelas sociedades no presente e no futuro podem influenciar significativamente os níveis de emissão ao longo do século. Os modelos que incorporam essas variáveis são denominados caminhos socioeconômicos compartilhados (*shared socioeconomic pathways* – SSP). Cada cenário oferece uma perspectiva distinta sobre como nossas escolhas podem impactar tanto o clima quanto o desenvolvimento global. Neste estudo, utilizamos três cenários de emissão baseados nos SSPs: otimista (SSP1-2.6), intermediário (SSP2-4.5) e crítico (SSP5-8.5), aplicados a oito modelos de circulação acoplados atmosfera-oceano: BCC-CSM2-MR, CNRM-CM6-1, CNRM-ESM2-1, CanESM5, GFDL-ESM4, IPSL-CM6A-LR, MIROC-ES2L, MIROC6 e MRI-ESM2-0. Cada um destes cenários representa uma projeção distinta sobre como as decisões humanas podem influenciar as mudanças climáticas e o desenvolvimento global. As camadas ambientais foram recortadas com base na extensão da área de estudo e reprojatadas em um sistema de coordenadas uniforme, garantindo a compatibilidade espacial entre todas as variáveis. Os componentes principais obtidos para o presente foram projetados diretamente nos cenários futuros, garantindo que as comparações sejam realizadas no mesmo espaço ambiental transformado. Esse procedimento segue recomendações metodológicas amplamente utilizadas em SDMs (De Marco; Nóbrega, 2018).

2.3 Modelagem de distribuição das espécies

Para reduzir a autocorrelação espacial entre os registros de ocorrência e obter validação mais robusta dos modelos, aplicamos o particionamento espacial do tipo *checkerboard*, que divide os pontos em células alternadas de treino e teste. Essa abordagem assegura independência espacial entre os conjuntos e evita inflar artificialmente o desempenho dos algoritmos (Bahn & McGill, 2013; Roberts et al., 2017).

Foram utilizados 50% dos registros para treino e 50% para teste. Após a primeira rodada, os conjuntos foram invertidos, de forma que o que serviu como teste passou a ser treino e vice-versa, permitindo duas avaliações independentes. Esse procedimento é recomendado em SDMs por representar a melhor prática para lidar com dependência espacial entre pontos

(Leroy et al. 2018). Foi aplicada uma máscara ambiental que representa as áreas acessíveis às espécies, conforme definido com base no conhecimento da ecologia e da distribuição atuais dos táxons. A máscara ambiental utilizada corresponde à área acessível (M) para cada espécie, ou seja, o conjunto de regiões que elas poderiam alcançar historicamente considerando limitações biogeográficas e barreiras naturais (Soberón e Peterson, 2005 e Soberón, 2007). A definição correta da área M é fundamental para evitar projeções ecologicamente irreais e reduzir vieses no processo de modelagem (Barve et al., 2011). Essa máscara restringiu a modelagem às áreas ambientalmente e historicamente possíveis de colonização pelas espécies, o que contribuiu para maior realismo nas previsões. Para tal, utilizamos um *shapefile* das ecorregiões do mundo, proveniente do sítio *online* do *World Wildlife Fund* (WWF; <https://www.worldwildlife.org/biomes>). *Forest* (Breiman, 2001), *Support Vector Machines* (Cortes; Vapnik, 1995), e *Maximum Entropy* com funções quadráticas e lineares (Anderson et al., 2011). Esse threshold, recomendado por Allouche et al. (2006), permite uma classificação mais equilibrada e reduz erros de omissão e comissão, resultando em mapas binários mais realistas.

A performance dos modelos foi avaliada por meio do índice de similaridade de Jaccard, que quantifica a concordância entre as áreas previstas como presença pelos modelos e as ocorrências observadas, variando de 0 (nenhuma similaridade) a 1 (similaridade perfeita). Valores próximos ou inferiores a 0,5 indicam desempenho equivalente ao acaso. Essa métrica foi adotada por ser baseada exclusivamente em dados de presença e por apresentar menor sensibilidade à prevalência, sendo considerada mais adequada em contextos com ausência de dados confiáveis de ausência (Leroy et al., 2018).

Os modelos finais foram gerados por meio de um consenso (*ensemble*) baseado em média ponderada, no qual o peso de cada algoritmo foi definido pelo valor do índice de Jaccard obtido para a espécie. Dessa forma, os mapas de adequabilidade produzidos por cada método foram combinados multiplicando-se cada predição pelo respectivo valor de Jaccard e dividindo pela soma total desses valores. Assim, algoritmos com maior desempenho tiveram maior influência na distribuição final, enquanto modelos menos acurados contribuíram menos. Esse procedimento segue a abordagem de *ensemble* descrita por Araújo e New (2007), que propõem a combinação ponderada de diferentes algoritmos para gerar projeções mais robustas. Assim, modelos com melhor desempenho tiveram maior influência na projeção final.

Todas as etapas de modelagem foram executadas no ambiente R (versão 4.2.3) R Development Core Team (2024), utilizando o pacote ENMTML (Andrade; Velazco; De Marco

Júnior, 2020) que automatiza todo o fluxo da modelagem, incluindo limpeza dos dados, particionamento espacial, ajuste dos algoritmos, avaliação por métricas baseadas em presença/ausência, aplicação de thresholds, construção de ensembles e projeções para cenários climáticos futuros. A utilização desse fluxo padronizado garante maior reprodutibilidade e consistência nas análises realizadas (De Andrade et al., 2020).

3. RESULTADOS

Considerando os três algoritmos utilizados, a espécie *Spathodea. campanulata* apresentou média geral dos valores do índice de Jaccard igual a $0,815 \pm 0,010$ (média $\pm$ desvio padrão). Para *Azadirachta. indica*, os valores médios foram $0,7617 \pm 0,0032$. Os valores individuais de Jaccard obtidos para cada método estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1- Valores do índice de Jaccard para *Azadirachta indica* e *Spathodea campanulata* obtidos por diferentes métodos de modelagem.

Espécie	Método de modelagem	Valor de Jaccard
<i>Azadirachta indica</i>	Maxent (MXS)	0,763
	Support Vector Machines (SVM)	0,760
	Random Forest	0,764
<i>Spathodea campanulata</i>	Maxent (MXS)	0,803
	Support Vector Machines (SVM)	0,812
	Random Forest	0,818

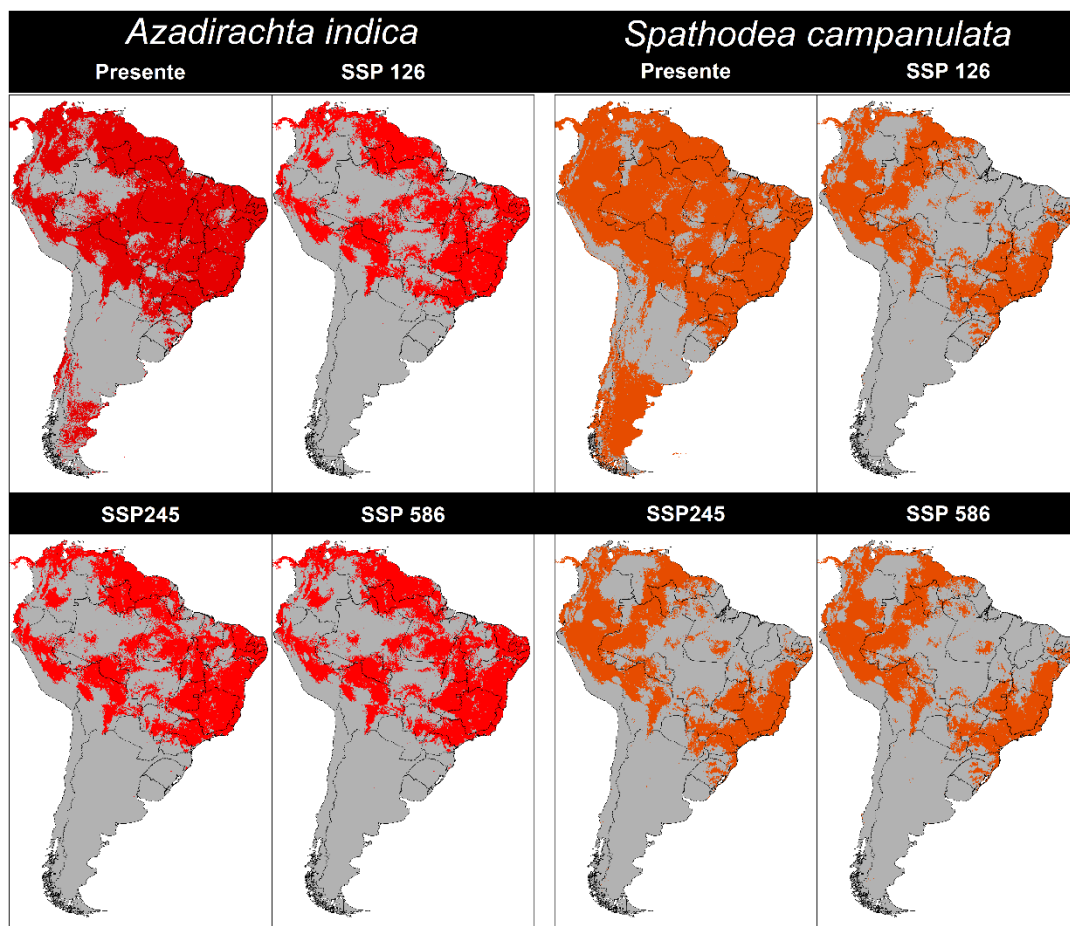
Fonte: Elaborado pela autora

Como representado na Figura 2, os resultados do cenário atual indicam que as duas espécies apresentam padrões espaciais de adequabilidade distintos, refletindo nichos climáticos contrastantes. A espécie *S. campanulata* concentrou maior adequação em zonas tropicais úmidas, como a Amazônia, o litoral do Nordeste e áreas de transição da Mata Atlântica. Já *A. indica* apresentou adequação relativamente maior em ambientes semiáridos e subúmidos, incluindo o polígono das secas no Nordeste e partes da Bolívia e do Paraguai. Esses padrões estão em consonância com as preferências ecológicas de cada espécie e com a seleção de variáveis climáticas e edáficas utilizadas na modelagem.

Os resultados indicam maior adequabilidade ambiental em determinadas regiões, evidenciando áreas potencialmente favoráveis à ocorrência da espécie. para a *S. campanulata* em todos os cenários, sobretudo na Amazônia e no litoral atlântico, incluindo porções do Nordeste e do Sudeste do Brasil. O deslocamento do centro de distribuição foi majoritariamente em direção ao sul, com maior intensidade sob SSP5-8.5, alcançando áreas no sul do Brasil e no norte da Argentina. Para *A. indica*, verificou-se um aumento expressivo da adequabilidade em regiões semiáridas, sobretudo no Nordeste brasileiro, enquanto zonas úmidas, como a Amazônia, apresentaram redução da adequabilidade. Esse padrão torna-se mais acentuado sob SSP5-8.5, reforçando sua adaptação a ambientes de déficit hídrico (Figura 2).

Comparando as duas espécies, observa-se um padrão de ocupação distinto: enquanto *S. campanulata* tendeu a se expandir em regiões úmidas e de maior cobertura florestal, *A. indica* apresentou maior adequação a áreas secas e abertas. Essa complementaridade de nichos indica que ambas podem avançar em diferentes regiões da América do Sul, ampliando seu impacto sobre ecossistemas locais.

Figura 2. A distribuição potencial atual (Presente) e as projeções para três cenários climáticos futuros (SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5). As áreas em vermelho indicam regiões com condições climáticas favoráveis à ocorrência das espécies, enquanto as áreas em cinza mostram baixa adequabilidade. É possível observar mudanças na extensão e no padrão espacial de adequabilidade climática ao longo dos cenários, evidenciando possíveis expansões, retrações ou deslocamentos das áreas propícias para cada espécie sob diferentes intensidades de mudança climática.



Fonte:Elaborado pela autora

DISCUSSÃO

Os resultados indicaram que *S. campanulata* e *A. indica* possuem alto potencial de expansão na América do Sul sob diferentes cenários climáticos, o que reforça a preocupação com o aumento das invasões biológicas em um contexto de mudanças ambientais globais (Fulgêncio-Lima et al., 2021; Pyšek et al., 2020). *S. campanulata* apresentou maior adequabilidade em regiões tropicais úmidas, como Amazônia e Mata Atlântica, e tende a expandir-se em direção ao sul do continente sob o cenário mais crítico (SSP5-8.5). Esse comportamento está relacionado à sua preferência por temperaturas elevadas e alta umidade, características semelhantes às de sua região de origem. Já *A. indica* mostrou maior adequação em ambientes secos e subúmidos, como o Nordeste brasileiro e partes da Bolívia e Paraguai, indicando adaptação a condições de déficit hídrico e resistência à seca (Naumann & Isman, 1996). Esses padrões refletem nichos ecológicos complementares, o que sugere que ambas as espécies podem ampliar sua distribuição em diferentes ecossistemas, aumentando o risco de substituição da flora nativa e alteração de processos ecológicos locais (Pivello et al., 1999;

Yelenik et al., 2004). Além disso, há registros de impactos negativos sobre polinizadores, especialmente abelhas, devido à toxicidade do néctar e pólen de *A. indica* e à dominância floral de *S. campanulata*, que reduz a diversidade de recursos disponíveis (Portugal-Araújo, 1963).

Os resultados reforçam a necessidade de ações preventivas regionais, como o monitoramento de áreas úmidas para *S. campanulata* e de zonas semiáridas para *A. indica*, além do controle do uso dessas espécies em paisagismo e reflorestamento. Dessa forma, os modelos gerados contribuem para o planejamento ambiental e o manejo de espécies invasoras sob futuros cenários de mudança climática.

CONCLUSÃO

O presente estudo permitiu compreender o potencial de expansão das espécies invasoras *S. campanulata* e *A. indica* na América do Sul sob diferentes cenários de mudanças climáticas. Os modelos de distribuição utilizados demonstraram bom desempenho e revelaram que ambas as espécies possuem ampla adequabilidade ambiental, ainda que com padrões distintos. *Spathodea campanulata* apresentou maior adequação em regiões úmidas e florestadas, como a Amazônia e a Mata Atlântica, com tendência de expansão para o sul do continente em cenários mais críticos. Já *A. indica* mostrou-se mais adaptada a ambientes secos e subúmidos, com destaque para o nordeste brasileiro e áreas da Bolívia e Paraguai. Esses resultados indicam que, em conjunto, as duas espécies podem ampliar significativamente suas áreas de ocorrência, representando risco crescente à biodiversidade nativa. Os resultados reforçam também a eficácia dos SDMs como ferramentas para prever áreas suscetíveis à invasão e subsidiar estratégias de monitoramento e manejo preventivo. A integração de variáveis climáticas e edáficas, aliada ao uso de múltiplos algoritmos, contribuiu para projeções mais realistas e consistentes. Conclui-se que as mudanças climáticas tendem a favorecer a expansão de espécies exóticas invasoras, intensificando seus impactos ecológicos e econômicos. Dessa forma, recomenda-se a adoção de políticas públicas voltadas ao controle dessas espécies, com atenção especial às áreas mais propensas à invasão, e a continuidade de pesquisas que aliem modelagem preditiva e observações de campo, visando à conservação da biodiversidade sul-americana.

REFERÊNCIAS

- 261 ALLOUCHE, O.; TSOAR, A.; KADMON, R. **Assessing the accuracy of species**
 262 **distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS).** *Journal of*
 263 *Applied Ecology*, Hoboken, v. 43, n. 6, p. 1223–1232, 2006.
- 264 AMARAL, L. M.; FERREIRA, M. C.; MANN, R. S. **Modelos de distribuição de espécies:**
 265 **conceitos, aplicações e desafios.** *Revista Brasileira de Geografia Física*, Recife, v. 14, n. 3,
 266 p. 1421–1435, 2021.
- 267 ANDERSON, R. P.; LEW, D.; PETERSON, A. T. Evaluating predictive models of species’
 268 distributions: criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling*, Amsterdam, v.
 269 162, n. 3, p. 211–232, 2003.
- 270 ANDERSON, R. P. et al. **Improved representation of ecological niches using MaxEnt.**
 271 *Ecological Modelling*, Amsterdam, v. 222, n. 3, p. 493–505, 2011.
- 272 ANDRADE, A. F. A.; VELAZCO, S. J. E.; DE MARCO JÚNIOR, P. ENMTML: an R
 273 **package for ecological niche modeling.** *Methods in Ecology and Evolution*, Oxford, v. 11,
 274 n. 11, p. 1450–1457, 2020.
- 275 ARAÚJO, M. B.; NEW, M. **Ensemble forecasting of species distributions.** *Trends in*
 276 *Ecology & Evolution*, Amsterdam, v. 22, n. 1, p. 42–47, 2007.
- 277 ARRAES, R. A. et al. **Fragmentação de habitats naturais e perda da biodiversidade.**
 278 *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, São Paulo, n. 24, p. 1–10, 2012.
- 279 BAHN, V.; MCGILL, B. J. **Testing the predictive performance of distribution models.**
 280 *Ecography*, Copenhagen, v. 36, n. 9, p. 973–985, 2013.
- 281 BARVE, N. et al. **The crucial role of the accessible area in ecological niche modeling.**
 282 *Ecological Modelling*, Amsterdam, v. 222, n. 11, p. 1810–1819, 2011.
- 283 BEAUREGARD, F.; BLOIS, J. L. **Beyond a climate-centric view of species distribution.**
 284 *Ecology*, Washington, v. 95, n. 4, p. 898–908, 2014.
- 285 BELLARD, C. et al. **Globalization and biological invasions.** *Nature Ecology & Evolution*,
 286 London, v. 6, n. 2, p. 152–163, 2022.
- 287 BLACKBURN, T. M. et al. **A proposed unified framework for biological invasions.**
 288 *Trends in Ecology & Evolution*, Amsterdam, v. 26, n. 7, p. 333–339, 2011.
- 289 BREIMAN, L. Random forests. *Machine Learning*, New York, v. 45, n. 1, p. 5–32, 2001.
- 290 CARNEIRO, E. et al. **Impactos ecológicos de espécies exóticas invasoras.** *Ecologia*
 291 *Aplicada*, São Paulo, v. 14, n. 2, p. 85–97, 2025.
- 292 CARVALHO, L. A. **Espécies invasoras e transformações culturais.** *Revista de*
 293 *Ciências Socioambientais*, Goiânia, v. 11, n. 1, p. 45–60, 2019.
- 294 CATFORD, J. A. et al. **Reducing redundancy in invasion ecology.** *Diversity and*
 295 *Distributions*, Oxford, v. 17, n. 1, p. 58–67, 2011.

- 296 COSTANZA, R. et al. **The value of ecosystem services.** *Global Environmental Change*,
297 Oxford, v. 42, p. 152–158, 2017.
- 298 DE MARCO JÚNIOR, P.; SIQUEIRA, M. F. **Como determinar áreas prioritárias para**
299 **conservação usando modelos de distribuição de espécies.** *Megadiversidade*, Belo
300 Horizonte, v. 5, n. 1–2, p. 50–58, 2009.
- 301 DE MARCO, P.; NÓBREGA, C. C. **Avaliação de modelos de distribuição de espécies.**
302 *Oecologia Australis*, Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, p. 1–15, 2018.
- 303 DINIS, J. et al. **Ecological niche models and climate change.** *Ecological Indicators*,
304 Amsterdam, v. 110, p. 105–112, 2020.
- 305 FULGÊNCIO-LIMA, M. et al. **Climate change and invasive species expansion.** *Biological*
306 *Invasions*, Dordrecht, v. 23, p. 1453–1467, 2021.
- 307 GALLOWAY, J. N. et al. **Transformation of the nitrogen cycle.** *Science*, Washington, v.
308 320, n. 5878, p. 889–892, 2008.
- 309 HANSEN, A. J. et al. **Predicting species distributions under climate change.** *Global*
310 *Ecology and Biogeography*, Oxford, v. 33, n. 2, p. 210–225, 2024.
- 311 HAO, T. et al. **Climate and soil variables in species distribution models.** *Science of the*
312 *Total Environment*, Amsterdam, v. 703, p. 135–145, 2020.
- 313 HORTAL, J. et al. **Seven shortfalls that beset large-scale knowledge of biodiversity.**
314 *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, Palo Alto, v. 46, p. 523–549, 2015.
- 315 IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis.** Cambridge: Cambridge
316 University Press, 2021.
- 317 JARIĆ, I. et al. **Cultural integration of invasive species.** *npj Biodiversity*, London, v. 4, n.
318 1, p. 1–12, 2025.
- 319 LEROY, B. et al. Without quality data, species distribution models are unreliable.
320 *Ecography*, Copenhagen, v. 41, n. 10, p. 154–167, 2018.
- 321 LOCKWOOD, J. L.; HOOPES, M. F.; MARCHETTI, M. P. **Invasion ecology.** Oxford:
322 Wiley-Blackwell, 2009.
- 323 LUCCHETTI, M. A.; KILCHENMANN, V.; GLAUSER, G.; PRAZ, C.; KAST, C.
324 **Nursing protects honeybee larvae from secondary metabolites of pollen.** *Proceedings of*
325 *the Royal Society B: Biological Sciences*, London, v. 285, n. 1875, p. 20172849, 2018. DOI:
326 10.1098/rspb.2017.2849.
- 327 MARTINI, A. et al. **Urbanização e perda da biodiversidade.** *Landscape Ecology*,
328 Dordrecht, v. 40, n. 4, p. 1123–1138, 2025.
- 329 NAUMANN, K.; ISMAN, M. **Toxicity of neem to insects.** *Journal of Economic*
330 *Entomology*, Oxford, v. 89, n. 3, p. 608–612, 1996.

- 331 PEREIRA, H. M. **Drivers of biodiversity loss.** *Science*, Washington, v. 356, n. 6335, p.
332 1273–1274, 2017.
- 333 PIMENTEL, D. et al. **Economic and environmental threats of invasive species.**
334 *BioScience*, Oxford, v. 51, n. 1, p. 53–65, 2001.
- 335 PIVELLO, V. R. et al. **Alien grasses in Brazilian savannas.** *Biodiversity and Conservation*,
336 Dordrecht, v. 8, n. 9, p. 1281–1294, 1999.
- 337 PORTUGAL-ARAÚJO, V. **Estudos sobre toxicidade vegetal.** *Revista Brasileira de*
338 *Biologia*, Rio de Janeiro, v. 23, p. 113–120, 1963.
- 339 PYŠEK, P. et al. **Invasion dynamics under global change.** *Annual Review of Ecology,*
340 *Evolution, and Systematics*, Palo Alto, v. 51, p. 1–25, 2020.
- 341 ROBERTS, D. R. et al. **Cross-validation strategies for data with spatial structure.**
342 *Ecography*, Copenhagen, v. 40, n. 8, p. 913–929, 2017.
- 343 SHINE, R. **The ecological impact of invasive cane toads.** *Biological Conservation*,
344 Amsterdam, v. 143, n. 8, p. 1873–1881, 2010.
- 345 SILVA, D. P. **Modelagem ecológica aplicada à conservação.** *Revista Brasileira de*
346 *Ecologia*, São Paulo, v. 18, n. 2, p. 45–60, 2022.
- 347 SOBERÓN, J.; PETERSON, A. T. **Interpretation of models of fundamental ecological**
348 **niches.** *Biodiversity Informatics*, Lawrence, v. 2, p. 1–10, 2005.
- 349 SOBERÓN, J. **Grinnellian and Eltonian niches.** *Ecology Letters*, Oxford, v. 10, n. 12, p.
350 1115–1123, 2007.
- 351 TESTA, S. et al. **Biodiversity loss in the Anthropocene.** *Global Change Biology*, Oxford, v.
352 26, n. 1, p. 123–134, 2020.
- 353 VAISSIÈRE, B. E. et al. **Invasive species and ecosystem services.** *Biological Reviews*,
354 Cambridge, v. 97, n. 1, p. 1–19, 2022.
- 355 VALENCIA-ZULETA, A.; MILTO, K.; MACIEL, N. **Taxonomic revision of *Rhinella***
356 ***marina*.** *Herpetological Journal*, London, v. 34, n. 1, p. 45–60, 2024.
- 357 WHITTAKER, R. J. et al. **Conservation biogeography.** *Diversity and Distributions*, Oxford,
358 v. 11, n. 1, p. 3–23, 2005.
- 359 YELENIK, S. G. et al. **Nitrogen impacts of invasive *Acacia*.** *Ecological Applications*,
360 Washington, v. 14, n. 1, p. 152–163, 2004.