



Impactos da mudança climática na distribuição de espécies de jatobá

Tais TiyoKO TOKUSATO ¹ , Caroline de Souza BEZERRA ¹ , Jennifer Souza TOMAZ ¹ ,
Samuel Freitas de SOUZA ¹ , Fábio de Castro BORBA ¹ , Helinara Lais Vieira CAPUCHO ¹ ,
Santiago Linorio Ferreyra RAMOS ¹ , Ricardo LOPES ² ,
Carlos Henrique Salvino Gadelha MENESES ³ , Maria Teresa Gomes LOPES ¹ 

¹ Universidade Federal do Amazonas, Manaus, AM, Brasil.

² Embrapa Amazônia Ocidental, Manaus, AM, Brasil.

³ Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, PB, Brasil.

*Email: mtglopes@ufam.edu.br

Submetido em: 17/07/2025; Aceito em: 18/02/2026; Publicado em: 24/02/2026.

RESUMO: A mudança climática, impulsionada pelo aumento dos gases de efeito estufa, altera os regimes térmicos e pluviométricos globais, ameaçando ecossistemas megadiversos, como a Amazônia. Espécies de *Hymenaea* (*H. aurea*, *H. courbaril*, *H. erigone*, *H. martiana*, *H. parvifolia*, *H. stigonocarpa*) possuem elevado valor alimentar, madeireiro e medicinal, sendo, portanto, prioritárias para programas de conservação comunitária. Este estudo objetivou desenvolver projeções a partir da modelagem da distribuição atual (2009-2019) e futura das espécies de *Hymenaea*, utilizando 19 variáveis bioclimáticas e 14 edáficas em domínios fitogeográficos brasileiros. Foram geradas informações para dois cenários climáticos do SSP (Shared Socioeconomic Pathways), SSP245 (menos pessimista) e SSP585 (mais pessimista), nos intervalos de tempo 2041-2060, 2061-2080 e 2081-2100. Os modelos indicam alta adequabilidade nos domínios Amazônia, Cerrado e Caatinga; contudo, cenários futuros predizem contrações de áreas significativas, sobretudo no SSP585, com perdas progressivas de habitat adequado. SSP245 sugere reduções menores e variações mais estáveis. Frente a essa tendência, propõe-se a priorização de unidades de conservação e corredores ecológicos nesses domínios, aliada a planos de manejo sustentáveis que integrem o conhecimento tradicional e a pesquisa aplicada. A integração de dados climáticos, edáficos e socioecológicos desta pesquisa fornece uma base científica robusta para o delineamento da preservação dos recursos genéticos de *Hymenaea* nas próximas décadas, mitigando os riscos de extinção.

Palavras-chave: conservação florestal; recursos florestais; modelagem ecológica; domínios fitogeográficos brasileiros.

Impacts of climate change on the distribution of jatoba species

ABSTRACT: Climate change, driven by the increase in greenhouse gases, alters global thermal and rainfall regimes, threatening megadiverse ecosystems such as the Amazon. *Hymenaea* species (*H. aurea*, *H. courbaril*, *H. erigone*, *H. martiana*, *H. parvifolia*, *H. stigonocarpa*) have high food, timber, and medicinal value and are therefore a priority for community conservation programs. This study aimed to develop projections from modeling the current (2009-2019) and future distribution of *Hymenaea* species using 19 bioclimatic and 14 edaphic variables in Brazilian phytogeographic domains. Information was generated for two climate scenarios, SSP (Shared Socioeconomic Pathways), SSP245 (less pessimistic), and SSP585 (more pessimistic), in the time intervals 2041-2060, 2061-2080, and 2081-2100. The models indicate high adequacy in the Amazon, Cerrado, and Caatinga; however, future scenarios predict contractions of significant areas, especially in SSP585, with progressive losses of suitable habitat. SSP245 suggests smaller reductions and more stable variations. Against this trend, it is proposed that conservation units and ecological corridors in these areas be prioritized, combined with sustainable management plans that integrate traditional knowledge and applied research. The integration of climatic, edaphic, and socioecological data from this research provides a robust scientific basis for the design of the preservation of genetic resources of *Hymenaea* in the coming decades, mitigating extinction risks.

Keywords: forest conservation; forest resources; ecological modeling; Brazilian phytogeographic domains.

1. INTRODUÇÃO

Atividades antrópicas têm modificado significativamente a superfície terrestre ao longo do tempo, resultando em impactos negativos expressivos no uso da terra e na

cobertura do solo (ARRUDA et al., 2023). O desmatamento e a conversão de paisagens naturais, especialmente em decorrência de atividades industriais, desencadearam transformações globais que envolvem múltiplos fenômenos

e processos ambientais, cuja intensidade tem aumentado nas últimas décadas (BALDRIAN et al., 2023). A mudança climática decorrente dessas alterações configura-se como um dos principais desafios do século XXI, tendo como causa central o acúmulo de gases de efeito estufa na atmosfera. Evidências atuais indicam que tais mudanças tendem a se intensificar progressivamente, caso os padrões de uso da terra e de emissão de poluentes se mantenham (IPCC, 2023; VACEK et al., 2023).

Os fatores climáticos exercem influência direta sobre o crescimento das árvores e a produtividade das florestas, ao modificarem condições fundamentais do habitat, como a disponibilidade de água no solo, a umidade do ar, as temperaturas do solo e do ar e a duração da estação de crescimento (VACEK et al., 2023; LARSON et al., 2024). No entanto, devido à complexidade dos ecossistemas florestais, suas respostas às mudanças globais variam conforme o contexto ecológico, e ainda há lacunas significativas no conhecimento sobre o funcionamento das florestas e de seus microrganismos em cenários ambientais futuros. Compreender essas dinâmicas é essencial para o aprimoramento de modelos preditivos, a definição de estratégias de manejo florestal adaptativas e a promoção da conservação de espécies vegetais diante das alterações climáticas (BALDRIAN et al., 2023; VACEK et al., 2023).

Dessa forma, torna-se essencial considerar como a mudança climática pode afetar a distribuição potencial de espécies arbóreas, a fim de favorecer a sucessão natural dessas espécies e orientar ações de conservação. Nesse contexto, a modelagem de nicho ecológico tem se consolidado como uma ferramenta amplamente empregada em diversas áreas, especialmente nos estudos sobre vulnerabilidade de espécies vegetais à mudança climática (TOMAZ et al., 2022; CARRILLO-GARCÍA et al., 2023). Os modelos de nicho ecológico (ENMs) são elaborados a partir da combinação de registros de ocorrência de espécies com variáveis ambientais, principalmente climáticas e edáficas, permitindo a representação espacial das áreas ecologicamente adequadas à ocorrência das espécies (CARRILLO-GARCÍA et al., 2023).

Uma das principais aplicações dos ENMs é a avaliação dos impactos da mudança climática sobre a vegetação. As projeções obtidas são fundamentais para o planejamento de estratégias de manejo e conservação, uma vez que modelos climáticos globais preveem transformações significativas no clima até o final do século, com efeitos negativos já observados em ecossistemas florestais em diversas regiões (BEGOVIĆ et al., 2020; VACEK et al., 2023). Estudos indicam que espécies como barbatimão (*Stryphnodendron adstringens* (Mart.) Coville), malva (*Urena lobata* L.), açai (*Euterpe precatoria* Mart.; *Euterpe oleracea* Mart.) e tucumã (*Astrocaryum acaule* Mart.; *Astrocaryum aculeatum* G.Mey.) são severamente afetadas pela mudança climática global, podendo chegar à extinção em cenários futuros (TOMAZ et al., 2022; CORDEIRO et al., 2023; MARQUES et al., 2024). Essas espécies desempenham funções ecológicas e socioeconômicas relevantes na região Amazônica, reforçando a urgência de estudos voltados à sua conservação. Dentre outras espécies de interesse para a região Amazônica, destacam-se as do gênero *Hymenaea* (*Hymenaea aurea* Y.T.Lee & Langenh., *Hymenaea courbaril* L., *Hymenaea erigoyne* Beth., *Hymenaea martiana* Hayne, *Hymenaea parvifolia* Huber e *Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne), popularmente conhecidas como “jatobás”.

Essas espécies desempenham um papel fundamental na manutenção do equilíbrio ecológico e na oferta de recursos à biodiversidade, contribuindo para a estabilização do solo, o ciclo do carbono e a regulação do clima, além de servirem como *habitat* e fonte de alimento para inúmeras espécies da fauna (PINHO et al., 2020; BORTOLOTO et al., 2022). Destacam-se pelo seu valor ecológico e econômico, sendo amplamente utilizadas na produção de madeira de alta qualidade, na medicina tradicional e na alimentação devido às propriedades nutricionais de seus frutos (CORRÊA et al., 2022; CRUZ et al., 2023). No entanto, a crescente pressão do desmatamento e da exploração madeireira ameaça a sobrevivência dessas espécies, tornando sua conservação essencial para a preservação dos serviços ecossistêmicos, a manutenção da biodiversidade e o desenvolvimento sustentável das comunidades que dependem desses recursos. Proteger espécies como o jatobá significa garantir a integridade da floresta amazônica e seus benefícios para as gerações futuras (BRANDÃO et al., 2023).

Dessa forma, esse trabalho teve como objetivo prever a distribuição geográfica atual e, em cenários futuros, a de seis espécies do gênero *Hymenaea* (*H. aurea*, *H. courbaril*, *H. erigoyne*, *H. martiana*, *H. parvifolia* e *H. stigonocarpa*) no Brasil, com vistas à conservação de seus recursos genéticos e ao uso sustentável dessas espécies.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Dados de ocorrência da espécie

Os registros de ocorrência das espécies de *Hymenaea* (*H. stigonocarpa*, *H. parvifolia*, *H. martiana*, *H. erigoyne*, *H. courbaril* e *H. aurea*) foram restringidos ao território brasileiro e coletados em 2024 a partir de bases públicas de alta confiabilidade: o Centro de Referência em Informação Ambiental na rede *SpeciesLink* (CRIA) e a *Global Biodiversity Information Facility* (GBIF). Complementaram-se esses dados com informações provenientes de herbários virtuais, de revisões bibliográficas, de populações naturais e de coleções da Universidade Federal do Amazonas (UFAM) e do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). O conjunto final, organizado no Laboratório de Genética e Melhoramento Vegetal da UFAM (LABGEMVEG), subsidiou a modelagem e a geração de camadas de distribuição das espécies para a América do Sul.

A etapa de refinamento de dados incluiu: (i) remoção de duplicatas, *outliers* e registros incompletos; (ii) verificação taxonômica; e (iii) validação das coordenadas geográficas no ambiente R, com o pacote *tidyverse* (WICKHAM et al., 2023; R CORE TEAM, 2024). Além disso, com o objetivo de minimizar o viés amostral e atenuar a autocorrelação espacial, foram selecionados apenas registros de ocorrência com distância mínima de 5 km entre si, conforme os critérios metodológicos propostos por Aiello-Lammens et al. (2015).

2.2. Variáveis bioclimáticas

Para a modelagem da distribuição potencial das espécies do gênero *Hymenaea*, consideraram-se 33 variáveis ambientais, sendo 19 bioclimáticas e 14 edáficas. As variáveis bioclimáticas foram obtidas da base de dados WorldClim v2.1, que fornece dados climáticos interpolados de temperatura (máximas e mínimas, em °C) e precipitação (mm), com resolução espacial de 2,5 minutos de arco (~5 km²) (FICK; HIJMANS, 2017).

As variáveis edáficas foram extraídas da base do *Harmonized World Soil Database*, versão 2.0, e possuem resolução espacial de 1 km² (30s) (ISRIC, 2020). Estas variáveis consideram as propriedades químicas e físicas do solo, são de natureza edáfica e representadas por duas profundidades (0-15 cm, 15-30 cm), abrangendo atributos como declividade (m), elevação (m), densidade aparente (cg cm⁻³), capacidade de troca catiônica no pH 7 (mmol (c) kg⁻¹), fragmentos grossos volumétricos (cm³ dm⁻³), argila (g kg⁻¹), nitrogênio (cg kg⁻¹), densidades de carbono orgânico (hg kg⁻¹), estoque de carbono orgânico do solo (t ha⁻¹), pH do solo em H₂O (pH*10), areia (g kg⁻¹), silte (g kg⁻¹), conteúdo de carbono orgânico do solo (dg kg⁻¹) e classes e probabilidades *World Reference Base* disponíveis no *World Soil Information* – ISRIC (2024).

A fim de minimizar a multicolinearidade entre as variáveis e identificar aquelas com maior contribuição à variabilidade ambiental, aplicou-se Análise de Componentes Principais (Principal Component Analysis - PCA) no ambiente R (R CORE TEAM, 2024), com auxílio do pacote *tidyverse* (WICKHAM et al. 2023), considerando os eixos responsáveis por, no mínimo, 95% da variância total, selecionando assim, 13 variáveis bioclimáticas que apresentaram maior contribuição para a variabilidade dos dados, sendo, portanto, consideradas as mais representativas para a aplicação dos modelos de distribuição (VELAZCO et al., 2017).

Os mapas de distribuição futura das espécies estudadas foram elaborados com base no modelo climático CNRM-CM6-1 e na média de três Modelos de Circulação Geral (GCMs): HadGEM-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR e MIROC6 (FIRPO et al. 2022), aplicados aos intervalos temporais de 2021–2040, 2041–2060, 2061–2080 e 2081–2100. As projeções climáticas consideraram dois cenários representativos de trajetórias socioeconômicas e de emissões de gases de efeito estufa (*Shared Socioeconomic Pathways* – SSPs): SSP2-4.5 (aumento médio de 2,7 °C até 2100) e SSP5-8.5 (aumento de até 4,4 °C no mesmo período), com o objetivo de avaliar os impactos da mudança climática na distribuição potencial das espécies (FICK; HIJMANS, 2017). A predição das variáveis climáticas baseou-se nas projeções da sexta avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (IPCC, 2022).

2.3. Modelagem de nicho ecológico

A modelagem de nicho ecológico das espécies foi desenvolvida com base em um modelo consenso, obtido a partir de seis algoritmos: Bioclim (BIO), Bayesian Gaussian Process (GAU), Generalized Linear Models (GLM), Maximum Entropy Default (MXD), Random Forest (RF) e Support Vector Machine (SVM), incluindo diversas técnicas estatísticas voltadas à modelagem da distribuição espacial das espécies. O modelo de consenso foi construído com base na Análise de Componentes Principais (PCA), empregando o primeiro componente principal para elaborar o mapa final de distribuição.

Todas as simulações foram realizadas por meio dos Modelos de Nicho Ecológico (ENMTML) (Andrade et al., 2020), implementados com o pacote *MetaLand EcologyLab* no software RStudio, versão 4.3.2., que integra 6 algoritmos distintos para gerar modelos individuais e consenso.

O desempenho dos modelos foi avaliado por meio das métricas Área sob a Curva (AUC) (Fielding; Bell, 1997), True Skill Statistic (TSS), Índice de Sorensen e Índice de Jaccard

(LEROY et al., 2018). Este último mede a similaridade entre as previsões e as observações dos dados particionados, com valores que variam de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1, maior a concordância entre os dados previstos e observados, refletindo menor ocorrência de falsos positivos e negativos e, portanto, melhor desempenho do modelo (LEROY et al., 2018). Já a métrica AUC avalia a eficácia do modelo em todos os limiares possíveis, e valores acima de 0,8 indicam um desempenho considerado satisfatório.

As previsões de adequabilidade ambiental foram geradas para os seis domínios fitogeográficos do Brasil: Amazônia, Caatinga, Cerrado, Pantanal, Mata Atlântica e Pampa. Os mapas resultantes foram convertidos em mapas binários de distribuição com o auxílio do software QGIS 3.30.1, por meio da função de conversão raster/vetorial. No modelo de consenso, a presença potencial de uma espécie em determinada área é representada por valores contínuos que variam de 0 (baixa adequabilidade ambiental) a 1 (alta adequabilidade ambiental) (AKSOY, 2022). Nos mapas de distribuição potencial elaborados para o presente e para cenários futuros, o grau de adequação das áreas à ocorrência da espécie foi classificado, com base em Aksoy (2022) e com adaptações, da seguinte forma: valores entre 0,00 e 0,50 indicam áreas não adequadas ou pouco adequadas, enquanto valores entre 0,51 e 1,00 correspondem a áreas adequadas a altamente adequadas.

3. RESULTADOS

Após a limpeza e a filtragem espacial, a matriz final incluiu 2.692 registros de ocorrência das espécies, sendo: *H. courbaril* (1.180), *H. stigonocarpa* (809), *H. martiana* (345), *H. parvifolia* (190), *H. eriogyne* (130) e *H. aurea* (38).

Dentre as espécies estudadas, apenas *H. courbaril* apresentou ampla distribuição, ocorrendo nos domínios Amazônia, Pantanal, Cerrado, Caatinga e Mata Atlântica. As espécies *H. stigonocarpa*, *H. martiana* e *H. eriogyne* foram predominantemente registradas no Cerrado e Caatinga, *H. parvifolia* concentrou-se na Amazônia, e *H. aurea* apresentou distribuição restrita à Mata Atlântica (Figura 1).

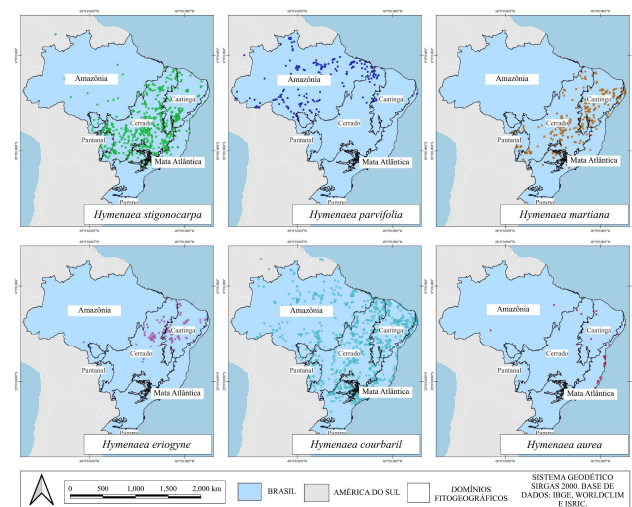


Figura 1. Distribuição e pontos de ocorrência de seis espécies do gênero *Hymenaea* restritos aos domínios fitogeográficos brasileiros. Figure 1. Distribution and points of occurrence of six species of the genus *Hymenaea* restricted to Brazilian phytogeographic domains.

A análise de componentes principais (PCA) indicou que o primeiro componente explicou 40,31% da variância total.

A variância acumulada atingiu 80,26% com os cinco primeiros componentes e 95,85% com os 13 primeiros, indicando que esse conjunto retém a maior parte da informação dos dados. No primeiro componente, a variável de maior peso foi a temperatura mínima do mês mais frio (Bio06; coef. = 0,263). No segundo componente, destacou-se o estoque de carbono orgânico no solo entre 15 e 30 cm (OCS30; coef. = 0,324). Já no terceiro componente, a maior contribuição foi da sazonalidade da precipitação (Bio15; coef. = 0,353) (Tabela 1).

Tabela 1. Coeficientes dos Componentes Principais selecionados pelos PCAs para variáveis bioclimáticas e edáficas, utilizadas em conjunto no processo de modelagem do nicho ecológico das espécies de jatobá.

Table 1. Coefficients of the Main Components selected by the PCAs for bioclimatic and edaphic variables, together used in the ecological niche modeling process of the jatobá species.

Variáveis	PC1	PC2	PC3
bdod30	0,01335	-0,3024	-0,1062
bio01	0,25012	-0,13408	-0,02052
bio02	-0,16078	-0,18664	0,00703
bio03	0,19871	0,03839	0,28746
bio04	-0,21098	-0,05189	-0,31267
bio05	0,18832	-0,22586	-0,16908
bio06	0,26304	-0,04979	0,04605
bio07	-0,21236	-0,12999	-0,21795
bio08	0,21858	-0,16375	-0,09236
bio09	0,2494	-0,07391	0,06948
bio10	0,21952	-0,17933	-0,15315
bio11	0,25861	-0,09202	0,06619
bio12	0,23216	0,15252	-0,01574
bio13	0,23602	0,08351	0,10999
bio14	0,12662	0,22669	-0,18592
bio15	-0,03757	-0,17633	0,35342
bio16	0,23719	0,08598	0,10129
bio17	0,13619	0,22998	-0,17832
bio18	0,14751	0,11882	-0,11704
bio19	0,16802	0,14583	0,03576
cec30	-0,16728	0,16491	-0,18987
cfvo30	-0,16704	0,08588	0,29759
clay30	0,15351	0,06708	-0,04364
elevation	-0,16104	0,07675	0,31152
nitrogen30	-0,05227	0,31203	0,00848
ocd30	-0,05273	0,32049	-0,01958
ocs30	0,00104	0,32438	-0,07666
phh2o30	-0,23567	-0,10369	-0,07215
sand30	-0,11923	-0,10505	0,22343
silt30	0,03723	0,09385	-0,28839
slope1	-0,07464	0,19135	0,25826
soc30	-0,00608	0,28617	-0,04986
wrb	-0,11458	-0,0231	-0,14908

Bdod30=densidade aparente; Bio1= temperatura média anual (°C); Bio2 = média mensal da variação diária da temperatura (°C); Bio3= isotermalidade; Bio4 = sazonalidade da temperatura; Bio5 = temperatura máxima no mês mais quente (°C); Bio6 = temperatura mínima no mês mais frio (°C); Bio7 = variação anual da temperatura (°C); Bio8 = temperatura média no trimestre mais úmido (°C); Bio9 = temperatura média no trimestre mais seco (°C); Bio10 = temperatura média no trimestre mais quente (°C); Bio11 = temperatura média no trimestre mais frio (°C); Bio12 = precipitação pluvial acumulada no ano (mm); Bio13 = precipitação pluvial acumulada no mês mais úmido (mm); Bio14 = precipitação pluvial acumulada no mês mais seco (mm); Bio15 = sazonalidade da precipitação pluvial; Bio16 = precipitação pluvial acumulada no trimestre mais úmido (mm); Bio17 = precipitação pluvial acumulada no trimestre mais seco (mm); Bio18 = precipitação pluvial acumulada no trimestre mais quente (mm) e; Bio19 = precipitação pluvial acumulada no trimestre mais frio (mm); cec30 = capacidade de troca; cfvo30 = fragmentos grossos; clay30 = argila; ocd30 = densidade de carbono; ocs30 = estoque de carbono; slop1 = declividade; soc30 = conteúdo de carbono; CTC = capacidade de troca catiônica no pH 7; FGV = fragmentos grossos volumétricos; DCO = densidades de carbono orgânico; ECO = estoque de carbono orgânico do solo; CCO = conteúdo de carbono orgânico do solo; wrb = classes e probabilidades "World Reference Base" e DA = densidade aparente.

Dentre as métricas avaliadas, a AUC (Área sob a Curva ROC) foi a que melhor representou a capacidade discriminatória dos modelos, apresentando valores superiores a 0,9, indicando alta precisão na previsão das distribuições dessas espécies e sendo a mais eficiente para avaliar o desempenho preditivo das distribuições potenciais (Tabela 2). Entre os algoritmos testados, os métodos Random Forest (RF) e Support Vector Machine (SVM) destacaram-se por sua elevada acurácia, com AUCs superiores a 0,93 para todas as espécies e atingindo 1,00 para *H. martiana* e *H. stigonocarpa*, evidenciando alta capacidade de generalização (Tabela 2). Os algoritmos Gaussian (GAU) e MaxEnt (MXD) também apresentaram bom desempenho, sobretudo em *H. courbaril* e *H. eriogyne*. Contudo, o algoritmo baseado em variáveis bioclimáticas (BIO) apresentou AUCs inferiores a 0,75 para *H. aurea*, indicando menor precisão preditiva nessa espécie (Tabela 2).

A distribuição geográfica das espécies do gênero *Hymenaea* no Brasil revela um padrão de segregação ecológica associado a distintas adaptações aos domínios fitogeográficos do país. As espécies analisadas demonstram preferências por ambientes secos ou úmidos, concentrando-se predominantemente nos biomas Cerrado, Caatinga, Amazônia e Mata Atlântica (Figura 2).

Hymenaea stigonocarpa e *H. parvifolia* apresentam ampla distribuição no Cerrado, com extensões para a Caatinga e ocorrências secundárias em regiões da Mata Atlântica. Ambas exibem baixa probabilidade de ocorrência na Amazônia e no extremo sul do país, o que sugere preferência por ambientes com clima sazonal e solos bem drenados. Padrão semelhante é observado em *H. martiana*, cuja distribuição abrange majoritariamente a Caatinga e o Cerrado, com raras ocorrências na Amazônia e na Mata Atlântica. Essa distribuição indica uma adaptação a condições mais áridas e a solos de baixa fertilidade (Figura 2).

Em contraste, *H. eriogyne* e *H. aurea* ocorrem principalmente na Amazônia, sendo que *H. eriogyne* também é registrada em áreas do Cerrado. A baixa frequência dessas espécies na Caatinga e nas regiões mais meridionais do país sugere uma dependência de ambientes mais úmidos (Figura 2).

Dentre as espécies analisadas, *H. courbaril* se destaca por sua ampla distribuição na Amazônia e na Mata Atlântica, com algumas ocorrências no Cerrado. Sua presença em florestas tropicais úmidas e em solos mais férteis sugere menor tolerância a longos períodos de estiagem (Figura 2).

De modo geral, as espécies de *Hymenaea* evidenciam uma divisão ecológica marcante, com grupos adaptados a ambientes secos (*H. stigonocarpa*, *H. parvifolia*, *H. martiana*) e outros a ambientes úmidos (*H. eriogyne*, *H. aurea*, *H. courbaril*). Essa distribuição reflete distintas estratégias adaptativas no gênero e sua diversificação ao longo dos domínios fitogeográficos brasileiros.

As projeções de adequabilidade ambiental para seis espécies do gênero *Hymenaea* sob o cenário climático SSP2-4.5, para o período de 2041 a 2060, indicam reduções significativas em todas as espécies, com destaque para *H. stigonocarpa*, *H. parvifolia* e *H. martiana*, cujas áreas com alta adequabilidade climática diminuem drasticamente, especialmente nos domínios do Cerrado e da Caatinga (Figura 3). Esses resultados sugerem vulnerabilidade acentuada entre espécies adaptadas a climas sazonais e secos.

Tabela 2. Variáveis indicadoras e desvio padrão (DP) para a validação de seis modelos de predição da área potencial de ocorrência das espécies de jatobá.

Table 2. Indicator variables and standard deviation (SD) for the validation of six models to predict the potential area of occurrence of jatobá species.

<i>Hymenaea aurea</i>						
Métricas	Algoritmos					
	AUC ⁷	Kappa	TSS ⁸	Jaccard	Sorensen	
BIO ¹	0,71±0,096	0,41±0,192	0,41±0,192	0,41±0,192	0,57±0,177	
GAU ²	0,93±0,060	0,81±0,123	0,81±0,123	0,82±0,123	0,90±0,072	
GLM ³	0,73±0,063	0,45±0,161	0,45±0,161	0,56±0,127	0,72±0,097	
MXD ⁴	0,94±0,037	0,81±0,123	0,81±0,123	0,83±0,112	0,90±0,065	
RF ⁵	0,94±0,068	0,86±0,135	0,86±0,135	0,87±0,129	0,93±0,074	
SVM ⁶	0,93±0,051	0,78±0,125	0,78±0,125	0,81±0,109	0,89±0,063	
<i>Hymenaea courbaril</i>						
Métricas	Algoritmos					
	AUC ⁷	Kappa	TSS ⁸	Jaccard	Sorensen	
BIO ¹	0,98±0,004	0,91±0,019	0,91±0,019	0,91±0,019	0,95±0,011	
GAU ²	0,99±0,004	0,92±0,021	0,92±0,021	0,93±0,019	0,96±0,010	
GLM ³	0,99±0,005	0,90±0,017	0,90±0,017	0,91±0,016	0,95±0,009	
MXD ⁴	0,98±0,005	0,87±0,020	0,87±0,020	0,88±0,018	0,94±0,010	
RF ⁵	0,99±0,003	0,93±0,021	0,93±0,021	0,93±0,020	0,97±0,011	
SVM ⁶	0,99±0,005	0,91±0,017	0,92±0,017	0,92±0,016	0,96±0,008	
<i>Hymenaea eriogyne</i>						
Métricas	Algoritmos					
	AUC ⁷	Kappa	TSS ⁸	Jaccard	Sorensen	
BIO ¹	0,93±0,023	0,85±0,045	0,85±0,045	0,85±0,045	0,92±0,026	
GAU ²	0,99±0,010	0,92±0,051	0,92±0,051	0,92±0,049	0,96±0,027	
GLM ³	0,93±0,018	0,84±0,047	0,84±0,047	0,86±0,040	0,92±0,023	
MXD ⁴	0,99±0,008	0,92±0,030	0,92±0,030	0,92±0,028	0,96±0,015	
RF ⁵	0,99±0,005	0,92±0,030	0,92±0,030	0,92±0,026	0,96±0,014	
SVM ⁶	0,99±0,006	0,93±0,035	0,93±0,035	0,93±0,031	0,96±0,017	
<i>Hymenaea martiana</i>						
Métricas	Algoritmos					
	AUC ⁷	Kappa	TSS ⁸	Jaccard	Sorensen	
BIO ¹	0,96±0,022	0,92±0,044	0,92±0,044	0,92±0,044	0,96±0,024	
GAU ²	1,00±0,000	0,98±0,008	0,98±0,008	0,98±0,008	0,99±0,004	
GLM ³	0,96±0,014	0,91±0,024	0,91±0,024	0,91±0,024	0,95±0,013	
MXD ⁴	0,99±0,002	0,94±0,019	0,94±0,019	0,94±0,016	0,97±0,009	
RF ⁵	1,00±0,001	0,96±0,008	0,96±0,008	0,96±0,008	0,98±0,004	
SVM ⁶	1,00±0,001	0,97±0,007	0,97±0,007	0,97±0,007	0,98±0,004	
<i>Hymenaea parvifolia</i>						
Métricas	Algoritmos					
	AUC ⁷	Kappa	TSS ⁸	Jaccard	Sorensen	
BIO ¹	0,94±0,021	0,88±0,041	0,87±0,041	0,87±0,041	0,93±0,023	
GAU ²	0,99±0,013	0,91±0,050	0,91±0,050	0,91±0,045	0,95±0,024	
GLM ³	0,98±0,012	0,89±0,043	0,89±0,043	0,89±0,044	0,94±0,025	
MXD ⁴	0,98±0,014	0,88±0,037	0,88±0,036	0,89±0,030	0,94±0,017	
RF ⁵	0,99±0,007	0,89±0,043	0,89±0,043	0,90±0,042	0,94±0,024	
SVM ⁶	0,99±0,009	0,93±0,054	0,93±0,054	0,93±0,051	0,96±0,027	
<i>Hymenaea stigonocarpa</i>						
Métricas	Algoritmos					
	AUC ⁷	Kappa	TSS ⁸	Jaccard	Sorensen	
BIO ¹	0,97±0,009	0,90±0,025	0,90±0,025	0,90±0,025	0,95±0,014	
GAU ²	0,99±0,003	0,94±0,009	0,94±0,009	0,94±0,009	0,97±0,005	
GLM ³	0,99±0,001	0,93±0,011	0,93±0,011	0,93±0,011	0,96±0,006	
MXD ⁴	0,99±0,003	0,91±0,015	0,91±0,015	0,91±0,015	0,96±0,008	
RF ⁵	0,99±0,003	0,93±0,017	0,93±0,017	0,94±0,015	0,97±0,008	
SVM ⁶	1,00±0,002	0,94±0,006	0,94±0,006	0,95±0,006	0,97±0,003	

¹BIO = Bioclim; ²GAU = Bayesian Gaussian Process; ³GLM = Generalized Linear Models; ⁴MXD = Maximum Entropy Default; ⁵RF = Random Forests; ⁶SVM = Support Vector Machine; ⁷AUC = Area Under the Curve e ⁸TSS = True Skill Statistics.

Entre as espécies associadas a ambientes úmidos, *H. courbaril* apresenta maior resiliência, mantendo faixas de alta adequabilidade na Amazônia e na Mata Atlântica. Por outro lado, *H. eriogyne* e *H. aurea* também sofrem perdas expressivas, com poucas áreas projetadas como altamente adequadas (Figura 4). Tais padrões indicam que mesmo espécies florestais podem ter sua distribuição restringida pela mudança climática, dependendo fortemente da conservação de remanescentes naturais.

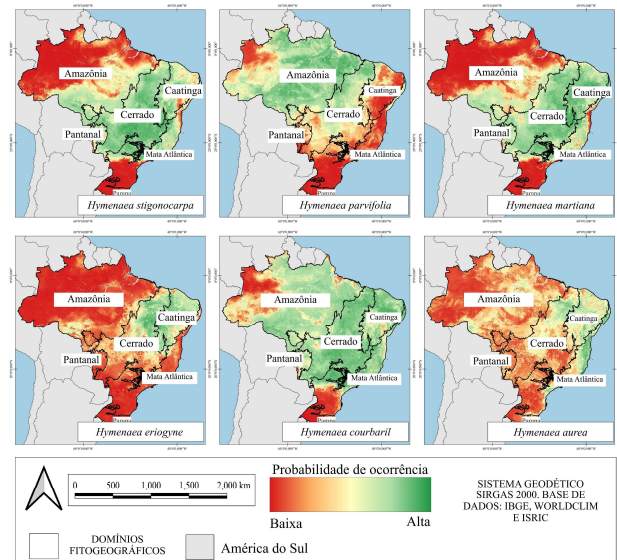


Figura 2. Áreas de distribuição previstas para as espécies de jatobá (*Hymenaea*) (*H. stigonocarpa*, *H. parvifolia*, *H. martiana*, *H. eriogyne*, *H. courbaril* e *H. aurea*) no período atual (2009-2019).

Figure 2. Predicted distribution areas for the jatoba species, *Hymenaea* (*H. stigonocarpa*, *H. parvifolia*, *H. martiana*, *H. eriogyne*, *H. courbaril*, and *H. aurea*), referring to the current period (2009-2019).

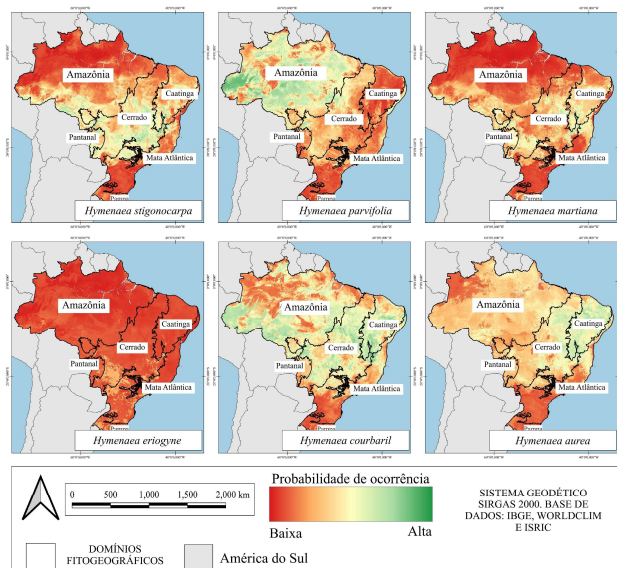


Figura 3. Projeção da adequabilidade ambiental no cenário menos pessimista SSP245, no intervalo de tempo 2041-2060, para as espécies de jatobá (*Hymenaea*: *H. stigonocarpa*, *H. parvifolia*, *H. martiana*, *H. eriogyne*, *H. courbaril* e *H. aurea*).

Figure 3. Projection of environmental suitability in the less pessimistic scenario SSP245 in the 2041-2060 time interval for jatoba species, *Hymenaea* (*H. stigonocarpa*, *H. parvifolia*, *H. martiana*, *H. eriogyne*, *H. courbaril*, and *H. aurea*).

As projeções de adequabilidade ambiental sob o cenário climático menos pessimista (SSP2-4.5) para o período de 2061 a 2080 indicam uma tendência de redução significativa na adequação ambiental para *Hymenaea stigonocarpa*, *H. parvifolia* e *H. martiana*, especialmente nos domínios do Cerrado e da Caatinga (Figura 4). Essas espécies, adaptadas a ambientes mais secos, podem enfrentar perdas substanciais de habitat potencial, com impactos relevantes sobre sua distribuição futura. Para *H. courbaril* e *H. aurea*, observa-se a manutenção de áreas com adequabilidade moderada a alta, sobretudo em porções da Amazônia e da Mata Atlântica. No

entanto, *H. eriogyne* apresenta redução expressiva em sua área de adequabilidade, sugerindo maior sensibilidade à mudança climática do que previsto inicialmente. A fragmentação dos habitats florestais pode ainda intensificar os desafios à conservação dessas espécies.

De modo geral, as projeções indicam que espécies associadas a climas úmidos tendem a manter maior estabilidade ambiental do que as adaptadas a ambientes secos, reforçando a necessidade de estratégias de conservação diferenciadas para cada grupo ecológico do gênero *Hymenaea*.

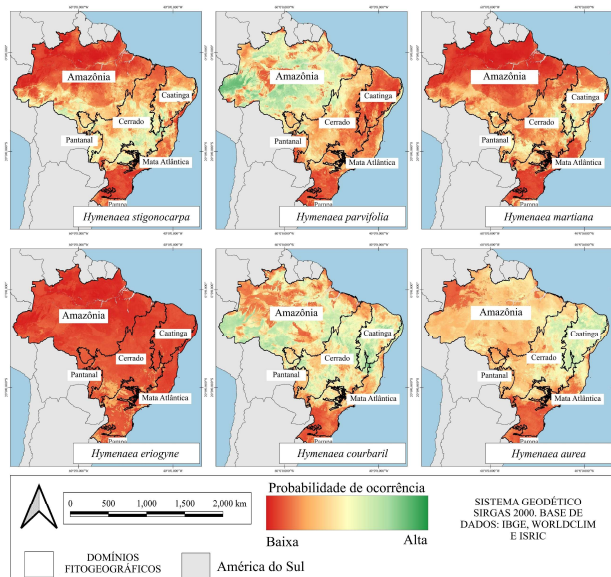


Figura 4. Projeção da adequabilidade ambiental no cenário menos pessimista SSP245, no intervalo de tempo 2061-2080, para as espécies de jatobá (*H. stigonocarpa*, *H. parvifolia*, *H. martiana*, *H. eriogyne*, *H. courbaril* e *H. aurea*).

Figure 4. Projection of environmental suitability in the less pessimistic scenario SSP245 in the time intervals 2061-2080 for jatoba species, *Hymenaea* (*H. stigonocarpa*, *H. parvifolia*, *H. martiana*, *H. eriogyne*, *H. courbaril*, and *H. aurea*).

As projeções para o cenário climático menos pessimista (SSP2-4.5) no intervalo de 2081 a 2100 indicam perdas significativas de adequabilidade ambiental para *Hymenaea stigonocarpa*, *H. martiana*, *H. eriogyne* e *H. parvifolia*, com consequente redução da probabilidade de ocorrência dessas espécies em quase todos os domínios fitogeográficos brasileiros (Figura 5). Para *H. parvifolia*, embora persista alguma adequação em fragmentos da Amazônia, observa-se baixa probabilidade de ocorrência nos demais biomas, incluindo Cerrado, Caatinga, Mata Atlântica, Pantanal e Pampa. Por outro lado, *H. courbaril* e *H. aurea* mantêm áreas mais extensas com adequabilidade ambiental, principalmente na Amazônia e em porções do Cerrado e da Mata Atlântica, destacando-se como as espécies potencialmente mais resilientes à mudança climática no horizonte analisado (Figura 5).

As projeções para o cenário climático mais pessimista (SSP5-8.5) no período de 2041 a 2060 indicam perdas contínuas e generalizadas de áreas com adequabilidade ambiental para todas as espécies do gênero *Hymenaea* nos principais domínios fitogeográficos do Brasil (Figura 6). Entre elas, *H. stigonocarpa*, *H. martiana* e *H. eriogyne* destacam-se como as mais impactadas pelas alterações projetadas nos padrões climáticos e edáficos, apresentando reduções expressivas na sua distribuição potencial.

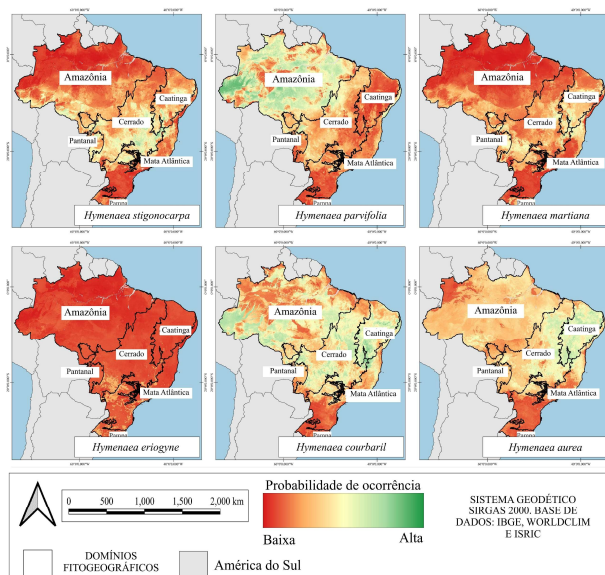


Figura 5. Projeção da adequabilidade ambiental no cenário menos pessimista SSP245, no intervalo de tempo 2081-2100, para as espécies de jatobá (*H. stigonocarpa*, *H. parvifolia*, *H. martiana*, *H. eriogyne*, *H. courbaril* e *H. aurea*).

Figure 5. Projection of environmental suitability in the less pessimistic scenario SSP245 in the time interval 2081-2100 for jatoba species, *Hymenaea* (*H. stigonocarpa*, *H. parvifolia*, *H. martiana*, *H. eriogyne*, *H. courbaril*, and *H. aurea*).

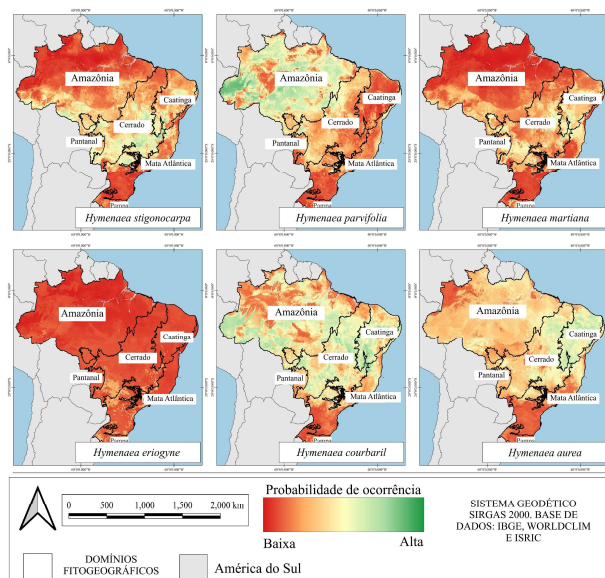


Figura 6. Projeção da adequabilidade ambiental no cenário mais pessimista SSP585 no intervalo de tempo 2041-2060 para as espécies de jatobá, *Hymenaea* (*H. stigonocarpa*, *H. parvifolia*, *H. martiana*, *H. eriogyne*, *H. courbaril* e *H. aurea*).

Figure 6. Projection of environmental suitability in the most pessimistic scenario, SSP585, in the 2041-2060 time interval for jatoba species, *Hymenaea* (*H. stigonocarpa*, *H. parvifolia*, *H. martiana*, *H. eriogyne*, *H. courbaril*, and *H. aurea*).

Esses resultados reforçam a vulnerabilidade das espécies de jatobá diante da mudança climática em cenários de altas emissões, exigindo atenção especial às estratégias de conservação, especialmente para aquelas com afinidade por ambientes secos ou com distribuição mais restrita.

No cenário climático mais pessimista (SSP5-8.5) projetado para o período de 2061 a 2080, *Hymenaea aurea* destaca-se como a espécie com menor perda relativa de áreas com adequabilidade ambiental, mantendo faixas relevantes

de alta adequação, especialmente na Amazônia, no leste do Cerrado e na Caatinga (Figura 7). Apesar da redução gradual das áreas adequadas, *H. aurea* demonstra maior resiliência do que as demais espécies avaliadas.

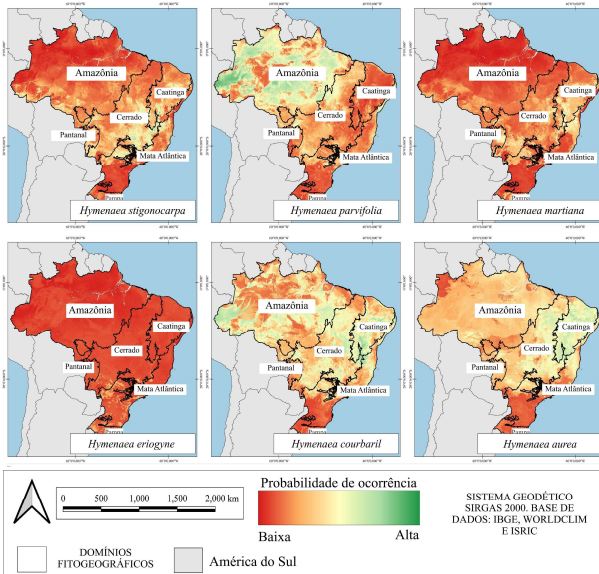


Figura 7. Projeção da adequabilidade ambiental no cenário mais pessimista SSP585 no intervalo de tempo 2061-2080 para as espécies de jatobá, *Hymenaea* (*H. stigonocarpa*, *H. parvifolia*, *H. martiana*, *H. eriogyne*, *H. courbaril* e *H. aurea*).

Figure 7. Projection of environmental suitability in the most pessimistic scenario, SSP585, in the 2061-2080 time interval for jatoba species, *Hymenaea* (*H. stigonocarpa*, *H. parvifolia*, *H. martiana*, *H. eriogyne*, *H. courbaril*, and *H. aurea*).

Por outro lado, *H. stigonocarpa*, *H. martiana* e *H. eriogyne* continuam sendo as espécies mais afetadas, apresentando severas reduções de adequabilidade ambiental em todos os domínios fitogeográficos, o que sugere alta vulnerabilidade diante da mudança climática prevista para esse horizonte temporal.

Sob o cenário climático mais pessimista (SSP5-8.5) projetado para o período de 2081 a 2100, observa-se uma redução severa e contínua das áreas com adequabilidade ambiental para todas as espécies de *Hymenaea* nos domínios fitogeográficos brasileiros (Figura 8). A intensificação da mudança climática resulta em uma retração acentuada das regiões potencialmente favoráveis à ocorrência dessas espécies.

Apesar desse cenário crítico, *H. parvifolia*, *H. courbaril* e *H. aurea* ainda apresentam pequenos refúgios com alta probabilidade de ocorrência, sobretudo em áreas da Amazônia e da Caatinga. Essas áreas remanescentes de adequabilidade podem representar zonas-chave para a conservação in situ dessas espécies no futuro.

As projeções de adequabilidade ambiental para as seis espécies do gênero *Hymenaea* revelam padrões distintos de resposta à mudança climática nos cenários SSP2-4.5 (menos pessimista) e SSP5-8.5 (mais pessimista), ao longo dos intervalos temporais de 2041–2060, 2061–2080 e 2081–2100. Entre as espécies analisadas, *H. eriogyne* apresenta os maiores impactos negativos, com perdas superiores a 99% da área adequada em todos os biomas e períodos, independentemente do cenário climático (Tabela 3).

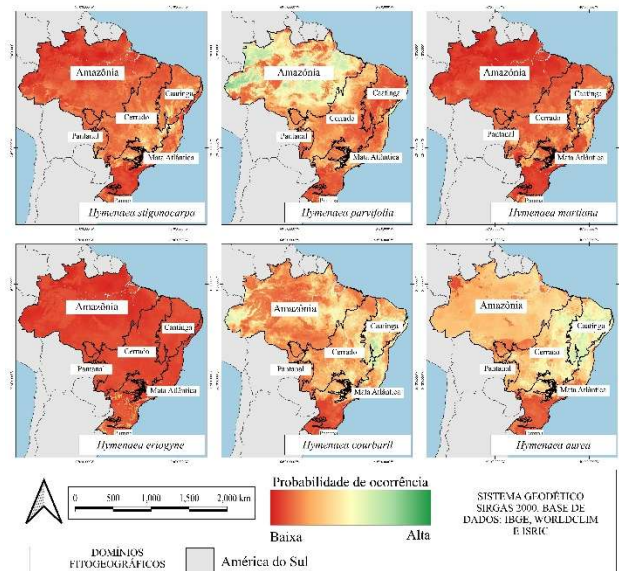


Figura 8. Projeção da adequabilidade ambiental no cenário mais pessimista SSP585 no intervalo de tempo 2081-2100 para as espécies de jatobá, *Hymenaea* (*H. stigonocarpa*, *H. parvifolia*, *H. martiana*, *H. eriogyne*, *H. courbaril* e *H. aurea*).

Figure 8. Projection of environmental suitability in the most pessimistic scenario, SSP585, in the time interval 2081-2100 for jatoba species, *Hymenaea* (*H. stigonocarpa*, *H. parvifolia*, *H. martiana*, *H. eriogyne*, *H. courbaril*, and *H. aurea*).

Resultados semelhantes foram observados para *H. martiana*, cujas perdas totais superam 89% já no primeiro intervalo (2041–2060) e atingem até 99,8% no cenário mais crítico. *H. stigonocarpa* e *H. parvifolia* também exibem redução acentuada da adequabilidade, especialmente na Caatinga, no Cerrado e na Amazônia, com declínio progressivo que ultrapassa 90% até o final do século sob SSP5-8.5 (Tabela 3).

Em contraste, *H. courbaril* e *H. aurea* demonstram maior resiliência. *H. aurea* mantém áreas com valores positivos de adequabilidade em certos biomas, mesmo sob cenários adversos, apresentando, inclusive, ganhos marginais no Cerrado e na Caatinga até 2080 no SSP2-4.5. Contudo, mesmo essas espécies sofrem perdas expressivas sob SSP5-8.5, especialmente no último intervalo (2081–2100), quando as reduções totais atingem 72,8% para *H. courbaril* e cerca de 30% para *H. aurea*. De forma geral, os resultados evidenciam que as espécies associadas a ambientes mais secos são mais vulneráveis à mudança climática projetada, com destaque para a retração quase total de *H. eriogyne* e de *H. martiana*. (Tabela 3).

4. DISCUSSÃO

A biodiversidade da Amazônia e de outros domínios fitogeográficos brasileiros enfrenta ameaças crescentes devido à mudança climática e ao desmatamento acelerado (ARRUDA et al. 2023). O presente estudo analisou a distribuição geográfica de seis espécies do gênero *Hymenaea* (*H. aurea*, *H. courbaril*, *H. eriogyne*, *H. martiana*, *H. parvifolia* e *H. stigonocarpa*), utilizando a modelagem de nicho ecológico para prever os impactos da mudança climática em diferentes cenários futuros. Os resultados demonstram que essas espécies possuem ampla distribuição nos domínios fitogeográficos Amazônia, Cerrado e Caatinga, mas que suas áreas de ocorrência podem ser severamente reduzidas nas próximas décadas.

Tabela 3. Projeções de acréscimo (+) ou perda (-) da porcentagem de área de adequabilidade ambiental (%) nos cenários SSP245 e SSP585, nos intervalos de tempo 2041–2060, 2061–2080 e 2081–2100, em comparação com o período atual, nos domínios fitogeográficos brasileiros, para as espécies de *Hymenaea*.

Table 3. Projections of increase (+) or loss (-) of environmental suitability area percentage (%) in the SSP245 and SSP585 scenarios in the time intervals 2041 2060, 2061 2080 and 2081 2100, compared to the current period, in the Brazilian phytogeographic domains for the *Hymenaea* species.

<i>Hymenaea aurea</i>				
SSP245				
Domínio	Atual (km²)	2041-2060	2061-2080	2081-2100
Amazônia	600.250,27	+0,67	-11,51	-30,64
Caatinga	743.184,53	+13,25	+12,95	+12,46
Cerrado	743.184,56	+19,88	+14,33	+25,85
Mata Atlântica	483.162,12	-63,45	-60,89	-59,26
Pampa	35.451,69	-100,00	-100,00	-100,00
Pantanal	13.183,26	-84,54	-94,08	-78,45
Total	2.618.763,39	-3,93	-7,96	-8,83
SSP585				
Amazônia	600.250,27	-11,69	-49,10	-89,05
Caatinga	743.184,53	+12,46	+10,82	+3,16
Cerrado	743.184,56	+21,87	+21,88	+4,83
Mata Atlântica	483.162,12	-60,43	-54,97	-53,77
Pampa	35.451,69	-100,00	-100,00	-100,00
Pantanal	13.183,26	-88,82	-98,36	-99,96
Total	2.618.763,39	-5,89	-13,96	-29,92
<i>Hymenaea courbaril</i>				
SSP245				
Domínio	Atual (km²)	2041-2060	2061-2080	2081-2100
Amazônia	3.270.293,94	-23,03	-22,93	-28,13
Caatinga	863.481,80	-12,40	-14,35	-17,44
Cerrado	2.071.116,05	-21,51	-26,10	-27,69
Mata Atlântica	807.843,24	-54,27	-51,85	-56,72
Pampa	0,00	0,00	0,00	0,00
Pantanal	148.810,38	-100,00	-100,00	-100,00
Total	7.161.545,41	-25,99	-27,37	-31,14
SSP585				
Amazônia	3.270.293,94	-25,83	-38,93	-76,78
Caatinga	863.481,80	-14,98	-24,38	-49,99
Cerrado	2.071.116,05	-24,35	-40,60	-75,47
Mata Atlântica	807.843,24	-52,76	-56,84	-69,24
Pampa	0,00	0,00	0,00	0,00
Pantanal	148.810,38	-100,00	-100,00	-100,00
Total	7.161.545,41	-28,32	-40,89	-72,80
<i>Hymenaea eriogyne</i>				
SSP245				
Domínio	Atual (km²)	2041-2060	2061-2080	2081-2100
Amazônia	214.553,21	-99,96	-99,96	-99,96
Caatinga	845.788,48	-100,00	-100,00	-100,00
Cerrado	924.671,20	-99,96	-100,00	-99,99
Mata Atlântica	56.570,93	-99,77	-99,73	-99,85
Pampa	0,00	0,00	0,00	0,00
Pantanal	4.575,11	-100,00	-100,00	-100,00
Total	2.046.159,93	-99,97	-99,99	-99,99
SSP585				
Amazônia	214.553,21	-99,96	-99,98	-100,00
Caatinga	845.788,48	-100,00	-100,00	-100,00
Cerrado	924.671,20	-100,00	-100,00	-100,00
Mata Atlântica	56.570,93	-99,73	-99,85	-99,85
Pampa	0,00	0,00	0,00	0,00
Pantanal	4.575,11	-100,00	-100,00	-100,00
Total	2.046.159,93	-99,99	-99,99	-99,99
<i>Hymenaea martiana</i>				
SSP245				
Domínio	Atual (km²)	2041-2060	2061-2080	2081-2100
Amazônia	821.720,36	-93,83	-98,29	-99,59
Caatinga	851.512,79	-89,72	-92,51	-94,40
Cerrado	1.941.885,42	-86,36	91,89	-94,54
Mata Atlântica	587.847,60	-95,16	-95,28	-96,47
Pampa	0,00	0,00	0,00	0,00
Pantanal	133.241,99	-84,59	-94,60	-97,27
Total	4.366.208,16	-89,57	-93,77	-95,82

SSP585				
Amazônia	821.720,36	-98,37	-99,99	-100,00
Caatinga	851.512,79	-92,37	-97,00	-99,55
Cerrado	1.941.885,42	-91,41	-98,02	-99,86
Mata Atlântica	587.847,60	-95,67	-97,67	-99,70
Pampa	0,00	0,00	0,00	0,00
Pantanal	133.241,99	-92,74	-100,00	-100,00
Total	4.366.208,16	-93,54	-98,21	-99,81
<i>Hymenaea parvifolia</i>				
SSP245				
Domínio	Atual (km²)	2041-2060	2061-2080	2081-2100
Amazônia	3.424.611,80	-31,49	-30,89	-31,05
Caatinga	131.355,57	-98,83	-98,91	-99,03
Cerrado	1.130.486,17	-86,38	-87,75	-89,60
Mata Atlântica	42.065,00	-14,23	-7,37	-18,40
Pampa	0,00	0,00	0,00	0,00
Pantanal	14.086,20	-49,24	-53,43	-58,12
Total	4.745.605,73	-46,34	-46,19	-46,87
SSP585				
Amazônia	3.424.611,80	-31,86	-38,05	-62,81
Caatinga	131.355,57	-99,11	-99,39	-99,79
Cerrado	1.130.486,17	-87,97	-92,19	-96,68
Mata Atlântica	42.065,00	-22,73	-25,10	-41,08
Pampa	0,00	0,00	0,00	0,00
Pantanal	14.086,20	-53,68	-86,85	-100,00
Total	4.745.605,73	-47,09	-52,72	-71,84
<i>Hymenaea stigonocarpa</i>				
SSP245				
Domínio	Atual (km²)	2041-2060	2061-2080	2081-2100
Amazônia	1.558.725,26	-43,81	-54,60	-70,85
Caatinga	820.376,01	-49,63	-57,12	-63,82
Cerrado	2.060.252,87	-29,68	-39,42	-47,77
Mata Atlântica	705.629,62	-61,01	-59,51	-64,32
Pampa	0,00	0,00	0,00	0,00
Pantanal	149.894,53	-11,15	-23,65	-27,12
Total	5.294.878,29	-40,57	-48,86	-58,67
SSP585				
Amazônia	1.558.725,26	-57,58	-90,86	-99,96
Caatinga	820.376,01	-58,31	-76,41	-93,02
Cerrado	2.060.252,87	-38,47	-66,84	-93,90
Mata Atlântica	705.629,62	-61,17	-68,36	-87,87
Pampa	0,00	0,00	0,00	0,00
Pantanal	149.894,53	-22,70	-52,12	-98,89
Total	5.294.878,29	-49,73	-75,17	-94,89

As projeções da mudança climática indicam uma tendência de retração significativa da adequabilidade ambiental das espécies do gênero *Hymenaea* ao longo do século XXI, especialmente nos cenários mais pessimistas. Resultados semelhantes foram observados por Capucho et al. (2025), ao modelarem a distribuição potencial de *Manilkara huberi*, espécie amazônica de importância ecológica e socioeconômica. Assim como neste estudo, os autores identificaram perdas expressivas de áreas ambientalmente favoráveis nos cenários SSP585, com preservação limitada de refúgios climáticos em estados como o Amazonas e o Acre. Essa convergência de resultados reforça a robustez dos modelos e a urgência de ações de conservação direcionadas.

No presente estudo, *H. eriogyne* e *H. martiana* destacaram-se como as espécies mais sensíveis às alterações climáticas, com perdas superiores a 90% em todos os biomas até 2100, enquanto *H. aurea* e *H. courbaril* apresentaram maior resiliência relativa. Contudo, mesmo essas últimas registram declínios importantes sob SSP5-8.5. É relevante observar que os modelos se baseiam apenas em condições ambientais, desconsiderando fatores antrópicos, como o desmatamento, que podem reduzir ainda mais a área de ocorrência real das espécies. Capucho et al. (2025) demonstraram que a exclusão de áreas desmatadas resultou em reduções adicionais significativas nos modelos de distribuição, o que sugere que os cenários projetados aqui para *Hymenaea* podem ser

conservadores diante do atual ritmo de degradação dos biomas brasileiros.

Dessa forma, a conservação das espécies de jatobá exige uma abordagem integrada que vá além da modelagem climática. Estratégias como a criação de corredores ecológicos, a restauração florestal e o fortalecimento de viveiros florestais regionais são fundamentais para garantir a conectividade e a regeneração das populações. Além disso, ações *ex situ*, como bancos de sementes e coleções vivas, devem ser priorizadas, especialmente para espécies com distribuição restrita ou alto valor socioeconômico. Gonçalves et al. (2023) e Morais et al. (2024) destacam, ainda, a importância de integrar o conhecimento tradicional ao planejamento da conservação, promovendo sinergias entre comunidades locais e pesquisadores para a manutenção de espécies nativas diante da mudança climática global.

Os modelos climáticos indicam que espécies adaptadas a climas mais secos, como *H. stigonocarpa*, *H. parvifolia* e *H. martiana*, podem sofrer perdas significativas de habitat, principalmente no cenário mais pessimista (SSP585) (IPCC, 2022). No entanto, as espécies como *H. courbaril* e *H. aurea*, mais associadas a ambientes úmidos, tendem a apresentar maior adequabilidade ambiental na Amazônia. Essa diferença pode ser atribuída às preferências ecológicas dessas espécies, conforme observado em estudos anteriores que relacionam a distribuição das leguminosas ao regime de chuvas e à composição do solo (PALOMO-KUMUL et al., 2021).

As variáveis climáticas mais determinantes para a distribuição das espécies foram a temperatura mínima no mês mais frio (Bio6), a sazonalidade da precipitação (Bio15) e o estoque de carbono orgânico no solo (ocs30). A temperatura mínima no mês mais frio impacta processos fisiológicos essenciais das plantas, como a fotossíntese e a respiração (FREITAS; MARTINS, 2019), enquanto a sazonalidade da precipitação influencia diretamente a sobrevivência em períodos de seca (HE et al., 2024). O estoque de carbono orgânico do solo desempenha papel fundamental na retenção de água e na fertilidade, impactando a distribuição das espécies (FREITAS; MARTINS, 2019; ARRUDA et al., 2023).

Os impactos da mudança climática na distribuição das espécies estudadas reforçam a necessidade de estratégias de conservação específicas para cada domínio. O Cerrado e a Caatinga são particularmente vulneráveis, pois apresentam maior redução das áreas de adequabilidade ambiental, enquanto a Amazônia permanece um refúgio para algumas espécies. No cenário SSP585, a projeção indica perda superior a 70% das áreas de ocorrência para a maioria das espécies, o que indica risco de extinção local.

Além do impacto ecológico, a perda dessas espécies pode acarretar consequências socioeconômicas significativas, especialmente para comunidades locais que dependem de espécies do gênero *Hymenaea* para a produção de alimentos, madeira e medicina popular (SANTOS et al., 2024; RODRIGUES et al., 2021). Nesse sentido, é fundamental priorizar a conservação de *H. parvifolia* e *H. courbaril*, devido à sua relevância econômica e ampla distribuição.

Os dados apresentados evidenciam a urgência de implementar estratégias de conservação e de manejo sustentável, especialmente nos domínios da Amazônia, do Cerrado e da Caatinga. Além da criação de novas unidades de conservação, é necessário reforçar a fiscalização contra o desmatamento ilegal, que continua sendo o principal vetor de perda de biodiversidade no Brasil (ARRUDA et al., 2023). A

integração entre políticas de conservação e de uso sustentável dos recursos naturais pode garantir a manutenção dessas espécies no longo prazo, minimizando os impactos da mudança climática sobre a flora brasileira.

5. CONCLUSÕES

As espécies *Hymenaea stigonocarpa*, *H. parvifolia*, *H. martiana*, *H. eriogyne*, *H. courbaril* e *H. aurea* apresentam ampla distribuição nos domínios fitogeográficos brasileiros, com maior concentração de adequabilidade ambiental nas regiões da Amazônia, do Cerrado e da Caatinga. Esses biomas configuram-se como áreas-chave de ocorrência do gênero, evidenciando sua relevância para a conservação atual da diversidade ecológica e funcional das espécies.

Projeções climáticas indicam uma redução progressiva das áreas ambientalmente adequadas para o gênero *Hymenaea*, mesmo em cenários menos pessimistas, com perdas mais acentuadas em condições extremas. Destaca-se a necessidade de priorizar estratégias de conservação *in situ* em áreas dos biomas que evidenciam adequabilidade climática para todas as espécies do gênero, e estratégias de conservação *ex situ*, com amostragem da variabilidade genética oriunda de áreas de extinção das populações naturais, principalmente para as espécies com maior risco de extinção, como *H. stigonocarpa*, *H. martiana* e *H. eriogyne*.

6. REFERÊNCIAS

- AKSOY, Ö. K. Predicting the Potential Distribution Area of the *Platanus orientalis* L. in Turkey Today and in the Future. **Sustainability**, v. 14, n. 18, e11706, 2022. <https://doi.org/10.3390/su141811706>
- ANDRADE, A. F. A.; VELAZCO, S. J. E.; DE MARCO, P. ENMTML: an R package for a straightforward construction of complex ecological niche models. **Environmental Modelling & Software**, v. 125, e104615, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104615>
- ARRUDA, D. M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FONSECA, R. S.; FERNANDES-FILHO, E. I.; VELOSO, G. V.; GOMES, L. C.; CORRÊA, G. R.; ESPÍRITO-SANTO, M. M.; OLIVEIRA, G. C.; SOLAR, R. R. C. Vegetações amazônicas e terras indígenas ameaçadas pelas próximas mudanças climáticas: Previsão de impacto nos biomas brasileiros. **Austral Ecology**, v. 48, n. 1, e13394, 2023. <https://doi.org/10.1111/aec.13394>
- BALDRIAN, P.; LÓPEZ-MONDÉJAR, R.; KOHOUT, P. Forest microbiome and global change. **Nature Reviews Microbiology**, v. 21, n. 8, p. 487-501, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00876-4>
- BEGOVIĆ, K.; RYDAL, M.; MIKAC, S.; CUPIC, S.; SVOBODA, K.; MIKOLAS, M.; KOZAK, D.; FRANKOVIC, M.; PAVLIN, J.; LANGBEHN, T.; SVOBODA, M. Climate-growth relationships of Norway Spruce and silver fir in primary forests of the Croatian Dinaric mountains. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 288-289, e108000, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108000>
- BORTOLOTTTO, I. M.; DE SOUZA, P. R.; POTT, A.; DAMASCENO-JUNIOR, G. A. Wild Food plants of the Pantanal: past, present, and future. In: DAMASCENO-JUNIOR, G. A.; POTT, A. (Eds.). **Flora and Vegetation of the Pantanal Wetland**. Plant and

- Vegetation**, v. 18. Springer, Cham. p. 689-738, 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83375-6_19
- BRANDÃO, D. O.; ARIEIRA, J.; NOBRE, C. A. Pathways from Deforestation to Restoration: The science is clear: rehabilitating the Amazon rainforest is essential to mitigating climate change and reversing biodiversity loss. Indigenous knowledge must play a central role. **NACLA Report on the Americas**, v. 55, n. 2, p. 124-131, 2023. <https://doi.org/10.1080/10714839.2023.2213052>
- CAPUCHO, H. L. V.; BEZERRA, C. S.; TOMAZ, J. S.; SOUZA, S. F.; LOPES, R.; RAMOS, S. L. F.; LOPES, M. T. G. L. Modelagem de nicho ecológico para conservação de *Manilkara huberi* (Ducke) A. Chev. em cenários de mudanças climáticas. **Nativa**, v. 13, p. 144-155, 2025. <https://doi.org/10.31413/nat.v13i1.18574>
- CARRILLO-GARCÍA, C.; GIROLA-INGLESIAS, L.; GUIJARRO, M.; HERNANDO, C.; MADRIGAL, J.; MATEO, R. G. Ecological niche models applied to post-megafire vegetation restoration in the context of climate change. **Science of the Total Environment**, v. 855, e158858, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158858>
- CORDEIRO, A. L.; TOMAZ, J. S.; BEZERRA, C. S.; MENESES, C. H. S. G.; AGUIAR, A. V.; WREGE, M. S.; RAMOS, S. L. F. R.; LOPES, R.; FRAXE, T. J. P.; LOPES, M. T. G. Prediction of the geographic distribution and conservation of Amazonian palm trees *Astrocaryum acule* Mart. and *Astrocaryum aculeatum* Mart. **Revista Árvore**, v. 47, e4719, 2023. <https://doi.org/10.1590/1806-908820230000019>
- CORRÊA, J. J. L.; ALMEIDA, T. E.; SANTOS, M. R. P.; GIACOMOIN, L. L. Assigning a value to standing forest: a historical review of the use and characterization of copal resin in the region of Santarém, Central Amazonia. **Rodriguésia**, v. 73, e00892021, 2022. <https://doi.org/10.1590/2175-7860202273074>
- CRUZ, J. E. R.; GUIMARÃES, I. I. S. M.; ALMEIDA, K. C.; AMÂNCIO, N. F. G. Antifungal and antibacterial activities of the medicinal plant jatobá (*Hymenaea courbaril* Linnaeus) occurring in the Brazilian cerrado: a review. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 1, e22612139812, 2023. <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i1.39812>
- FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. WorldClim 2: new 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 12, p. 4302-4315, 2017. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- FIELDING, A. H.; BELL, J. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. **Environmental Conservation. Cambridge University Press**, v. 24, n. 1, p. 38-49, 1997. <https://doi.org/10.1017/S0376892997000088>
- FIRPO, M. A. F.; GUIMARÃES, B. S.; DANTAS, L. G.; DA SILVA, M. G. B.; ALVEZ, L. M.; CHADWICK, R.; LLOPART, M. P.; DE OLIVEIRA, G. S. Assessment of CPIP6 models' performance in simulating present-day climate in Brazil. **Frontiers in Climate**, v. 4, e948499, 2022. <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.948499>
- FREITAS, C. H.; MARTINS, F. B. Thermal requirements and photoperiod influence in the leaf development of two forest species. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 4, e1319, 2019. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.001319>
- GONÇALVES, G. S. R.; CERQUEIRA, P. V.; SILVA, D. P.; GOMES, L. B.; LEÃO, C. F.; ANDRADE, A.; SANTOS, M. P. D. Multi-temporal ecological niche modeling for bird conservation in the face of climate change scenarios in Caatinga, Brazil. **PeerJ**, v. 11, e14882, 2023. <https://doi.org/10.7717/peerj.14882>
- HE, J.; LU, K.; FOSU, B.; FUEGLISTALER, S. A. Diverging hydrological sensitivity among tropical basins. **Nature Climate Change**, v. 14, n. 6, p. 623-628, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41558-024-01982-8>
- IPCC_Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2023: Synthesis Report**. 2023. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf. Acesso em: 05 de janeiro de 2025.
- LARSON, J.; VIGREN, C.; WALLERMAN, J.; ÅGREN, A. M.; APPIAH MENSAH, A.; LAUDON, H. Tree growth potential and its relationship with soil moisture conditions across a heterogeneous boreal forest landscape. **Scientific Reports**, v. 14, n. 5, e10611, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61098-z>
- LEROY, B.; DELSOL, R.; HUGUENY, B.; MEYNARD, C. N.; BARHOUMI, C.; BARBET-MASSIN, M.; BELLARD, C. Without quality presence-absence data, discrimination metrics such as TSS can be misleading measures of model performance. **Journal of Biogeography**, v. 45, n. 9, p. 1994-2002, 2018. <https://doi.org/10.1111/jbi.13402>
- MARQUES, M. J.; BEZERRA, C. S.; TOMAZ, J. S.; LOPES, R.; WREGE, M. S.; AGUIAR, A. V.; RAMOS, S. L. F.; MENESES, C. H. S. G.; FRAXE, T. DE J. P.; LOPES, M. T. G. Prediction of geographic distribution and ecological niche modeling of açaí palm trees in the Amazon. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 54, e78108, 2024. <https://doi.org/10.1590/1983-40632024v5478108>
- MORAIS, I. L. L.; LIMA, A. A.; SANTOS, I. N. L.; MENESES, C.; SILVA, R. F.; LOPES, R.; RAMOS, S. L. F.; AGUIAR, A. V.; WREGE, M. S.; LOPES, M. T. G. Climate Change Impact on the Distribution of Forest Species in the Brazilian Amazon. **Sustainability**, v. 16, n. 8, e3458, 2024. <https://doi.org/10.3390/su16083458>
- PALOMO-KUMUL, J.; VALDEZ-HERNÁNDEZ, M.; ISLEBE, G. A.; CACH-PÉREZ, M. J.; ANDRADE, J. L. El Niño-Southern Oscillation affects the water relations of tree species in the Yucatan Peninsula, Mexico. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89835-8>
- PINHO, B. X.; PERES, C. A.; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. Critical role and collapse of tropical mega-trees: A key global resource. **Advances in Ecological Research**, v. 62, p. 253-294, 2020. <https://doi.org/10.1016/bs.aecr.2020.01.009>
- RODRIGUES, L. J.; JÚNIOR, A. F. M.; MANVAILER, L. P.; CARDOSO, M. P.; FROTA, O. P. Óleos, plantas e frutas do bioma Cerrado utilizados na alimentação humana. **Perspectivas Experimentais e Clínicas, Inovações Biomédicas e Educação em Saúde**, v. 7, n. 1, p. 2-12, 2021. <https://doi.org/10.55028/pecibes.v7i1.13318>
- SANTOS, L. S.; PIMENTEL, R. M. M.; LEMOS, J. R.; ANDRADE, I. M. Contribuições das plantas para comunidades locais e tradicionais no Delta do Parnaíba,

- Brasil: uma revisão. **Hoehnea**, v. 51, e192022, 2024. <https://doi.org/10.1590/2236-8906e192022>
- TOMAZ, J. S.; BEZERRA, C. de S.; AGUIAR, A. V. de; WREGE, M. S.; LOPES, M. T. G. Predição da distribuição natural, do habitat e da conservação de *Stryphnodendron pulcherrimum* (Willd.) Hochr. frente às mudanças climáticas globais. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 52, e72422, 2022. <https://doi.org/10.1590/1983-40632022v5272422>
- VACEK, Z.; VACEK, S.; CUKOR, J. European forests under global climate change: Review of tree growth processes, crises and management strategies. **Journal of Environmental Management**, v. 332, e117353, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117353>
- VELAZCO, S. J. E.; GALVAO, F.; VILLALOBOS, F.; DE MARCO JUNIOR, P. Using worldwide edaphic data to model plant species niches: An assessment at a continental extent. **Plos One**, v. 12, n. 10, e0186025, 2017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186025>
- WICKHAM, H.; WICKHAM, M. H. **Package tidyverse. Easily install and load the “Tidyverse”**. 2017. Disponível em: <https://www.tidyverse.org>. Acessado em 10 fev. 2025.
- WORLD SOIL INFORMATION (ISRIC). **SoilGrids — global gridded soil information**. Disponível em: <https://www.isric.org/explore/soilgrids>. Acessado em: 6 jan. 2025.

Agradecimentos: Agradecimentos à FAPEAM, que financiou a bolsa da primeira autora, e os autores também desejam agradecer ao CNPq por fornecer a bolsa de produtividade em pesquisa que permitiu completar esta pesquisa: Carlos Henrique Salvino Gadelha Meneses (Processo nº 306943/2025-5); Santiago Linorio Ferreyra Ramos (Processo nº 305280/2022-8); Ricardo Lopes (Processo nº 308815/2023-8); e Maria Teresa Gomes Lopes (Processo nº 306943/2025-5) e ao auxílio do Edital PROCAD-SPCF (Processo nº 88881.516217/2020-01).

Contribuições dos autores: T.T.T.; M.T.G.L.; C.S.B.; J.S.T.; S.F.S.; H.L.V.C.; F.C.B.: conceitualização, metodologia, investigação, coleta dos dados, redação (original), redação (revisão e edição); S.F.S.; F.C.B.; S.L.F.R.; H.L.V.C.: análise estatística; validação; T.T.T.; C.S.B.; J.S.T.: redação original; R.L.; S.L.F.R.; C.H.S.G.M.; C.S.B.; J.S.T.; M.T.G.L.: conceitualização, validação, redação (revisão e edição) e supervisão; M.T.G.L.; R.L.; S.L.F.R.; C.H.S.G.M.: recursos financeiros. Todos os autores leram e aprovaram a versão publicada do manuscrito.

Disponibilidade de dados: Os dados desta pesquisa poderão ser obtidos por e-mail, mediante solicitação ao autor correspondente ou ao primeiro autor.

Conflito de interesses: Os autores declaram não haver conflito de interesses.



Copyright: © 2026 by the authors. This article is an Open-Access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons **Attribution-NonCommercial (CC BY-NC)** license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).