



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO - CIÊNCIAS DO AMBIENTE E
SUSTENTABILIDADE NA AMAZÔNIA

**IMPACTOS DA MUDANÇA CLIMÁTICA NA DISTRIBUIÇÃO DE ESPÉCIES
DE JATOBÁ NO BRASIL**

TAIS TIYOKO TOKUSATO

Manaus – Amazonas
2025

TAIS TIYOKO TOKUSATO

**IMPACTOS DA MUDANÇA CLIMÁTICA NA DISTRIBUIÇÃO DE ESPÉCIES
DE JATOBÁ NO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia da Universidade Federal do Amazonas, como requisito para o título de mestre na área de concentração de Conservação da Natureza.

Orientadora: Dra. Maria Teresa Gomes Lopes

Coorientadora: Dra. Caroline de Souza Bezerra

Manaus – Amazonas

2025

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

T646i Tokusato, Tais Tiyoko
Impactos da mudança climática na distribuição de espécies de jatobá no Brasil / Tais Tiyoko Tokusato . 2025
63 f.: il. color; 31 cm.

Orientadora: Maria Teresa Gomes Lopes
Coorientadora: Caroline de Souza Bezerra
Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Conservação de recursos genéticos. 2. Modelagem ecológica.
3. Adequabilidade ambiental. 4. Espécies vulneráveis. I. Lopes, Maria Teresa Gomes. II. Universidade Federal do Amazonas III.
Título

TAIS TIYOKO TOKUSATO

IMPACTOS DA MUDANÇA CLIMÁTICA NA DISTRIBUIÇÃO DE ESPÉCIES DE JATOBÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia da Universidade Federal do Amazonas, como requisito para o título de mestre na área de concentração de Conservação da Natureza.

Aprovado em: 14 de fevereiro de 2025

BANCA EXAMINADORA:

Prof.^a. Dr.^a. Maria Teresa Gomes Lopes, Presidente
Universidade Federal do Amazonas

Dra. Jennifer Souza Tomaz
Universidade Federal do Amazonas

Prof.^o. Dr.^o. Carlos Augusto da Silva, Membro
Universidade Federal do Amazonas

Dra. Suelen Cristina de Sousa Lima
Universidade Federal do Amazonas

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar ao Dr. Daisaku Ikeda, meu mestre que me incentivou a sempre buscar meus sonhos; A minha família, que por mais irreal que parecesse, sempre acreditou e apoio a busca pelos meus sonhos. Aos meus amigos, que se tornaram a minha família em outros lugares, por fazerem a realidade da vida ser mais feliz.

A minha orientadora por me direcionar, apoiar e buscar sempre o melhor para o projeto. A minha coorientadora, pelo apoio e zelo. Aos companheiros do laboratório de Melhoramento Genético da UFAM por me ensinarem tanto. Aos colegas e professores do PPG-CASA, por viverem esta trajetória de forma tão única juntos.

Por fim, agradeço ao meu companheiro de vida, Felipe Mariano, por acima de tudo estar ao meu lado e me apoiar, principalmente emocionalmente. Sem você, este trabalho não estaria sendo finalizado.

Muito obrigada!

RESUMO

As mudanças climáticas, resultantes do aumento das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera, têm provocado alterações nos padrões climáticos globais, afetando significativamente os ecossistemas, particularmente na Amazônia, onde a biodiversidade enfrenta ameaças crescentes devido ao desmatamento e à degradação ambiental. Neste sentido, as espécies do gênero *Hymenaea* (*H. aurea*, *H. courbaril*, *H. erigyone*, *H. martiana*, *H. parvifolia* e *H. stigonocarpa*), apresentam grande relevância socioeconômica, sendo utilizadas para alimentação, produção de madeira e medicina popular, o que torna sua preservação crucial para comunidades locais. No entanto, alterações nos padrões climáticos podem comprometer áreas com adequação ambiental, reforçando a necessidade de estratégias de conservação e manejo sustentável. Diante desse cenário, compreender a distribuição atual e futura dessas espécies é fundamental para identificar possíveis perdas em áreas com adequação ambiental. O objetivo do trabalho é apresentar a modelagem da distribuição geográfica em cenários de mudança climática para espécies do gênero *Hymenaea*, com foco na conservação de recursos genéticos e no uso sustentável dessas espécies. Foram utilizadas 19 variáveis bioclimáticas e 14 edáficas para a modelagem de nicho ecológico nos domínios fitogeográficos brasileiros. A distribuição atual foi realizada com base no período de referência (2009-2019) e as projeções futuras avaliadas em dois cenários climáticos SSP (*Shared Socioeconomic Pathways*), SSP245 (menos pessimista) e SSP585 (mais pessimista), nos intervalos de tempo (2041-2060, 2061-2080 e 2081-2100). Os resultados indicam que essas espécies apresentam ampla distribuição nos domínios Amazônia, Cerrado e Caatinga, com alta adequabilidade ambiental nessas regiões. No entanto, as projeções para cenários climáticos futuros apontam uma redução significativa das áreas de ocorrência, especialmente sob o cenário mais extremo (SSP585), que prevê perdas progressivas ao longo do tempo. Em contraste, o cenário SSP245 apresenta menores reduções e taxas de variação mais estáveis. Diante desse panorama, recomenda-se a implementação de estratégias prioritárias de conservação nos domínios Amazônia, Cerrado e Caatinga, considerando a relevância ecológica, social e econômica das espécies do gênero *Hymenaea* nessas regiões. Além disso, destaca-se a necessidade de medidas específicas para a preservação de *H. parvifolia* e *H. courbaril*, dada sua importância para as comunidades locais.

Palavras-chave: Conservação de recursos genéticos, modelagem ecológica, adequabilidade ambiental, espécies vulneráveis.

ABSTRACT

Climate change, resulting from increased concentrations of greenhouse gases in the atmosphere, has caused alterations in global weather patterns, significantly affecting ecosystems, particularly in the Amazon, where biodiversity is facing increasing threats due to deforestation and environmental degradation. The species of the *Hymenaea* genus (*H. aurea*, *H. courbaril*, *H. erigone*, *H. martiana*, *H. parvifolia* and *H. stigonocarpa*) are of great socio-economic importance due to their use in food, wood production, and folk medicine. Their preservation is crucial for local communities. However, shifts in climate patterns can potentially compromise regions where these species thrive, underscoring the necessity for conservation and sustainable management strategies. In light of these concerns, a comprehensive understanding of the present and future distribution of these species is imperative to identify potential losses in suitable areas. The objective of this study is to present geographic distribution modelling under climate change scenarios for species of the *Hymenaea* genus, with a particular emphasis on the conservation of genetic resources and the sustainable utilization of these species. To this end, nineteen bioclimatic and 14 edaphic variables were employed in the ecological niche modelling of Brazilian phytogeographic domains. The present distribution was based on the reference period (2009-2019), and future projections were evaluated in two SSP (Shared Socioeconomic Pathways) climate scenarios, SSP245 (least pessimistic) and SSP585 (most pessimistic), in the time intervals (2041-2060, 2061-2080, and 2081-2100). The findings suggest that these species exhibit a substantial distribution across the Amazon, Cerrado, and Caatinga domains, exhibiting optimal environmental conditions within these regions. However, projections for future climate scenarios indicate a substantial decline in their areas of occurrence, particularly under the most extreme scenario (SSP585), which predicts progressive losses over time. In contrast, the SSP245 scenario demonstrates smaller reductions and more stable rates of change. In light of these projections, it is imperative to implement priority conservation strategies within the Amazon, Cerrado, and Caatinga domains, acknowledging the ecological, social, and economic significance of species belonging to the *Hymenaea* genus in these regions. Specific measures must be devised to ensure

the preservation of *H. parvifolia* and *H. courbaril*, given their cultural and economic importance to local communities.

Key words: Conservation of genetic resources, ecological modeling, environmental suitability, vulnerable species.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Áreas críticas de desmatamento no Brasil no ano de 2023. Fonte: MapBiomas, 2024.	15
Figura 2. Unidades de conservação do Brasil. Fonte: Silva, 2019.	16
Figura 3. Pontos de ocorrência restritos aos domínios fitogeográficos brasileiros após análise de colinearidade e redução espacial das espécies de jatobá (<i>H. stigonocarpa</i> , <i>H. parvifolia</i> , <i>H. martiana</i> , <i>H. eriogyne</i> , <i>H. courbaril</i> e <i>H. aurea</i>).30	
Figura 4. Variância acumulada explicada pelos Componentes Principais obtidos na Análise de Componentes Principais (PCA). O eixo x representa os componentes principais (CPs), e o eixo y mostra a variância acumulada explicada por cada componente.....	31
Figura 5. Projeção referente ao período presente (2009-2019) para as espécies de jatobá (<i>H. stigonocarpa</i> , <i>H. parvifolia</i> , <i>H. martiana</i> , <i>H. eriogyne</i> , <i>H. courbaril</i> e <i>H. aurea</i>).	36
Figura 6. Projeção da adequabilidade ambiental no cenário menos pessimista SSP245 no intervalo de tempo 2041-2060 para as espécies de jatobá (<i>H. stigonocarpa</i> , <i>H. parvifolia</i> , <i>H. martiana</i> , <i>H. eriogyne</i> , <i>H. courbaril</i> e <i>H. aurea</i>).37	
Figura 7. Projeção da adequabilidade ambiental no cenário menos pessimista SSP245 nos intervalos de tempo 2061-2080 para as espécies de jatobá (<i>H. stigonocarpa</i> , <i>H. parvifolia</i> , <i>H. martiana</i> , <i>H. eriogyne</i> , <i>H. courbaril</i> e <i>H. aurea</i>).38	
Figura 8. Projeção da adequabilidade ambiental no cenário menos pessimista SSP245 no intervalo de tempo 2081-2100 para as espécies de jatobá (<i>H. stigonocarpa</i> , <i>H. parvifolia</i> , <i>H. martiana</i> , <i>H. eriogyne</i> , <i>H. courbaril</i> e <i>H. aurea</i>).39	
Figura 9. Projeção da adequabilidade ambiental no cenário mais pessimista SSP585 no intervalo de tempo 2041-2060 para as espécies de jatobá (<i>H. stigonocarpa</i> , <i>H. parvifolia</i> , <i>H. martiana</i> , <i>H. eriogyne</i> , <i>H. courbaril</i> e <i>H. aurea</i>).40	
Figura 10. Projeção da adequabilidade ambiental no cenário mais pessimista SSP585 no intervalo de tempo 2061-2080 para as espécies de jatobá (<i>H. stigonocarpa</i> , <i>H. parvifolia</i> , <i>H. martiana</i> , <i>H. eriogyne</i> , <i>H. courbaril</i> e <i>H. aurea</i>).41	
Figura 11. Projeção da adequabilidade ambiental no cenário mais pessimista SSP585 no intervalo de tempo 2081-2100 para as espécies de jatobá (<i>H. stigonocarpa</i> , <i>H. parvifolia</i> , <i>H. martiana</i> , <i>H. eriogyne</i> , <i>H. courbaril</i> e <i>H. aurea</i>).42	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Variáveis bioclimáticas (Bio) utilizadas na modelagem de predição de ocorrência das espécies do gênero <i>Hymenaea</i> (<i>H. stigonocarpa</i> , <i>H. parvifolia</i> , <i>H. martiana</i> , <i>H. eriogyne</i> , <i>H. courbaril</i> e <i>H. aurea</i>) com o código e sua variável correspondente.	25
Tabela 2 Valores de autovetores dos seis componentes principais (PC) das variáveis bioclimáticas e edáficas utilizados no processo de modelagem de nicho ecológico das espécies	32
Tabela 3. Variáveis indicadoras e desvio padrão (DP) para validação de seis modelos para a predição da área potencial de ocorrência das espécies de jatobá	34
Tabela 4. Projeções de acréscimo (+) ou perda (–) 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.	43

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. Valores de autovetores dos nove componentes principais (PC) das variáveis bioclimáticas e edáficas utilizados no processo de modelagem de nicho ecológico das espécies.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
2.	OBJETIVOS	13
2.1.	Objetivo geral:	13
2.2.	Objetivos específicos:	13
3.	REVISÃO DA LITERATURA.....	13
3.1.	As mudanças climáticas e seus efeitos na redução da cobertura vegetal 14	
3.2.	Desflorestamento e o efeito na redução da cobertura florestal	15
3.3.	Gênero <i>Hymenaea</i>	17
3.3.1.	<i>Hymenaea aurea</i> Y.T.Lee & Langenh.	18
3.3.2.	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	18
3.3.3.	<i>Hymenaea eriogyne</i> Benth.	19
3.3.4.	<i>Hymenaea martiana</i> Hayne	20
3.3.5.	<i>Hymenaea parvifolia</i> Huber	20
3.3.6.	<i>Hymenaea stigonocarpa</i> Mart. ex Hayne	21
3.3.7.	Uso e importância das espécies	22
3.4.	Modelagem de nicho ecológico e suas aplicações em espécies arbóreas 22	
4.	MATERIAL E MÉTODOS	24
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
6.	CONCLUSÕES	48
7.	REFERÊNCIAS	49
8.	ANEXOS	59

1. INTRODUÇÃO

Atividades antrópicas têm alterado a superfície do planeta ao longo dos anos, causando extenso impacto negativo no uso da terra e na cobertura do solo. O desmatamento e a alteração da cobertura do solo vinculadas a atividades industriais induziram uma mudança global, que abrange diversos fenômenos e processos que se intensificaram nos últimos anos (Baldrian *et al.*, 2023). Esta mudança global refere-se a alterações climáticas que têm se tornado uma questão primordial no século XXI, e que conforme diversos estudos publicados ao longo dos anos, são principalmente ocasionadas pelo efeito estufa. Além disso, tendem a se tornar cada vez mais intensas no futuro, de acordo com as tendências observadas na atualidade (IPPC, 2022; Vacek *et al.*, 2023).

Os fatores climáticos influenciam diretamente o crescimento das árvores e a produtividade das florestas, uma vez que modificam o desenvolvimento desses ecossistemas, alterando condições essenciais do *habitat* como a disponibilidade de água no solo, umidade do ar, temperatura do solo e do ar, e a duração da estação de crescimento. Dessa forma, assim como outros biomas, as florestas podem contribuir, bem como podem ser afetadas por esses processos (Vacek *et al.*, 2023). Entretanto, devido a sua complexidade, a resposta dos ecossistemas florestais às mudanças globais varia conforme o contexto e ainda há um conhecimento limitado sobre o funcionamento das florestas e de seus microrganismos sob futuras condições ambientais, contudo, essa compreensão é essencial para a aprimoração de modelos, orientação de manejos florestais e promoção da conservação de espécies vegetais (Baldrian & Kohout, 2023; Guégan *et al.*, 2023; Vacek *et al.*, 2023).

Dessa forma, é importante considerar como as mudanças climáticas podem afetar a distribuição potencial de espécies arbóreas, a fim de melhorar a sucessão natural delas. Para isso, a modelagem de nicho ecológica é considerada uma ferramenta amplamente aplicada para diversas áreas e desde os primeiros estudos sobre mudanças climáticas, os modelos de nicho ecológico (ENMs) têm ganhado destaque, sendo frequentemente empregados nas análises de vulnerabilidade de espécies vegetais às mudanças climáticas (Guisan *et al.*, 2017; Melo-Merino *et al.*, 2020; Tomaz *et al.*, 2022; Carrilo-García *et al.*, 2023).

Os modelos de nicho ecológico são realizados por meio da combinação de registros de ocorrência das espécies vegetais com variáveis ambientais (climáticas e edáficas), permitindo a representação espacial do nicho ecológico das espécies estudadas (Carrilo-García *et al.*, 2023). Uma das principais aplicações desses modelos é avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre a vegetação. As projeções resultantes são fundamentais para o planejamento do manejo e da conservação florestal, pois os modelos climáticos globais indicam que até o final deste século, ocorrerão transformações significativas no clima que resultarão em impactos negativos sobre os ecossistemas, especialmente os florestais e esta realidade já é evidenciada em diversas regiões (Babushkina *et al.*, 2020; Begović *et al.*, 2020; Vacek *et al.*, 2023).

Estudos demonstram que diversas espécies vegetais como o barbatimão, malva, açaí e tucumã são severamente afetadas pelas mudanças climáticas globais, podendo chegar até a extinção em cenários futuros (Tomaz *et al.*, 2022; Gomes *et al.*, 2023; Cordeiro *et al.*, 2023; Marques *et al.*, 2024). Todas essas espécies são de extrema importância para a região Amazônica e necessitam de atenção e estudos que visem sua conservação frente à essas alterações climáticas. Dentre outras espécies de espécies de interesse, destacam-se as pertencentes ao gênero *Hymenaea*, (*Hymenaea aurea* Y.T.Lee & Langenh, *Hymenaea courbaril* L., *Hymenaea erigyone* Beth., *Hymenaea martiana* Hayne, *Hymenaea parvifolia* Huber e *Hymenaea stigonocarpa* Mart. Ex Hayne), popularmente conhecidas como “jatobás”.

Essas espécies arbóreas da Amazônia desempenham um papel fundamental na manutenção do equilíbrio ecológico e na oferta de recursos para a biodiversidade, contribuem 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; Bortolotto *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 (Pacheco *et al.* 2021; Corrêa *et al.*, 2022; Cruz *et al.*, 2023; Souza *et al.*, 2025). 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 (Neves-Brandes et al., 2020; Brandão et al., 2023).

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

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral:

Predizer a distribuição geográfica atual e em cenários futuros de *H. aurea*, *H. courbaril*, *H. erigyone*, *H. martiana*, *H. parvifolia* e *H. stigonocarpa* no Brasil, visando a conservação dos recursos genéticos e seu uso sustentável.

2.2. Objetivos específicos:

- Analisar a distribuição potencial de *H. aurea*, *H. courbaril*, *H. erigyone*, *H. martiana*, *H. parvifolia* e *H. stigonocarpa* para o período de referência (2009-2019).
- Modelar a distribuição potencial de *H. aurea*, *H. courbaril*, *H. erigyone*, *H. martiana*, *H. parvifolia* e *H. stigonocarpa* sob diferentes cenários climáticos (SSP245 e SSP585) para os períodos 2041-2060, 2061-2080 e 2081-2100.
- Identificar as áreas com maior adequabilidade ambiental para conservação das espécies estudadas.
- Analisar a possível migração de biomas das espécies *H. aurea*, *H. courbaril*, *H. erigyone*, *H. martiana*, *H. parvifolia* e *H. stigonocarpa* nos cenários analisados.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. As mudanças climáticas e seus efeitos na redução da cobertura vegetal

As mudanças climáticas têm provocado impactos significativos na cobertura vegetal global, afetando a estrutura e a função dos ecossistemas terrestres (Albert *et al.*, 2023). O aumento das temperaturas médias e a alteração nos padrões de precipitação influenciam diretamente processos fisiológicos das plantas, como a fotossíntese e o crescimento, comprometendo a saúde e a distribuição das espécies vegetais (Lapola *et al.*, 2023).

A substituição de vegetação natural por áreas de cultivo e pastagens altera o clima regional e global por meio de processos biofísicos e biogeoquímicos (Caballero *et al.*, 2022). Essas mudanças na cobertura da superfície podem modificar o balanço de energia e o ciclo hidrológico, exacerbando os efeitos das mudanças climáticas (Dick *et al.*, 2022). Eventos climáticos extremos, como secas prolongadas e ondas de calor, têm se tornado mais frequentes e intensos, aumentando a vulnerabilidade das florestas a incêndios (Jones *et al.*, 2022). Estudos indicam que as emissões de CO₂ provenientes de incêndios em regiões boreais, onde essas proteção do solo e a manutenção dos ciclos hidrológicos, onde esses eventos eram menos comuns, triplicaram nas últimas duas décadas, evidenciando a influência das mudanças climáticas na dinâmica dos incêndios florestais (Zheng *et al.*, 2023).

A redução da cobertura vegetal acarreta perdas significativas na biodiversidade, afetando espécies que dependem desses habitats. Além disso, compromete serviços ecossistêmicos essenciais, como a regulação do clima, a proteção do solo e a manutenção dos ciclos hidrológicos (Roy *et al.*, 2022). Diante desses desafios, a restauração de florestas degradadas surge como uma estratégia promissora para mitigar os efeitos das mudanças climáticas. Evidências sugerem que a recuperação da cobertura florestal pode reverter impactos negativos, promovendo a regulação térmica e a retomada de padrões de precipitação mais equilibrados (Lian *et al.*, 2024).

As mudanças climáticas estão intrinsecamente ligadas à redução da cobertura vegetal, criando um ciclo de retroalimentação que intensifica os impactos ambientais. A implementação de estratégias de conservação e restauração florestal é crucial para preservar a integridade dos ecossistemas e assegurar a continuidade dos serviços ecossistêmicos fundamentais para a vida no planeta (Albert *et al.*, 2023).

3.2. Desflorestamento e o efeito na redução da cobertura florestal

De acordo com dados recentes, o Brasil se destaca globalmente pela vasta extensão de suas florestas, ocupando a segunda posição mundial, atrás apenas da Rússia, e liderando quando se consideram exclusivamente as florestas tropicais. No entanto, entre 2010 e 2015, o país sofreu perdas expressivas em sua cobertura florestal, refletindo os desafios enfrentados na conservação desses ecossistemas (Quintão *et al.*, 2021).

A redução da área de florestas no Brasil tem como principais causas: os incêndios, cortes de árvores para fins comerciais, degradação para utilização da agropecuária e fenômenos naturais (Silva, *et al.*, 2022). Segundo o MapBiomas (2024), o Brasil perdeu mais de 8.558.237 hectares de vegetação nativa nos últimos cinco anos. Em 2023, pela primeira vez, o Cerrado liderou o ranking de desmatamento, representando 61% do desmatamento do Brasil e, junto da Amazônia, somam mais de 85%, sendo 97% deste desmatamento causado pela expansão da agropecuária (Figura 1).

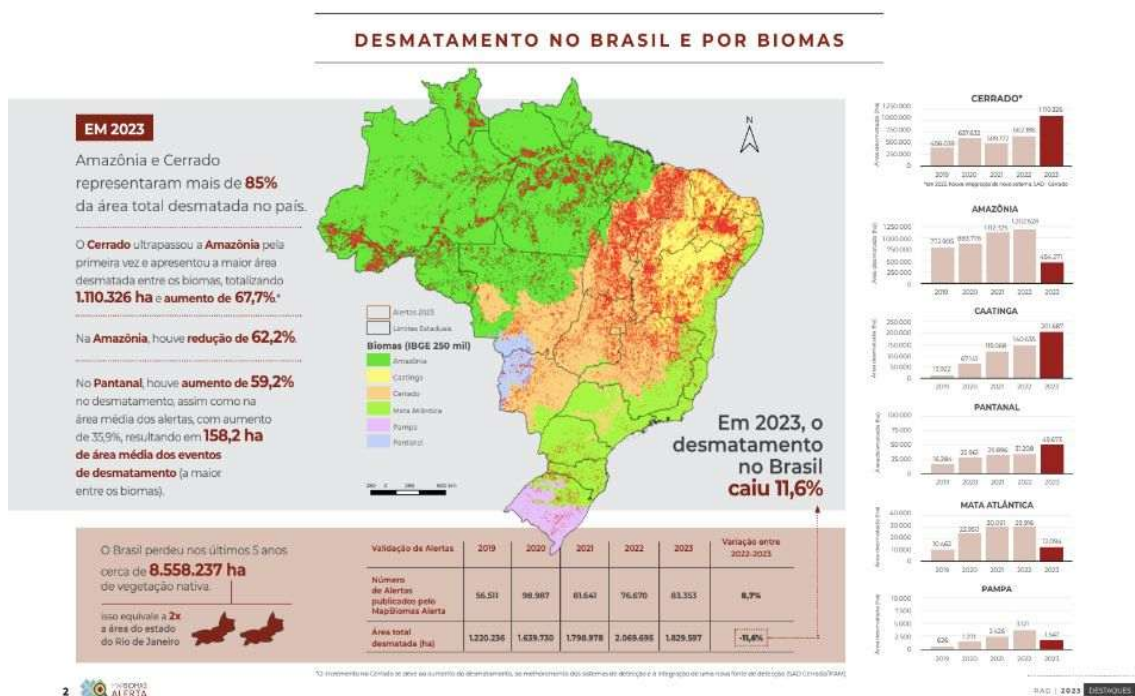


Figura 1. Áreas críticas de desmatamento no Brasil no ano de 2023. Fonte: MapBiomas, 2024.

A mudança no uso da terra contribui não apenas para o aquecimento global, tanto de forma direta quanto indireta, mas também para alterações no ciclo hidrológico causando grande impacto no escoamento superficial, temperatura e humidade (Brito *et al.*, 2020). De acordo com o Painel de Unidades de Conservação Brasileiras (2024), o Brasil possui 3.119 Unidades de Conservação (UC), que desempenham um papel fundamental na proteção dos biomas nacionais. Essas áreas protegidas abrangem 28,98% da Amazônia, 11,60% da Mata Atlântica, 9,56% da Caatinga, 9,36% do Cerrado, 4,66% do Pantanal e 3,04% do Pampa. A Amazônia concentra o maior número de UCs, destacando-se como a região com maior extensão de áreas protegidas (Figura 2).

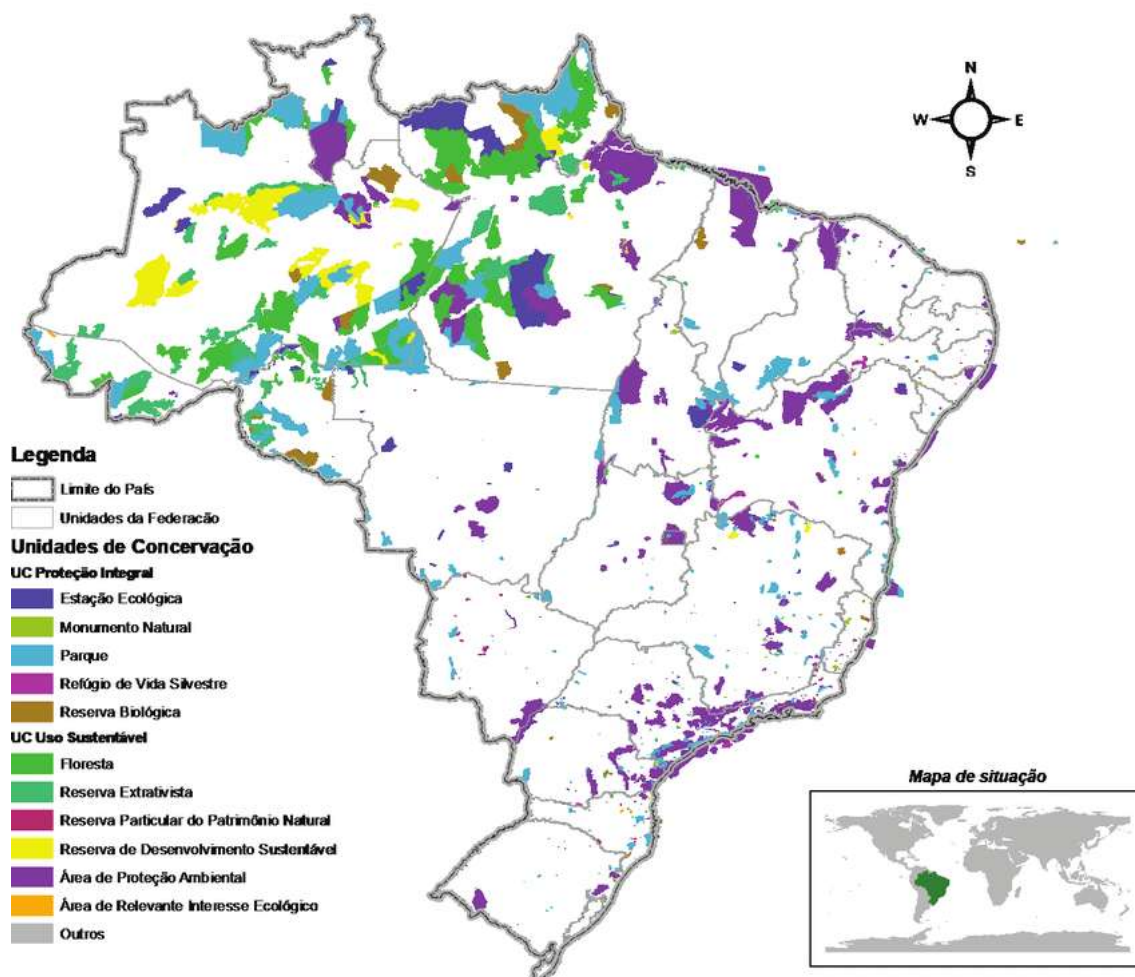


Figura 2. Unidades de conservação do Brasil. Fonte: Silva, 2019.

Segundo o MapBiomas (2024), apesar da redução em comparação ao ano anterior, mais de 96 mil hectares de vegetação nativa foram perdidos em Unidades de Conservação (UC) em 2023. O desmatamento em Terras Indígenas (TI) representou apenas 1,1% do total no país, enquanto os imóveis registrados no Cadastro Ambiental Rural (CAR) foram responsáveis por 89,1% da área desmatada. Dessa forma, estima-se que 93% do desmatamento ocorrido no Brasil apresente indícios de ilegalidade (MapBiomas, 2024).

3.3. Gênero *Hymenaea*

O gênero *Hymenaea* pertence à família Fabaceae (Leguminosae) e compreende 17 espécies distribuídas desde o México até a América do Sul, sendo amplamente reconhecido por seu valor ecológico, econômico e cultural. O Brasil abriga a maior diversidade do gênero, com 15 espécies registradas em todos os seus biomas, reforçando sua relevância na flora nacional (Souza & Funch, 2017). Popularmente conhecido como "jatobá", "jutaí", "jitaí" ou "jataúba", *Hymenaea* recebe diferentes denominações em países vizinhos, "algaborro" na Colômbia e Venezuela (Gibson *et al.*, 2022; Cysneiros *et al.*, 2018; CNCFlora, 2025; IPT, 2025). Sua ampla distribuição abrange diversos biomas, incluindo Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica e Pantanal, adaptando-se a diferentes condições ambientais e desempenhando um papel fundamental na manutenção da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos (Pinto & Mansano, 2024). O nome científico *Hymenaea* tem origem no grego "*hymen*", referência ao deus do casamento, devido à disposição pareada dos folíolos de suas folhas (Paleari, 2017). Já o termo "jatobá", de origem tupi, significa "fruto de casca dura", uma característica marcante das espécies do gênero (Benjamim *et al.*, 2020). Além de seu uso tradicional na medicina popular e na alimentação, as espécies de *Hymenaea* também são valorizadas pela madeira resistente, amplamente utilizada na construção civil e na marcenaria, e pela produção de resinas, como o âmbar, que possui aplicações industriais e farmacêuticas (Silva *et al.*, 2023).

Diante de sua importância ecológica e econômica, a conservação das espécies de *Hymenaea* é essencial, especialmente frente às crescentes ameaças do desmatamento e das mudanças climáticas, que podem comprometer a distribuição e a regeneração natural dessas árvores.

3.3.1. *Hymenaea aurea* Y.T.Lee & Langenh.

É uma árvore que ocorre predominantemente em áreas de floresta densa e úmida. Sua distribuição abrange os biomas da Amazônia e da Mata Atlântica, adaptando-se a solos férteis e bem drenados. É uma espécie que desempenha um papel fundamental na manutenção da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos da região (Pinto *et al.*, 2025). É uma espécie de grande porte, podendo atingir entre 3 e 40 metros de altura e diâmetro à altura do peito (DAP) de 50 a 60 centímetros. Apresenta casca espessa e rugosa, folhas compostas com folíolos coriáceos e alternados, flores pequenas e discretas, e frutos em vagens lenhosas que contêm sementes envoltas por uma polpa farinácea de coloração amarelada com dimensões médias de $6,8 \times 3,1 \times 2,6$ cm (Souza *et al.*, 2016).

O tronco possui ritidoma escamoso conferindo uma madeira densa e resistente, de alto valor comercial. Suas folhas são simples, elípticas a oblongas, com ambas as faces glabras e lustrosas. As inflorescências são do tipo cimoso, dicásio ou corimbo, e as flores, predominantemente douradas ou castanhas (Pinto *et al.*, 2024). Uma característica diagnóstica da espécie é a presença de densa pubescência dourada em ramos jovens, folhas novas, botões florais e flores (Souza *et al.*, 2016).

3.3.2. *Hymenaea courbaril* L.

Hymenaea courbaril, popularmente conhecida como “jatobá”, é uma árvore pertencente à família das Fabaceae, e encontra-se amplamente distribuída no Brasil, ocorrendo desde a Floresta Amazônica até as florestas estacionais e semidecíduais na região Sudeste. Sua distribuição abrange os biomas Amazônia, Mata Atlântica, Cerrado e Caatinga, com presença confirmada em diversos estados brasileiros, desde o Norte até o Sul do país (Filardi *et al.*, 2018). Pinto *et al.*, 2025). A espécie pode atingir até 20 metros de altura e apresenta tronco cilíndrico com até 1 metro de diâmetro. Suas folhas são compostas por dois folíolos coriáceos, medindo entre 6 e 10 cm de comprimento. As inflorescências ocorrem em panículas terminais, com flores de coloração branca a creme. Os frutos são vagens indeiscentes, achatadas e elipsoides, que medem de 5 a 15 cm de comprimento e contêm de 2 a 6 sementes envoltas por

uma polpa farinácea comestível e aromática (Sousa *et al.*, 2020; Pinto *et al.*, 2025).

A madeira do jatobá é altamente valorizada por sua durabilidade e resistência, sendo amplamente utilizada na construção civil e na fabricação de móveis. Seus frutos possuem grande valor nutricional e são consumidos tanto por humanos quanto por animais, especialmente roedores (Sousa *et al.*, 2020). A polpa farinácea é utilizada na produção de farinhas, doces e bebidas, enquanto suas sementes podem ser aproveitadas na alimentação ou na produção de óleos. Além disso, diversas partes da planta são empregadas na medicina popular para tratar afecções respiratórias e digestivas (Nunes *et al.*, 2022)

Do ponto de vista ecológico, *Hymenaea courbaril* desempenha um papel essencial na manutenção da biodiversidade, pois seus frutos servem como fonte de alimento para a fauna local. Sua conservação é fundamental para garantir a estabilidade dos ecossistemas onde ocorre, além de assegurar os benefícios econômicos e sociais que proporciona às populações locais. O manejo sustentável e iniciativas de reflorestamento são estratégias importantes para a preservação da espécie e o fortalecimento das comunidades que dela dependem (Nunes *et al.*, 2022; Scaramussa *et al.*, 2022).

3.3.3. *Hymenaea eriogyne* Benth.

Hymenaea eriogyne, popularmente conhecida como jatobá-de-vaqueiro, é uma espécie arbórea endêmica do Brasil, predominante nos biomas da Caatinga e Cerrado. Apresenta porte variando entre 1,5 e 12 metros de altura, com floração ocorrendo de outubro a março e frutificação de dezembro a outubro (Souza *et al.*, 2016). As folhas são compostas por folíolos de textura coriácea, e os ramos, folhas e frutos podem ser glabros ou recobertos por uma indumentária curta ou moderadamente longa. As inflorescências são cimeiras dicasiais, com flores de botões dourados e pétalas brancas. Os frutos possuem coloração amarelada e abrigam sementes de tom castanho-escuro (Pinto *et al.*, 2025).

Além de seu valor ecológico, *Hymenaea eriogyne* possui importância na medicina popular, sendo utilizada no tratamento de amenorreia (ausência de menstruação). A casca do caule é empregada na forma de chá para esse fim (Daniele-Silva *et al.*, 2024). A conservação dessa espécie é fundamental, considerando sua distribuição restrita e o papel que desempenha nos

ecossistemas da Caatinga e Cerrado. Estudos adicionais sobre sua ecologia, usos tradicionais e potenciais aplicações podem contribuir para estratégias de manejo sustentável e preservação.

3.3.4. *Hymenaea martiana* Hayne

Hymenaea martiana, popularmente conhecida como jatobá-da-mata, é uma espécie arbórea pertencente à família Fabaceae, típica dos biomas Cerrado e Caatinga. Sua distribuição abrange principalmente os estados do Nordeste brasileiro, além de Minas Gerais, Goiás e Tocantins. A espécie pode atingir alturas entre 8 e 18 metros, apresentando folhas compostas bi folioladas, flores brancas e frutos do tipo legume indeiscente. Devido à densidade de sua madeira, aproximadamente 0,95 g/cm³, é considerada pesada e adequada para uso na construção civil (Pinto *et al.*, 2025; Silva *et al.*, 2022).

Além de seu valor econômico, *Hymenaea martiana* possui relevância medicinal. Estudos indicam que extratos de suas folhas são utilizados na medicina popular para tratar processos inflamatórios, infecções bacterianas e para o tratamento de dor (Pacheco *et al.*, 2021). A espécie também é reconhecida por seu potencial ornamental, contribuindo para a composição paisagística de áreas verdes (Souza-Silva *et al.*, 2022).

A conservação de *Hymenaea martiana* é essencial, considerando sua importância ecológica e os benefícios que proporciona às comunidades locais. Práticas de manejo sustentável e estudos adicionais sobre suas propriedades podem auxiliar na preservação e no uso responsável dessa espécie.

3.3.5. *Hymenaea parvifolia* Huber

Hymenaea parvifolia, conhecida popularmente como “jutaí” ou “jutaí-mirim”, é uma espécie arbórea nativa da Bacia Amazônica, com distribuição registrada nos estados do Acre, Amazonas, Pará, Rondônia, Maranhão, Piauí e Mato Grosso (Pinto *et al.*, 2025). A espécie é de grande importância para a alimentação humana e animal, fornecendo frutos consumidos por diversas espécies da fauna local. Além disso, possui aplicações medicinais e sua madeira é valorizada no mercado madeireiro (Gibson *et al.*, 2022).

O tronco de *Hymenaea parvifolia* apresenta base reta e seção circular, com ritidoma de coloração esbranquiçada e fissurado. O alburno é branco,

caracterizado por estrias mais escuras. As folhas são compostas por folíolos coriáceos, brilhantes e glabros, com nervura central proeminente na face abaxial, nervuras secundárias discretamente imersas e ápice agudo (Ribeiro *et al.*, 2021).

A espécie é considerada vulnerável devido à exploração madeireira e à perda de habitat. Estudos indicam que, mesmo após décadas de exploração, *Hymenaea parvifolia* não recuperou plenamente sua abundância e volume originais, ressaltando a necessidade de práticas de manejo sustentável para sua conservação (Pinto *et al.*, 2020; Gibson *et al.*, 2022).

A conservação de *H. parvifolia* é essencial para manter a biodiversidade da Amazônia e assegurar os benefícios que proporciona às populações locais. Práticas de manejo sustentável e iniciativas de reflorestamento podem contribuir para a preservação dessa espécie e o fortalecimento das comunidades que dela dependem.

3.3.6. *Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne

Hymenaea stigonocarpa, popularmente conhecida como “jatobá-do-cerrado”, é uma espécie arbórea nativa do Brasil, com ocorrência predominante no bioma Cerrado, abrangendo as regiões Centro-Oeste e Sudeste do país. A árvore pode atingir até 12 metros de altura e é caracterizada por um crescimento lento. Apresenta madeira de alta densidade, aproximadamente 0,90 g/cm³, o que a torna adequada para uso na construção civil (Pinto *et al.*, 2025). A floração ocorre entre dezembro e fevereiro, enquanto a frutificação se dá de setembro a novembro. As sementes são grandes, cilíndricas e oblongas, envoltas por uma polpa farinácea de coloração amarelada, levemente adocicada, com sabor e aroma característicos (Pinto *et al.*, 2025).

Além de seu valor econômico, o jatobá-do-cerrado possui importância ecológica significativa. Suas flores fornecem néctar para polinizadores, como morcegos, e seus frutos servem de alimento para diversas espécies da fauna local. Na medicina popular, diferentes partes da planta são utilizadas como expectorante, estimulante de apetite, vermífugo e no tratamento de problemas respiratórios, estomacais, renais e urinários (Pimentel *et al.*, 2024).

A conservação do jatobá-do-cerrado é essencial para a manutenção da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos do Cerrado. Práticas de manejo sustentável e a valorização de seus múltiplos usos podem contribuir para a

preservação dessa espécie e o fortalecimento das comunidades que dela dependem (Gonzaga *et al.*, 2024).

3.3.7. Uso e importância das espécies

O gênero *Hymenaea* (Fabaceae), conhecido popularmente como jatobá, é amplamente distribuído na América do Sul e possui grande relevância ecológica, econômica e medicinal (Cruz *et al.*, 2023). Seu uso tradicional está associado à medicina popular, sendo empregado no tratamento de diversas condições de saúde, como inflamações, infecções e distúrbios respiratórios (Pacheco *et al.*, 2022). Estudos científicos confirmam suas propriedades antimicrobianas, anti-inflamatórias e antioxidantes, reforçando seu potencial terapêutico e a importância da investigação farmacológica de seus compostos bioativos (Daniele-Silva *et al.*, 2024).

Além do uso medicinal, o jatobá apresenta significativa importância econômica e ambiental. Sua madeira é altamente valorizada na construção civil e na fabricação de móveis devido à sua durabilidade e resistência (Silva *et al.*, 2022). Os frutos e sementes são utilizados na alimentação humana e animal, enquanto suas resinas possuem aplicações industriais, como na produção de vernizes e adesivos (Gibson *et al.*, 2022). No contexto ecológico, espécies do gênero *Hymenaea* são fundamentais para a manutenção da biodiversidade, desempenhando papel essencial na recuperação de áreas degradadas e na interação com a fauna local (Silva *et al.*, 2022).

Apesar de sua ampla utilização e dos benefícios comprovados, muitas espécies do gênero jatobá ainda carecem de estudos aprofundados sobre seus compostos bioativos e aplicações potenciais. Pesquisas futuras devem focar na exploração sustentável de seus recursos para garantir a conservação e o aproveitamento adequado desse valioso recurso natural (Cruz *et al.*, 2023).

3.4. Modelagem de nicho ecológico e suas aplicações em espécies arbóreas

A modelagem ecológica, também conhecida como modelagem de nicho ecológico ou modelagem de distribuição de espécies, baseia-se no conceito de nicho ecológico fundamental, que compreende um conjunto de condições ambientais que possibilitam a manutenção de populações viáveis (Dambrowski

& Merenzi, 2024). Essa abordagem permite estimar a distribuição potencial das espécies a partir de dados de ocorrência, variáveis ambientais e algoritmos específicos, possibilitando a geração de mapas preditivos de áreas adequadas para a presença da espécie em questão (Silva & Rocha, 2024).

A modelagem de nicho ecológico tem sido amplamente utilizada para analisar a adaptação e conservação de espécies vegetais, além de auxiliar na compreensão dos impactos das mudanças climáticas sobre a flora (Marques *et al.*, 2024; Gomes *et al.*, 2023). O método permite projetar distribuições geográficas com base em dados climáticos e edáficos, sendo essencial para inferir a distribuição futura das espécies e formular estratégias de conservação e manejo (Cordeiro *et al.*, 2023). No contexto brasileiro, a diversidade ambiental do país, que inclui grande variação de solos e climas, oferece condições ideais para a aplicação da modelagem ecológica na análise de distribuição de espécies vegetais (Almeida *et al.*, 2024).

A aplicação da modelagem preditiva permite identificar áreas adequadas para a conservação e o manejo sustentável de espécies, bem como avaliar a eficácia das áreas protegidas (Amaral *et al.*, 2021). Ademais, a ferramenta possibilita a seleção de espécies apropriadas para restauração ecológica e translocação, considerando as condições ambientais específicas para maximizar as chances de sucesso dessas iniciativas (Amaral *et al.*, 2021). Outra contribuição significativa dessa abordagem é a previsão de áreas suscetíveis à invasão biológica, permitindo a adoção de medidas preventivas e mitigadoras (Tomaz *et al.*, 2022).

A modelagem ecológica também tem um papel central na previsão dos impactos das mudanças climáticas sobre as espécies vegetais, possibilitando estimar alterações na distribuição geográfica e subsidiando estratégias de adaptação (Cordeiro *et al.*, 2023). Estudos apontam que as condições climáticas futuras podem modificar a disponibilidade de habitats adequados, reforçando a necessidade de pesquisas que integrem modelagem de nicho ecológico e planejamento de conservação (Amaral *et al.*, 2021).

A modelagem de distribuição de espécies tem demonstrado grande potencial para subsidiar políticas de conservação e manejo, fornecendo bases científicas para a delimitação de áreas prioritárias e a otimização de recursos na restauração ambiental (Silva & Rocha, 2024). Ao integrar diferentes fontes de

dados e metodologias computacionais, essa abordagem possibilita a compreensão mais abrangente dos padrões de distribuição das espécies e suas relações com o ambiente, tornando-se uma ferramenta indispensável para a gestão da biodiversidade em escala global.

4. MATERIAL E MÉTODOS

O conjunto de informações de coordenadas geográficas das espécies do gênero *Hymenaea* (*H. stigonocarpa*, *H. parvifolia*, *H. martiana*, *H. eriogyne*, *H. courbaril* e *H. aurea*) foram delimitados ao território brasileiro e obtidos a partir de bancos de dados de acesso aberto como o Centro de Referência em Informação Ambiental (CRIA, 2024), da plataforma SpeciesLink (Species Link, 2024) e do Global Biodiversity Information Facility (GBIF, 2024). Informações adicionais foram integradas a partir de herbários virtuais, revisão bibliográfica de artigos científicos, dados de populações naturais e coleções das instituições Universidade Federal do Amazonas (UFAM) e Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia (INPA). Esses dados subsidiaram a modelagem e a criação de camadas de distribuição das espécies na América do Sul e foram coletados em 2024 no Laboratório de Genética e Melhoramento Vegetal da Universidade Federal do Amazonas (LABGEMVEG – UFAM).

Para assegurar a precisão dos dados, foi realizado uma análise de consistência com exclusão de duplicatas, outliers e informações incompletas. A verificação das coordenadas geográficas foi realizada no software R, utilizando o pacote tidyverse (Wickham *et al*, 2023; R Core Team, 2024). Além disso, para mitigar o viés de amostragem e reduzir a autocorrelação espacial, pontos de ocorrência com distância inferior a 5 km serão descartados (Aiello-Lammens *et al.*, 2015).

Na modelagem de distribuição potencial das espécies, foram consideradas 33 variáveis ambientais, sendo 19 bioclimáticas e 14 edáficas. As variáveis bioclimáticas foram obtidas da base *WorldClim – Global Climate Data*, que fornece dados climáticos interpolados em alta resolução espacial (1 km² a 340 km²) (Fick & Hijmans, 2017).

As variáveis bioclimáticas são compostas por 19 variáveis derivadas de valores mensais de temperatura do ar (máximas e mínimas em °C) e precipitação pluvial (mm) (Wrege *et al.*, 2017; Rebello *et al.*, 2023). (Tabela 1).

Tabela 1. Variáveis bioclimáticas (Bio) utilizadas na modelagem de predição de ocorrência das espécies do gênero *Hymenaea* (*H. stigonocarpa*, *H. parvifolia*, *H. martiana*, *H. eriogyne*, *H. courbaril* e *H. aurea*) com o código e sua variável correspondente.

Código	Variável	Unidade de medida
Bio1	Temperatura média anual	°C
Bio2	Média mensal da variação diária da temperatura (temp. máxima - temp. mínima)	°C
Bio3	Isotermalidade (Bioc2/Bioc7) (* 100)	%
Bio4	Sazonalidade da temperatura (desvio padrão *100)	%
Bio5	Temperatura máxima no mês mais quente	°C
Bio6	Temperatura mínima no mês mais frio	°C
Bio7	Variação anual da temperatura (Bioc5-Bioc6)	°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 (coeficiente de variação)	mm
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
Bio19	Precipitação pluvial acumulada no trimestre mais frio	mm

Fonte: Ambdata - Variáveis Ambientais para Modelagem e Distribuição de Espécies, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (2020).

A resolução espacial das camadas será 2.5 arco-minutos, equivalente a aproximadamente 5km² de área (Rebello *et al.*, 2023) Para identificação da

contribuição de cada variável bioclimática, será realizada a análise de componentes principais (PCA) por meio do Ambiente R (R Development Core Team, 2022) e do seu complemento RStudio Team (2022).

As 14 variáveis utilizadas para caracterizar as propriedades de qualidade do solo foram obtidas a partir do banco de dados SoilGrids, desenvolvido pelo *International Soil Reference and Information Centre* (ISRIC – World Soil Information) (ISRIC, 2020). Entre as principais variáveis disponibilizadas pelo banco de dados, destacam-se: pH ($-\log_{10}[H^+]$), teor de carbono orgânico do solo (dg/m^3), densidade aparente, teor de fragmentos grosseiros (cm^3/dm^3), teor de areia (g/kg), teor de silte (g/kg), teor de argila (g/kg), capacidade de troca catiônica (mmol(c)/kg), nitrogênio total (cg/kg), densidade de carbono orgânico do solo (hg/m^3), estoque de carbono orgânico (t/ha) e probabilidade prevista de ocorrência do horizonte (ISRIC, 2020) (Tabela 2).

As variáveis edáficas, representativas de características físicas e químicas do solo, serão extraídas da base *SoilGrids* do *International Soil Reference and Information Centre* (ISRIC, 2020), na profundidade de 15 a 30 cm (Tabela 2).

Tabela 1. Variáveis de qualidade do solo que serão utilizadas na modelagem de nicho ecológico das espécies de jatobá do gênero *Hymenaea* (*H. stigonocarpa*, *H. parvifolia*, *H. martiana*, *H. eriogyne*, *H. courbaril* e *H. aurea*) com o código e sua unidade de medida correspondente.

Código	Variável	Unidade de medida
Slope	Declividade	m
Elevation	Elevação	m
bdod	Densidade aparente	cg/cm ³
cec	Capacidade de troca catiônica no pH 7	mmol(c)/kg
cfvo	Fragmentos grossos volumétricos	cm ³ /dm ³
clay	Argila	g/kg
nitrogen	Nitrogênio	cg/kg
ocd	Densidades de carbono orgânico	hg/m ³
ocs	Estoque de carbono orgânico do solo	t/ha
pH H ₂ O	pH do solo em H ₂ O	$-\log_{10}[H^+]$
sand	Areia	g/kg

silt	Silte	g/kg
soc	Conteúdo de carbono orgânico do solo	dg/kg
wrb	Classes e probabilidades "World Reference Base"	-

Fonte: International Soil Reference and Information Centre, 2020; EarthEnv, 2020.

Para as projeções climáticas, foram selecionados dois cenários de referência: o cenário intermediário (SSP245), que projeta um aumento médio da temperatura global de 2,7 °C até o ano de 2100, e o cenário pessimista (SSP585), que prevê um incremento médio de 4,4 °C no mesmo período. As simulações foram realizadas utilizando o modelo climático CNRMCM6-1 para os intervalos temporais de 2041-2060, 2061-2080 e 2081-2100.

O processamento dos dados foi realizado por meio do *software* RStudio, integrado ao *software* R (versão 4.2), com o uso do pacote ENMTML – *Create Ecological Niche Models with TheMetaLand EcologyLab* (<https://andrefaa.github.io/ENMTML/>; acesso em 17 de novembro de 2024). No pacote ENMTM utilizando treze tipos de algoritmos diferentes para a construção dos ENMs individuais e combinados.

Para simplificar o conjunto de dados e selecionar as variáveis que melhor representam a variabilidade da amostra, foram considerados os eixos que mais contribuem para a análise, explicando pelo menos 95% da variabilidade total dos dados (Sánchez *et al.*, 2010). Essa abordagem permitiu corrigir a multicolinearidade entre as variáveis preditoras originais, captar uma maior porcentagem da variação total das informações contidas no conjunto de dados e reduzir o número de variáveis utilizadas no modelo (Velazco *et al.*, 2017).

Os cenários foram construídos a partir de modelos de circulação geral (GCM), disponíveis no Data Distribution Centre do sexto relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021) e foram selecionados três modelos de circulação atmosférica: HadGEM-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR (Firpo *et al.*, 2022) e MIROC6 (Monteverde *et al.*, 2022), dos quais, foi retirada uma média, a fim de aumentar a precisão do modelo (Dormann *et al.*, 2018).

De acordo com os dados obtidos, foi considerado um período atual (2009–2019) e projeções futuras para os períodos (2041-2060, 2061-2080 e 2081-2100)

com dois cenários climáticos: ssp 245 (menos pessimista) e ssp 585 (mais pessimista) para a emissão dos gases do efeito estufa (GEE), considerando que para o “mais pessimista”, não serão consideradas estratégias que reduzam o efeito estufa (Gomes *et al.*, 2022; Tomaz *et al.*, 2022). Além de se considerar os seis domínios fitogeográficos brasileiros (Amazônia, Caatinga, Cerrado, Pantanal, Mata Atlântica e Pampa).

Para avaliar o modelo que apresentou melhor desempenho, foi realizada a análise da métrica área sob a curva (AUC), calculada por meio da integração da curva de Características Operacionais do Receptor (*Receiver Operating Characteristic* – ROC) (Allouche *et al.*, 2006), o AUC varia entre 0 e 1 (Fielding & Bell, 1997).

Os mapas foram obtidos por meio do software *OpenModeller*, em *American Standard Code* para o formato de texto *Information Interchange* (ASCII), contendo valores binários e transformados para o formato 'raster' (Redlands, 2011). As categorias foram geradas com um gradiente variando de 0 a 1, onde 0 corresponde a áreas com baixa probabilidade de ocorrência e 1 a áreas com alta probabilidade de ocorrência (Gomes *et al.*, 2022).

Os algoritmos a serem utilizados na modelagem incluem: Bioclim (BIO; Nix, 1986), Maximum Entropy (MXD; Anderson & Gonzalez, 2011), Random Forests (RDF; Prasad *et al.*, 2010), Support Vector Machine (SVM; Prasad *et al.*, 2010) e Generalized Linear Models (GLM; R Core Team, 2024). A integração desses algoritmos resulta em um modelo consenso, priorizando aquele com melhor desempenho preditivo.

Os modelos foram avaliados com base nas métricas: Área Sob a Curva (AUC; Fielding & Bell, 1997), Kappa (Cohen, 1968), True Skill Statistic (TSS; Allouche *et al.*, 2006), Jaccard e Sorensen (Leroy *et al.*, 2018). Modelos com valores superiores a 0,7 em todas as métricas foram considerados adequados (Fielding & Bell, 1997; Allouche *et al.*, 2006; Leroy *et al.*, 2018). Para as análises, foi utilizado o pacote ENMTML no R (Andrade *et al.*, 2020; R Core Team, 2024). Com base nos modelos adequados, foram obtidos mapas binários para as espécies do estudo, considerando o consenso dos melhores modelos e os valores ótimos de sensibilidade e especificidade (MX_TSS). Esses mapas são ferramentas fundamentais para o planejamento da conservação das espécies

Mauritia flexuosa, *Socratea exorrhiza*, *Victoria amazonica* e *Eichhornia crassipes* em cenários climáticos atuais e futuros.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, foram registrados 3.549 pontos de ocorrência para as espécies do gênero *Hymenaea*, sendo 1.047 registros para *H. stigonocarpa*, 244 para *H. parvifolia*, 425 para *H. martiana*, 167 para *H. eriogyne*, 1.617 para *H. courbaril* e 49 pontos para *H. aurea* (Figura 3). Após a aplicação dos processos de limpeza e redução espacial dos dados, a matriz final de ocorrência foi consolidada, resultando em 809 registros para *H. stigonocarpa*, 190 para *H. parvifolia*, 345 para *H. martiana*, 130 para *H. eriogyne*, 1.180 para *H. courbaril* e 38 para *H. aurea*. Em termos percentuais, *H. courbaril* representou 44% do total de pontos analisados, seguido pela *H. stigonocarpa* (30%), *H. martiana* (13%), *H. parvifolia* (7%) e *H. aurea* (1%).

Foi observado que para as espécies do gênero *Hymenaea* analisadas, apenas *H. courbaril* apresenta ampla distribuição nos domínios fitogeográficos brasileiros, com ocorrência nos domínios Amazônia, Pantanal, Cerrado, Caatinga e Mata Atlântica, sendo a espécie com maior distribuição e presença nos domínios (Figura 3). As espécies *H. stigonocarpa*, *H. martiana* e *H. eriogyne* apresentam predominância no Cerrado e Caatinga, enquanto a *H. parvifolia* apresenta predominância na Amazônia. Em contrapartida, a espécie *H. aurea* está apresenta ocorrência restrita ao domínio na Mata Atlântica (Figura 3).

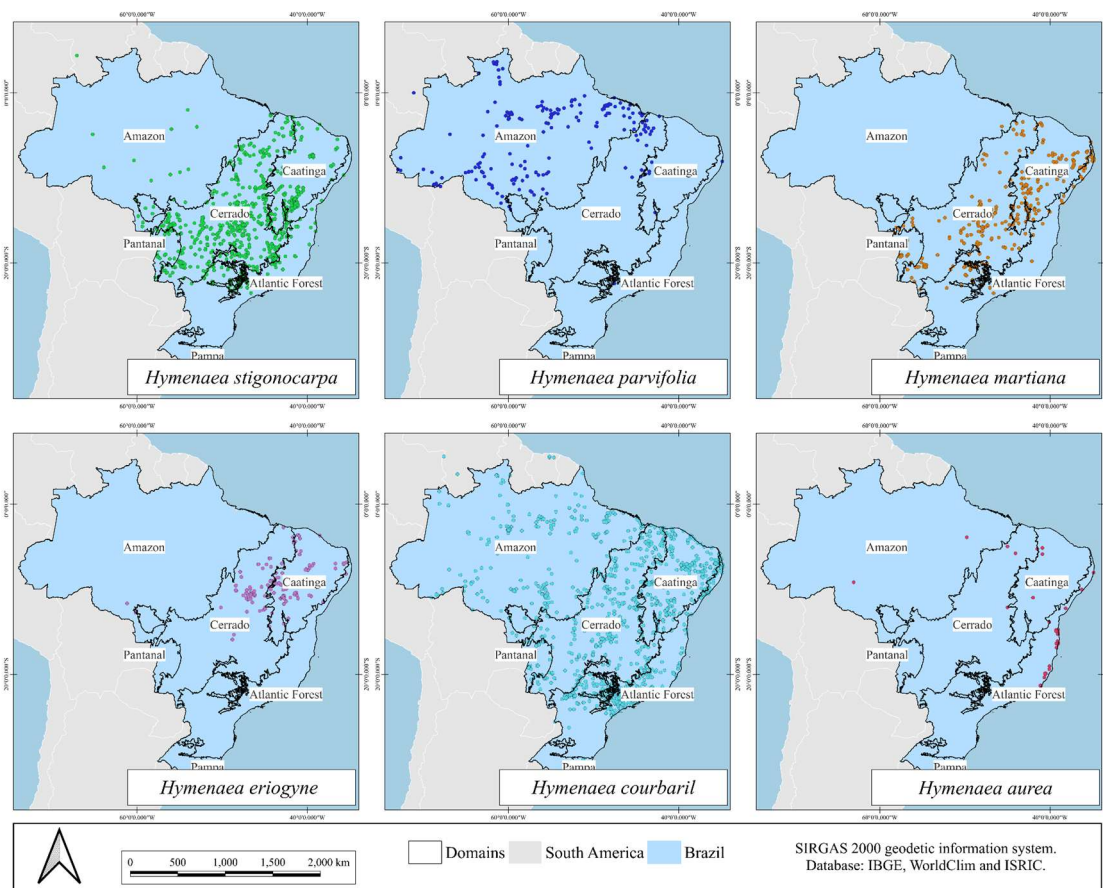


Figura 3. Pontos de ocorrência restritos aos domínios fitogeográficos brasileiros após análise de colinearidade e redução espacial das espécies de jatobá (*H. stigonocarpa*, *H. parvifolia*, *H. martiana*, *H. eriogyne*, *H. courbaril* e *H. aurea*).

A análise revela que o primeiro componente principal é responsável por 40,31% da variância total. À medida que novos componentes são adicionados, a variância explicada aumenta progressivamente. Com a inclusão dos cinco primeiros componentes, a variância acumulada atinge 80,26%, evidenciando que essa quantidade de componentes captura a maior parte da variabilidade dos dados. A partir do 10º componente, o ganho adicional de explicação da variância torna-se marginal, atingindo 92,57%, o que sugere uma redução no impacto da inclusão de componentes adicionais. No 13º componente principal, a variância acumulada alcança **95,85%**, indicando que quase toda a informação presente nos dados originais pode ser mantida com esse conjunto de componentes (Figura 4).

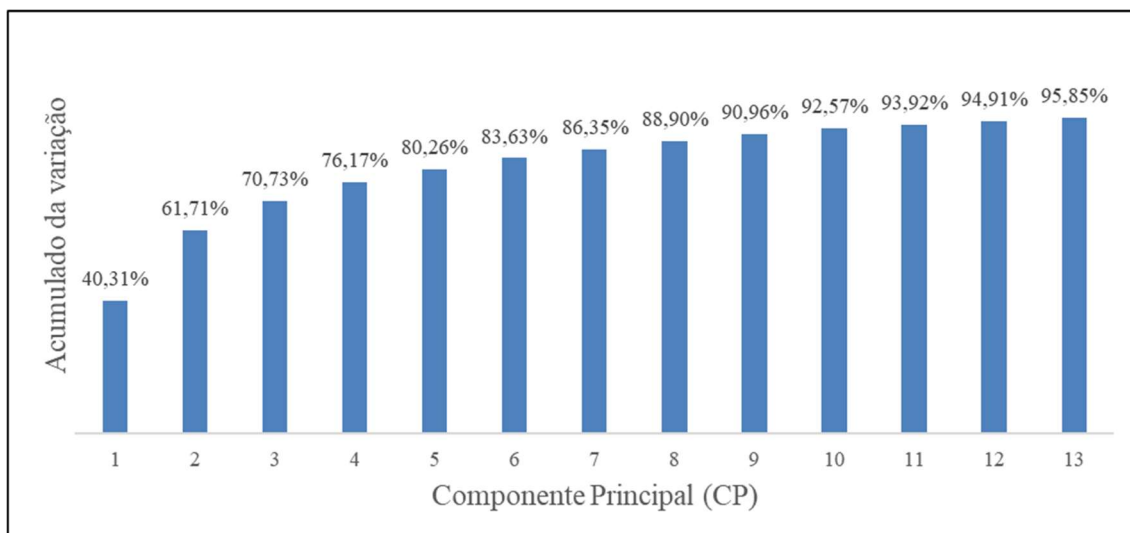


Figura 4. Variância acumulada explicada pelos Componentes Principais obtidos na Análise de Componentes Principais (PCA). O eixo x representa os componentes principais (CPs), e o eixo y mostra a variância acumulada explicada por cada componente.

A análise das variáveis mais importantes para cada vetor revelou achados significativos. No primeiro vetor, a variável com o maior autovetor foi a temperatura mínima no mês mais frio (°C) (Bio 06), com um coeficiente de 0,263 (Tabela 2). Esse resultado corrobora com os achados de Freitas *et al.* (2019), que destacam o papel dessa variável desempenha no crescimento de espécies florestais. A temperatura mínima influencia diretamente processos fisiológicos essenciais, como fotossíntese, respiração e fotorrespiração, além de afetar a atividade enzimática e o equilíbrio hídrico das plantas (Freitas *et al.*, 2019).

No segundo vetor, a variável predominante foi o estoque de carbono orgânico no solo entre 15 e 30 cm de profundidade (ocs 30), com um autovetor de 0,324 (Tabela 2). Quando manejado corretamente, o solo desempenha papel crucial no processo de emissão, estoque e sequestro de carbono, contribuindo para a mitigação da mudança climáticas (Crespo, 2023). A importância da interação entre a temperatura e o estoque de carbono, destacando o papel estratégico da floresta amazônica na regulação climática no contexto do aquecimento global (Oliveira, 2011).

Por fim, no terceiro vetor, a variável predominante foi a sazonalidade da precipitação pluvial (mm) (Bio 15), com um autovetor de 0,353. A sazonalidade das chuvas afeta diretamente o desenvolvimento das espécies florestais, sendo que períodos de seca estão associados à mortalidade de árvores e à redução de seu crescimento, devido à menor disponibilidade de água

e nutrientes (Palomo-Kumul *et al.*, 2021). A temperatura global influencia a precipitação tropical média, sendo este um fator determinante para a ecologia das florestas amazônicas (Allan *et al.*, 2010; Tan *et al.*, 2015; He *et al.*, 2024).

Tabela 2. Valores de autovetores dos seis componentes principais (PC) das variáveis bioclimáticas e edáficas utilizados no processo de modelagem de nicho ecológico das espécies de jatobá.

Variáveis	Componentes Principais					
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
bdod30	0,01335	-0,3024	-0,1062	0,09689	-0,011	0,13155
bio01	0,25012	-0,13408	-0,02052	0,01888	0,08171	-0,02059
bio02	-0,16078	-0,18664	0,00703	0,08859	-0,40193	-0,14524
bio03	0,19871	0,03839	0,28746	0,07518	-0,11552	0,25729
bio04	-0,21098	-0,05189	-0,31267	-0,08929	-0,01008	-0,05455
bio05	0,18832	-0,22586	-0,16908	-0,01247	0,07135	-0,07955
bio06	0,26304	-0,04979	0,04605	0,0019	0,16107	0,06933
bio07	-0,21236	-0,12999	-0,21795	-0,0139	-0,16937	-0,17155
bio08	0,21858	-0,16375	-0,09236	0,07646	-0,01294	-0,05603
bio09	0,2494	-0,07391	0,06948	-0,03656	0,1812	0,04824
bio10	0,21952	-0,17933	-0,15315	-0,01552	0,11083	-0,03544
bio11	0,25861	-0,09202	0,06619	0,03807	0,07605	0,00239
bio12	0,23216	0,15252	-0,01574	-0,07458	-0,17983	-0,00991
bio13	0,23602	0,08351	0,10999	0,01131	-0,09483	-0,14991
bio14	0,12662	0,22669	-0,18592	-0,20823	-0,26758	0,28643
bio15	-0,03757	-0,17633	0,35342	0,25228	-0,01363	-0,22425
bio16	0,23719	0,08598	0,10129	0,00228	-0,10689	-0,15391
bio17	0,13619	0,22998	-0,17832	-0,2048	-0,25654	0,2729
bio18	0,14751	0,11882	-0,11704	0,01274	-0,48316	-0,26417
bio19	0,16802	0,14583	0,03576	-0,10786	0,10778	0,24477
cec30	-0,16728	0,16491	-0,18987	0,09293	0,22615	0,12126
cfvo30	-0,16704	0,08588	0,29759	0,03261	0,09834	0,33848
clay30	0,15351	0,06708	-0,04364	0,34865	0,00173	0,01195
elevation	-0,16104	0,07675	0,31152	0,19996	-0,34066	0,1493
nitrogen30	-0,05227	0,31203	0,00848	-0,00568	0,18831	-0,17885
ocd30	-0,05273	0,32049	-0,01958	0,06113	0,20188	-0,27222
ocs30	0,00104	0,32438	-0,07666	0,12594	0,10718	-0,24399
phh2o30	-0,23567	-0,10369	-0,07215	-0,01637	0,05191	0,15455
sand30	-0,11923	-0,10505	0,22343	-0,54191	0,01357	-0,09989

silt30	0,03723	0,09385	-0,28839	0,48228	-0,02161	0,13599
slope1	-0,07464	0,19135	0,25826	0,17733	-0,02772	-0,02934
soc30	-0,00608	0,28617	-0,04986	-0,13837	0,05673	-0,10422
wrb	-0,11458	-0,0231	-0,14908	0,15856	-0,01031	0,28379

Bdodo30=densidade aparente; Bio1= temperatura média anual (°C); Bio2 = média mensal da variação diária da temperatura (°C); Bio3= isothermalidade; 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.

A partir dos modelos aplicados para as espécies *H. stigonocarpa*, *H. parvifolia*, *H. martiana*, *H. eriogyne*, *H. courbaril* e *H. aurea*, a maioria dos modelos testados apresentou valores de AUC superiores 0,9, o que indica alta precisão na previsão das distribuições dessas espécies. No entanto, a espécie *H. aurea* obteve AUCs de 0,71 e 0,73 para os índices BIO e GLM, respectivamente, sendo considerada com precisão razoável (Tabela 3).

As variáveis RDF e SVM se destacaram como as mais relevantes que em todas as espécies, com valores superiores a 0,93 alcançando até 1,00 1,00 para *H. martiana* e *H. stigonocarpa*, o que indica discriminação perfeita para essas espécies. esses resultados sugerem que os modelos são eficientes na previsão da presença dessas espécies, com alta confiabilidade (Tabela 3).

A variável BIO apresentou um desempenho muito abaixo do esperado para *H. aurea*, com resultados baixos (Tabela 3) que indicam sua ineficácia para essa espécie. No entanto, para as demais espécies a variável demonstrou excelente desempenho. As demais variáveis analisadas apresentaram resultados superiores a 0,8, reforçando a eficácia dos modelos na previsão e análise das distribuições das espécies.

Tabela 3. Variáveis indicadoras e desvio padrão (DP) para validação de seis modelos para a predição da área potencial de ocorrência das espécies de jatobá.

Métricas	BIO ¹	GAU ²	GLM ³	MXD ⁴	RDF ⁵	SVM ⁶
AUC ⁷	0,71±0,096	0,93±0,060	0,73±0,063	0,94±0,037	0,94±0,068	0,93±0,051
Kappa	0,41±0,192	0,81±0,123	0,45±0,161	0,81±0,123	0,86±0,135	0,78±0,125
TSS ⁸	0,41±0,192	0,81±0,123	0,45±0,161	0,81±0,123	0,86±0,135	0,78±0,125
Jaccard	0,41±0,192	0,82±0,123	0,56±0,127	0,83±0,112	0,87±0,129	0,81±0,109
Sorensen	0,57±0,177	0,90±0,072	0,72±0,097	0,90±0,065	0,93±0,074	0,89±0,063

Hymenaea courbaril

Métricas	BIO ¹	GAU ²	GLM ³	MXD ⁴	RDF ⁵	SVM ⁶
AUC ⁶	0,98±0,004	0,99±0,004	0,99±0,005	0,98±0,005	0,99±0,003	0,99±0,005
Kappa	0,91±0,019	0,92±0,021	0,90±0,017	0,87±0,020	0,93±0,021	0,91±0,017
TSS ⁷	0,91±0,019	0,92±0,021	0,90±0,017	0,87±0,020	0,93±0,021	0,92±0,017
Jaccard	0,91±0,019	0,93±0,019	0,91±0,016	0,88±0,018	0,93±0,020	0,92±0,016
Sorensen	0,95±0,011	0,96±0,010	0,95±0,009	0,94±0,010	0,97±0,011	0,96±0,008

Hymenaea erioogyne

Métricas	BIO ¹	GAU ²	GLM ³	MXD ⁴	RDF ⁵	SVM ⁶
AUC ⁶	0,93±0,023	0,99±0,010	0,93±0,018	0,99±0,008	0,99±0,005	0,99±0,006
Kappa	0,85±0,045	0,92±0,051	0,84±0,047	0,92±0,030	0,92±0,030	0,93±0,035
TSS ⁷	0,85±0,045	0,92±0,051	0,84±0,047	0,92±0,030	0,92±0,030	0,93±0,035
Jaccard	0,85±0,045	0,92±0,049	0,86±0,040	0,92±0,028	0,92±0,026	0,93±0,031
Sorensen	0,92±0,026	0,96±0,027	0,92±0,023	0,96±0,015	0,96±0,014	0,96±0,017

Hymenaea martiana

Métricas	BIO ¹	GAU ²	GLM ³	MXD ⁴	RDF ⁵	SVM ⁶
AUC ⁶	0,96±0,022	1,00±0,000	0,96±0,014	0,99±0,002	1,00±0,001	1,00±0,001
Kappa	0,92±0,044	0,98±0,008	0,91±0,024	0,94±0,019	0,96±0,008	0,97±0,007
TSS ⁷	0,92±0,044	0,98±0,008	0,91±0,024	0,94±0,019	0,96±0,008	0,97±0,007
Jaccard	0,92±0,044	0,98±0,008	0,91±0,024	0,94±0,016	0,96±0,008	0,97±0,007
Sorensen	0,96±0,024	0,99±0,004	0,95±0,013	0,97±0,009	0,98±0,004	0,98±0,004

Hymenaea parvifolia

Métricas	BIO ¹	GAU ²	GLM ³	MXD ⁴	RDF ⁵	SVM ⁶
AUC ⁶	0,94±0,021	0,99±0,013	0,98±0,012	0,98±0,014	0,99±0,007	0,99±0,009
Kappa	0,88±0,041	0,91±0,050	0,89±0,043	0,88±0,037	0,89±0,043	0,93±0,054
TSS ⁷	0,87±0,041	0,91±0,050	0,89±0,043	0,88±0,036	0,89±0,043	0,93±0,054
Jaccard	0,87±0,041	0,91±0,045	0,89±0,044	0,89±0,030	0,90±0,042	0,93±0,051

Sorensen	0,93±0,023	0,95±0,024	0,94±0,025	0,94±0,017	0,94±0,024	0,96±0,027
<i>Hymenaea stigonocarpa</i>						
Métricas	BIO ¹	GAU ²	GLM ³	MXD ⁴	RDF ⁵	SVM ⁶
AUC ⁶	0,97±0,009	0,99±0,003	0,99±0,001	0,99±0,003	0,99±0,003	1,00±0,002
Kappa	0,90±0,025	0,94±0,009	0,93±0,011	0,91±0,015	0,93±0,017	0,94±0,006
TSS ⁷	0,90±0,025	0,94±0,009	0,93±0,011	0,91±0,015	0,93±0,017	0,94±0,006
Jaccard	0,90±0,025	0,94±0,009	0,93±0,011	0,92±0,015	0,94±0,015	0,95±0,006
Sorensen	0,95±0,014	0,97±0,005	0,96±0,006	0,96±0,008	0,97±0,008	0,97±0,003

¹BIO = Bioclim; ²GAU = Bayesian Gaussian Process; ³GLM = Generalized Linear Models;

⁴MXD = Maximum Entropy Default; ⁵RDF = Random Forests; ⁶SVM = Support Vector Machine;

⁷AUC = Area Under the Curve e ⁸TSS = True Skill Statistics.

A distribuição geográfica das espécies do gênero *Hymenaea* no Brasil apresenta um padrão de segregação ecológica, refletindo adaptações distintas a diferentes domínios fitogeográficos. As espécies analisadas demonstram preferências por ambientes secos ou úmidos, evidenciando sua distribuição predominantemente no Cerrado, Caatinga, Amazônia e Mata Atlântica (Figura 5).

H. stigonocarpa e *H. parvifolia* são amplamente distribuídas no Cerrado, com extensões para a Caatinga e ocorrência secundária em partes da Mata Atlântica (Figura 5). Ambas possuem baixa probabilidade de ocorrência na Amazônia e no extremo sul do Brasil, indicando uma preferência por ambientes com clima sazonal e solos bem drenados (Figura 5). Comportamento semelhante foi observado para *H. martiana* ocorrendo em regiões secas, com ampla distribuição na Caatinga e no Cerrado. Sua baixa ocorrência na Amazônia e na Mata Atlântica sugere uma adaptação a climas mais secos e solos de baixa fertilidade. Em contraste, *H. eriogyne* e *H. aurea* apresentam uma distribuição concentrada na Amazônia, com *H. eriogyne* ocorrendo também em partes do Cerrado. Essas espécies possuem baixa ocorrência na Caatinga e no sul do Brasil, indicando uma dependência de condições ambientais mais úmidas (Figura 5).

Diferente das outras espécies de jatobá, *H. courbaril* apresenta ampla distribuição na Amazônia e na Mata Atlântica, com algumas ocorrências no Cerrado (Figura 5). Sua presença em florestas tropicais úmidas e solos mais férteis sugere uma menor tolerância a condições de seca prolongada.

Dessa forma, as espécies do gênero *Hymenaea* apresentam uma clara divisão ecológica, com algumas adaptadas a ambientes secos (*H. stigonocarpa*, *H. parvifolia*, *H. martiana*) e outras a regiões mais úmidas (*H. eriogyne*, *H. courbaril*, *H. aurea*). Essa variação reflete diferenças nas estratégias adaptativas do gênero e sua distribuição nos domínios fitogeográficos brasileiros.

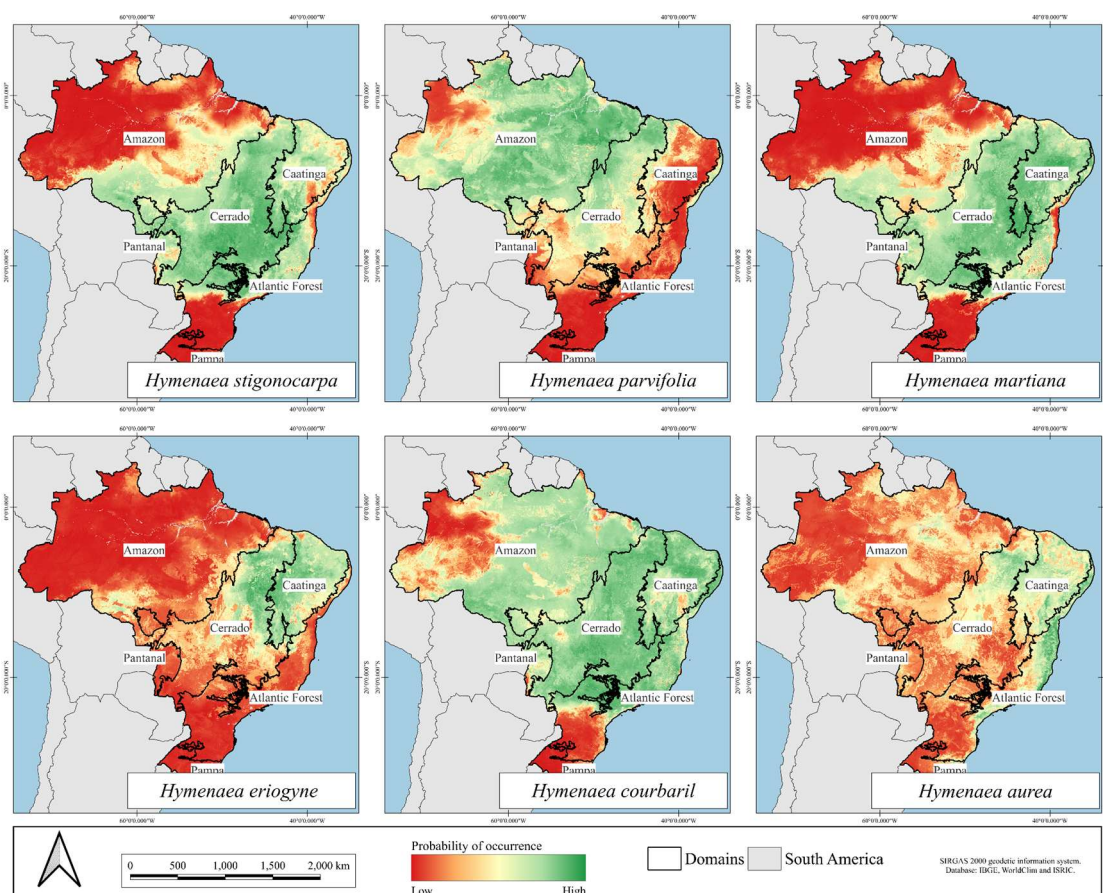


Figura 5. Projeção referente ao período presente (2009-2019) para as espécies de jatobá (*H. stigonocarpa*, *H. parvifolia*, *H. martiana*, *H. eriogyne*, *H. courbaril* e *H. aurea*).

A projeção da adequabilidade ambiental para seis espécies do gênero *Hymenaea* nos domínios fitogeográficos Amazônia sob o cenário climático SSP245 para o período de 2041-2060, indicam uma redução da adequabilidade ambiental para *H. stigonocarpa*, *H. parvifolia* e *H. martiana*, especialmente em regiões do Cerrado e da Caatinga, sugerindo impactos negativos para essas espécies adaptadas a climas mais secos (Figura 6).

Por outro lado, *H. eriogyne*, *H. courbaril* e *H. aurea*, que apresentam maior ocorrência na Amazônia, tendem a manter áreas com adequação ambiental, com algumas regiões mostrando expansão potencial (Figura 6).

As projeções indicam que espécies adaptadas a climas secos poderão sofrer reduções na sua distribuição, enquanto espécies florestais podem manter sua adequabilidade, dependendo da conservação dos domínios naturais.

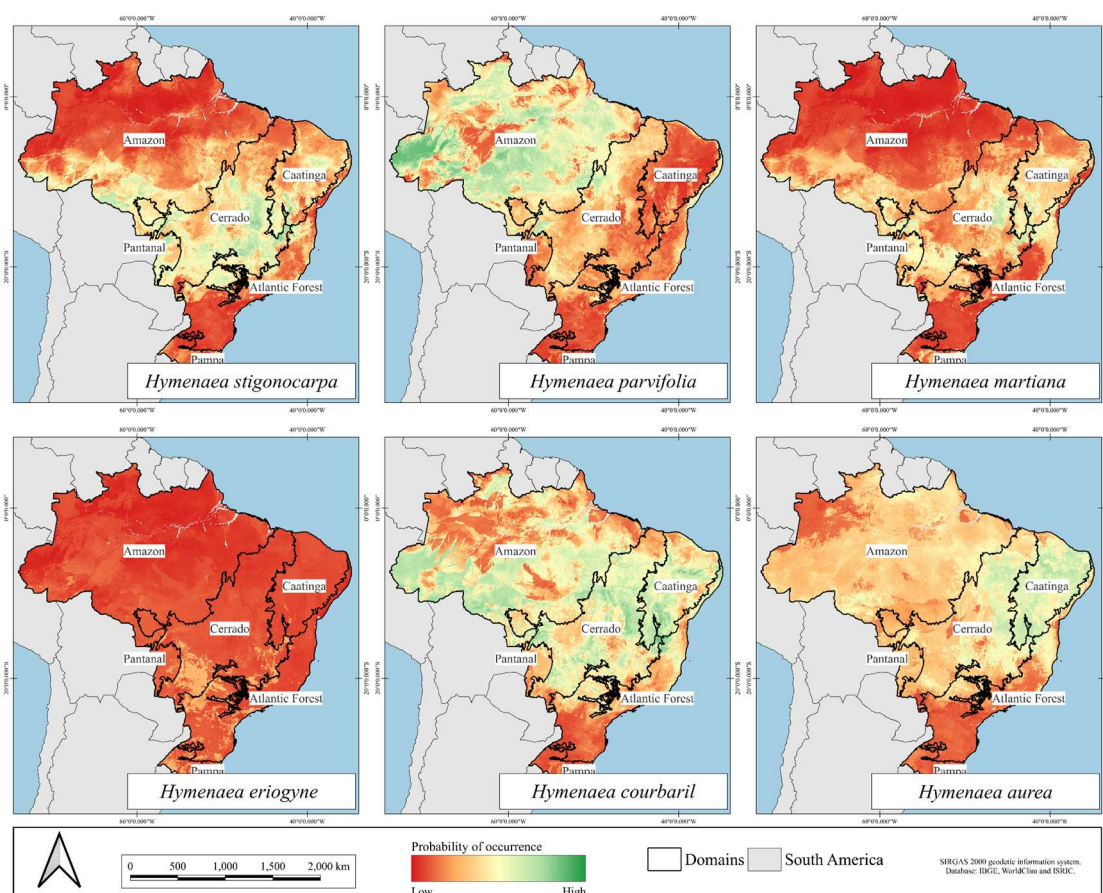


Figura 6. Projeção da adequabilidade ambiental no cenário menos pessimista SSP245 no intervalo de tempo 2041-2060 para as espécies de jatobá (*H. stigonocarpa*, *H. parvifolia*, *H. martiana*, *H. eriogyne*, *H. courbaril* e *H. aurea*).

A projeção da adequabilidade ambiental no cenário menos pessimista SSP 245 no intervalo de tempo 2061-2080 indica uma tendência de redução da adequabilidade ambiental para as espécies *H. stigonocarpa*, *H. parvifolia* e *H. martiana*, especialmente no Cerrado e na Caatinga (Figura 7). Essas espécies, adaptadas a ambientes mais secos, podem enfrentar perdas significativas de

áreas adequadas devido aos efeitos da mudança climática, com impactos na sua distribuição futura.

Para *H. eriogyne*, *H. courbaril* e *H. aurea*, observa-se a manutenção da adequabilidade ambiental em grande parte da Amazônia (Figura 7), sugerindo que essas espécies podem ser menos afetadas pelas alterações climáticas, desde que os habitats florestais permaneçam preservados. No entanto, a fragmentação desses domínios fitogeográficos pode representar desafios para sua conservação.

De modo geral, a projeção sugere que espécies associadas a climas úmidos podem ser menos impactadas do que aquelas adaptadas a ambientes secos, reforçando a necessidade de estratégias de conservação específicas para cada grupo dentro do gênero *Hymenaea*.

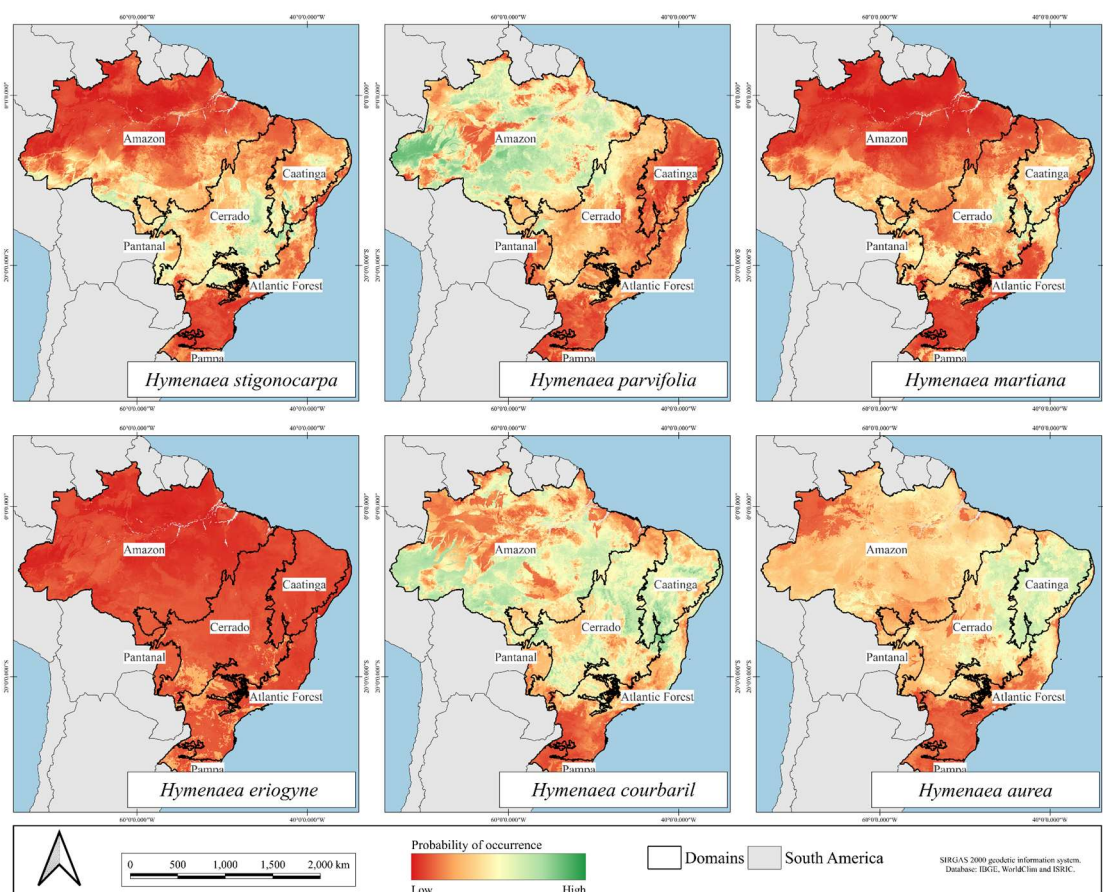


Figura 7. Projeção da adequabilidade ambiental no cenário menos pessimista SSP245 nos intervalos de tempo 2061-2080 para as espécies de jatobá (*H. stigonocarpa*, *H. parvifolia*, *H. martiana*, *H. eriogyne*, *H. courbaril* e *H. aurea*).

As projeções para o cenário menos pessimista SSP 245 e intervalo 2081-2100, indicam que as espécies *H. stagnocarpa*, *H. martiana*, *H. eriogyne* e *H. parvifolia* apresentam maiores perdas de áreas com adequação ambiental e consequentemente menor probabilidade de ocorrência dessas espécies em todos os domínios fitogeográficos, com exceção *H. parvifolia* que apresenta alta probabilidade de ocorrência na Amazônia e baixa nos domínios, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal (Figura 8). Por outro lado, *H. courbaril* e *H. aurea* apresentam maiores áreas com adequabilidade ambiental quando comparadas as outras espécies do gênero para o mesmo cenário e intervalo de tempo (Figura 8).

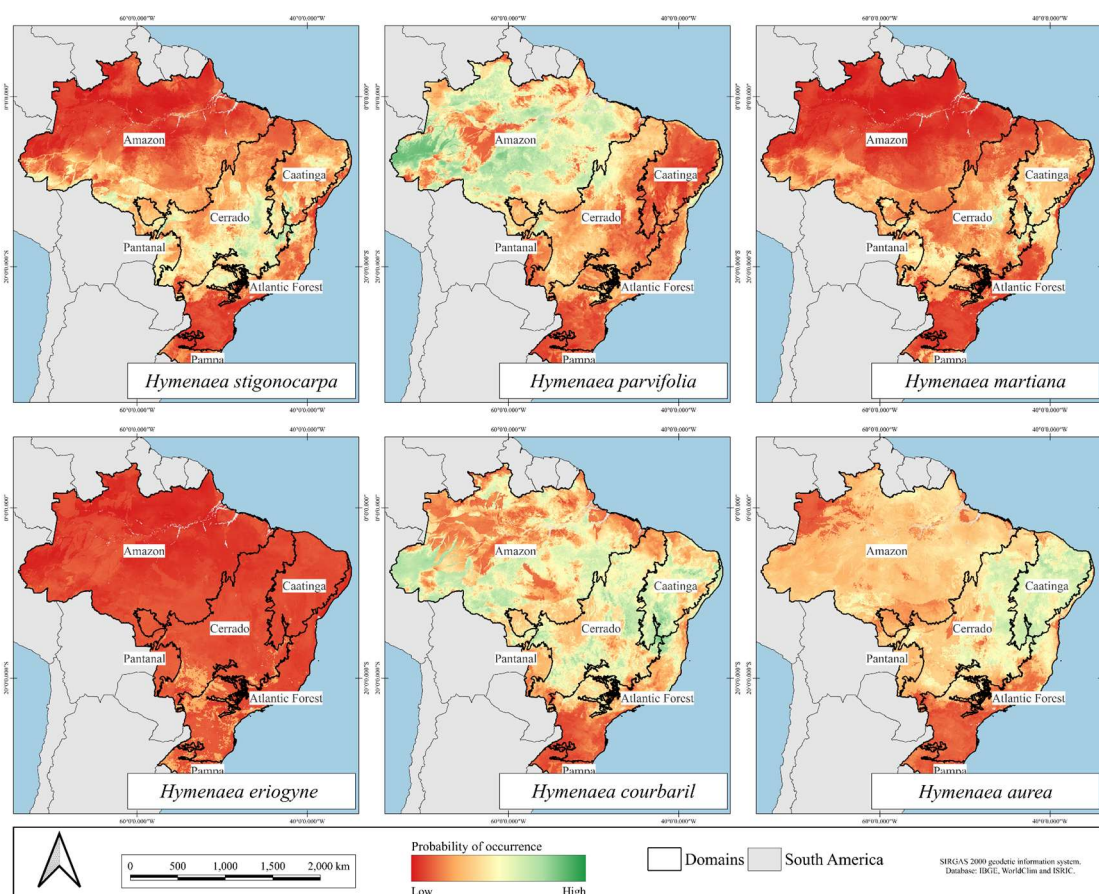


Figura 8. Projeção da adequabilidade ambiental no cenário menos pessimista SSP245 no intervalo de tempo 2081-2100 para as espécies de jatobá (*H. stagnocarpa*, *H. parvifolia*, *H. martiana*, *H. eriogyne*, *H. courbaril* e *H. aurea*).

As projeções para o cenário mais pessimista SSP 585 no intervalo de tempo 2041-2060 são verificadas contínuas perdas de áreas com adequação ambiental para todas as espécies de jatobá em todos os domínios

fitogeográficos brasileiros, sendo *H. stagnocarpa*, *H. martiana* e *H. eriogyne* as mais afetadas pelas alterações nos padrões climáticos e de solo (Figura 9).

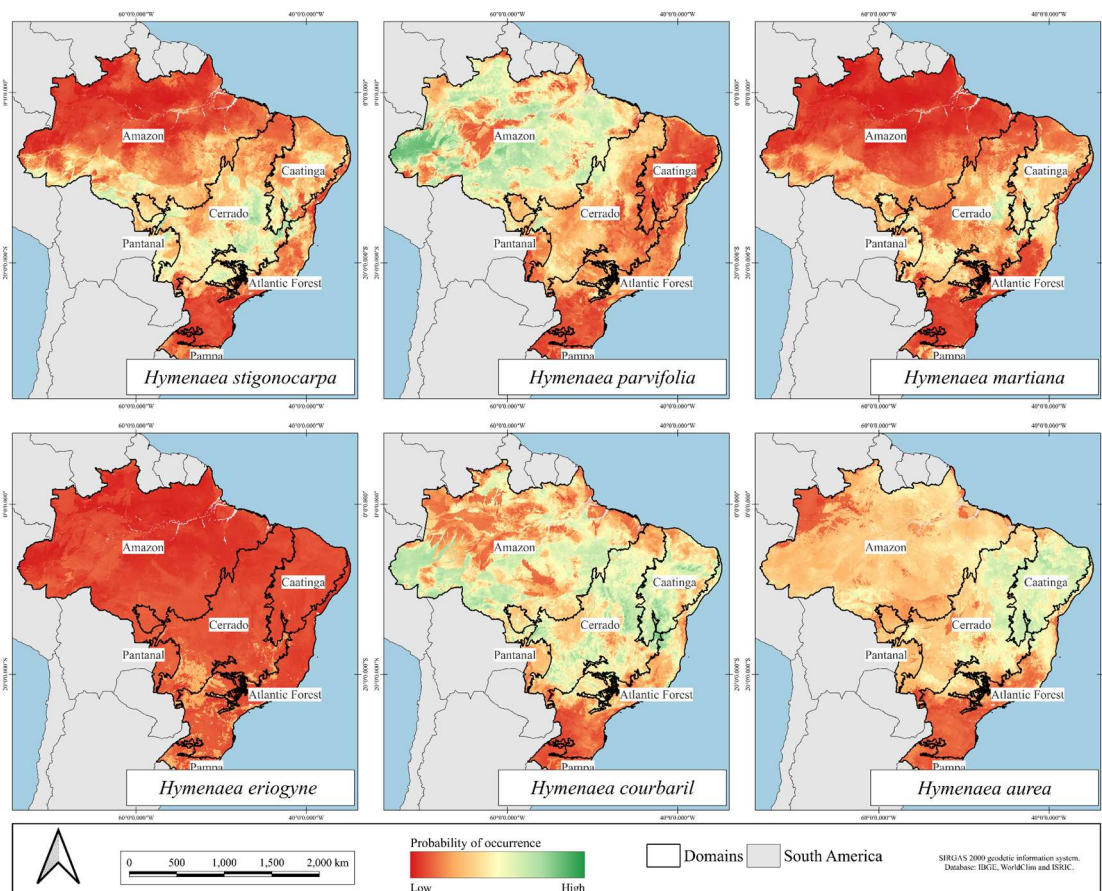


Figura 9. Projeção da adequabilidade ambiental no cenário mais pessimista SSP585 no intervalo de tempo 2041-2060 para as espécies de jatobá (*H. stagnocarpa*, *H. parvifolia*, *H. martiana*, *H. eriogyne*, *H. courbaril* e *H. aurea*).

Para o período 2061-2080, *H. aurea* apesar da perda gradual de áreas com adequação ambiental nos domínios, continua sendo a espécie com menor perda de áreas quando comparada as outras espécies no mesmo cenário e período (Figura 10). *H. stagnocarpa*, *H. martiana* e *H. eriogyne* continuam sendo as espécies com maiores perdas de áreas com adequação ambiental (Figura 10).

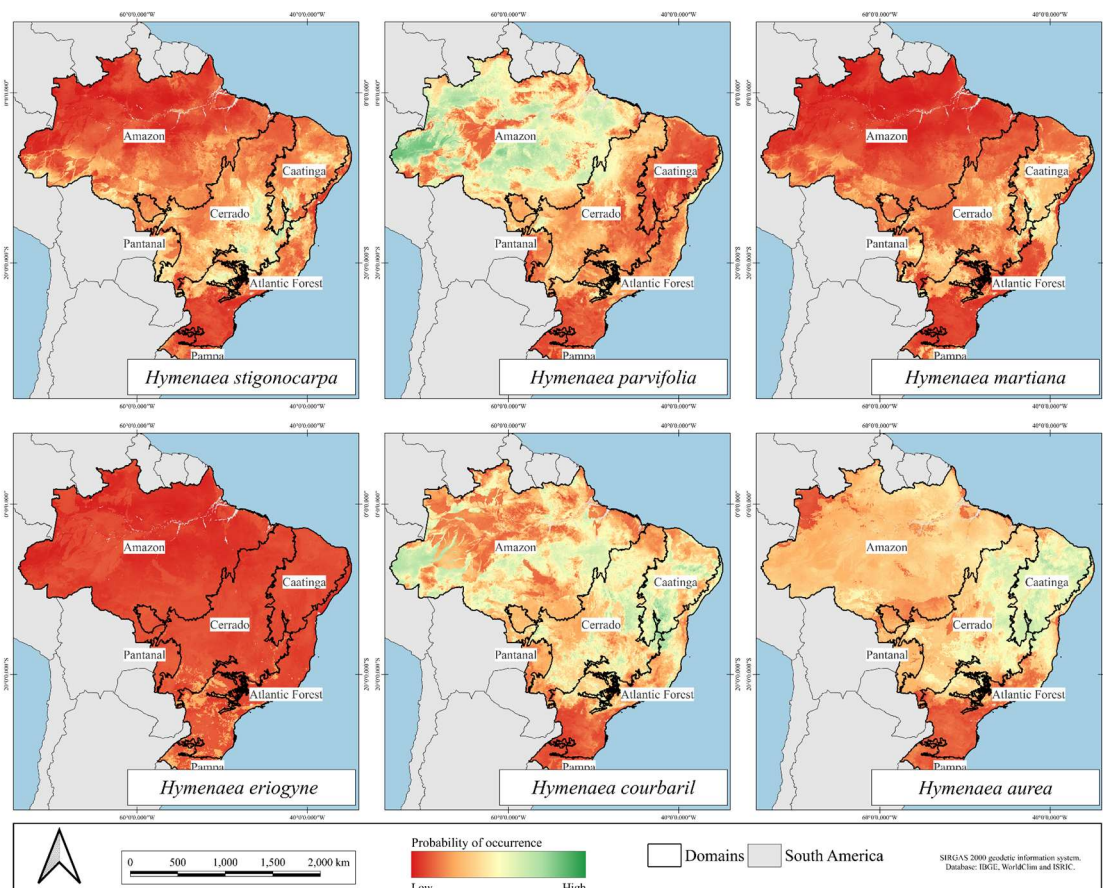


Figura 10. Projeção da adequabilidade ambiental no cenário mais pessimista SSP585 no intervalo de tempo 2061-2080 para as espécies de jatobá (*H. stigonocarpa*, *H. parvifolia*, *H. martiana*, *H. eriogyne*, *H. courbaril* e *H. aurea*).

Considerando o cenário mais pessimista no intervalo 2081-2100, é possível verificar contínuas e severas perdas de áreas com adequação ambiental para a ocorrência das espécies de jatobá nos domínios fitogeográficos brasileiros e que apesar disso, as espécies *H. parvifolia*, *H. courbaril* e *H. aurea* apresentam pequenos refúgios com alta probabilidade de ocorrência, principalmente na Amazônia e Caatinga (Figura 11).

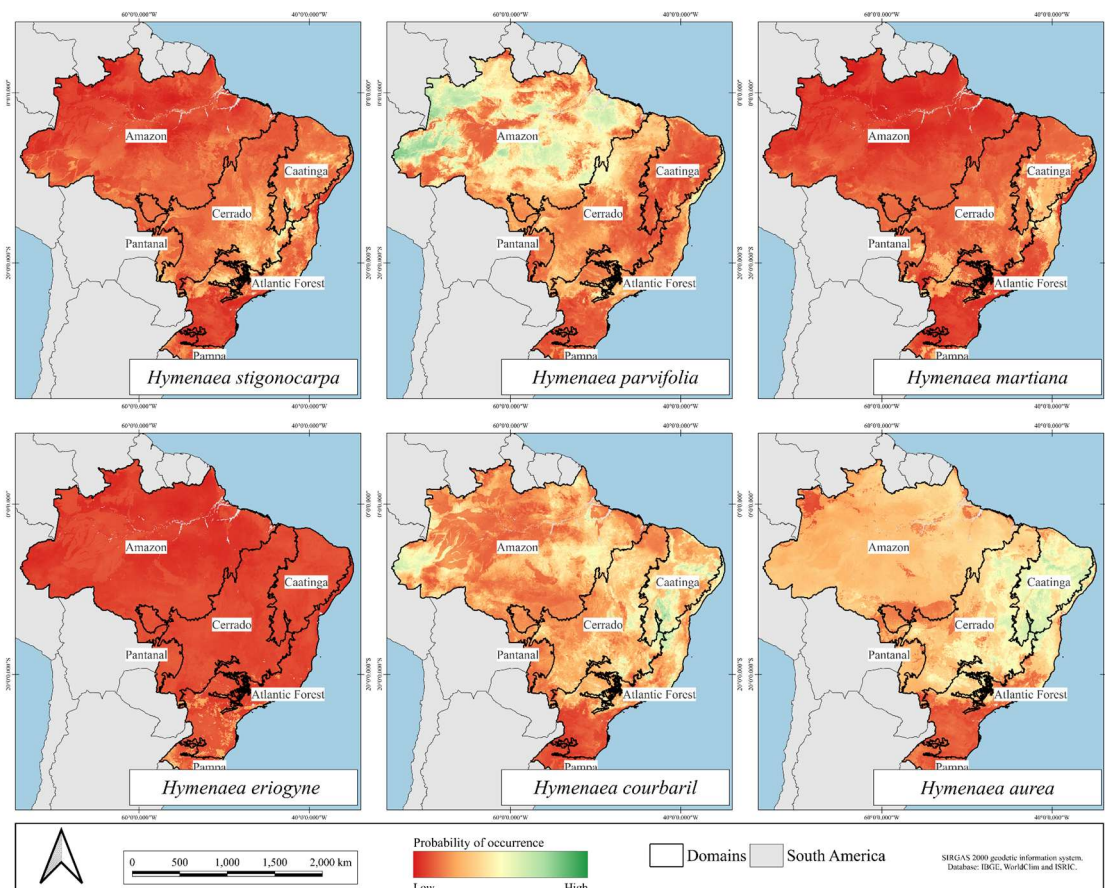


Figura 11. Projeção da adequabilidade ambiental no cenário mais pessimista SSP585 no intervalo de tempo 2081-2100 para as espécies de jatobá (*H. stigonocarpa*, *H. parvifolia*, *H. martiana*, *H. eriogyne*, *H. courbaril* e *H. aurea*).

Tabela 4. Projeções de acréscimo (+) ou perda (-) 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.

<i>Hymenaea aurea</i>								
		SSP245			SSP585			
Abrangência	Período Base	2041–2060	2061–2080	2081–2100	2041–2060	2061–2080	2081–2100	
	(Km ²)							
Amazônia	600.250,27	+0,67	-11,51	-30,64	-11,69	-49,10	-89,05	
Caatinga	743.184,56	+13,25	+12,95	+12,46	+12,46	+10,82	+3,16	
Cerrado	743.184,56	+19,88	+14,33	+25,85	+21,87	+21,88	+4,83	
Mata Atlântica	483.162,12	-63,45	-60,89	-59,26	-60,43	-54,97	-53,77	

Pampa	35.451,69	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00
Pantanal	13.183,26	-84,54	-94,08	-78,45	-88,82	-98,36	-99,96
Total	2.618.763,39	-3,93	-7,96	-8,83	-5,89	-13,96	-29,92

Hymenaea courbaril

			SSP245			SSP585		
Abrangênci a	Período (Km²)	Base	2041– 2060	2061– 2080	2081– 2100	2041– 2060	2061– 2080	2081– 2100
Amazônia	3.270.293,94		-23,03	-22,93	-28,13	-25,83	-38,93	-76,78
Caatinga	863.481,80		-12,40	-14,35	-17,44	-14,98	-24,38	-49,99
Cerrado	2.071.116,05		-21,51	-26,10	-27,69	-24,35	-40,60	-75,47
Mata Atlântica	807.843,24		-54,27	-51,85	-56,72	-52,76	-56,84	-69,24
Pampa	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pantanal	148.810,38		-78,86	-85,43	-85,78	-83,21	-97,14	-100,00
Total	7.161.545,41		-25,99	-27,37	-31,14	-28,32	-40,89	-72,80

Hymenaea eriogyne

			SSP245			SSP585		
Abrangênci a	Período (Km²)	Base	2041– 2060	2061– 2080	2081– 2100	2041– 2060	2061– 2080	2081– 2100
Amazônia	214.553,21		-99,96	-99,96	-99,96	-99,96	-99,98	-100,00
Caatinga	845.788,48		-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00
Cerrado	924.671,20		-99,96	-100,00	-99,99	-100,00	-100,00	-100,00
Mata Atlântica	56.570,93		-99,77	-99,73	-99,85	-99,73	-99,85	-99,85
Pampa	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pantanal	4.575,11		-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00
Total	2.046.159,93		-99,97	-99,99	-99,99	-99,99	-99,99	-99,99

Hymenaea martiana

			SSP245			SSP585		
--	--	--	--------	--	--	--------	--	--

Abrangênci a	Período (Km²)	Base	2041– 2060	2061– 2080	2081– 2100	2041– 2060	2061– 2080	2081– 2100
Amazônia	821.720,36		-93,83	-98,29	-99,59	-98,37	-99,99	-100,00
Caatinga	851.512,79		-89,72	-92,51	-94,40	-92,37	-97,00	-99,55
Cerrado	1.941.885,42		-86,36	-91,89	-94,54	-91,41	-98,02	-99,86
Mata Atlântica	587.847,60		-95,16	-95,28	-96,47	-95,67	-97,67	-99,70
Pampa	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pantanal	133.241,99		-84,59	-94,60	-97,27	-92,74	-100,00	-100,00
Total	4.366,208		-89,57	-93,77	-95,82	-93,54	-98,21	-99,81

Hymenaea parvifolia

			SSP245			SSP585		
Abrangênci a	Período (Km²)	Base	2041– 2060	2061– 2080	2081– 2100	2041– 2060	2061– 2080	2081– 2100
Amazônia	3.424.611,80		-31,49	-30,89	-31,05	-31,86	-38,05	-62,81
Caatinga	131,355,57		-98,83	-98,91	-99,03	-99,11	-99,39	-99,79
Cerrado	1.130.486,17		-86,38	-87,75	-89,60	-87,97	-92,19	-96,68
Mata Atlântica	42.065,00		-14,23	-7,37	-18,40	-22,73	-25,10	-41,08
Pampa	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pantanal	17,086,20		-49,24	-53,43	-58,12	-53,68	-89,85	-100,00
Total	4.745.605,73		-46,34	-46,19	-46,87	-47,09	-52,72	-71,84

Hymenaea stigonocarpa

			SSP245			SSP585		
Abrangênci a	Período (Km²)	Base	2041– 2060	2061– 2080	2081– 2100	2041– 2060	2061– 2080	2081– 2100
Amazônia	1.558,725,26		-43,81	-54,60	-70,85	-57,58	-90,86	-99,96
Caatinga	820.376,01		-49,63	-57,12	-63,82	-58,31	-76,41	-93,02
Cerrado	2.060.252,87		-29,68	-39,42	-47,77	-38,47	-66,84	-93,90

Mata Atlântica	705.629,62	-61,01	-59,51	-64,32	-61,17	-68,36	-87,87
Pampa	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pantanal	149.894,53	-11,15	-23,65	-27,12	-22,70	-52,12	-98,89
Total	5.294.878,29	-40,57	-48,86	-58,67	-49,73	-75,17	-94,89

A biodiversidade da Amazônia e de outros domínios fitogeográficos brasileiros enfrenta ameaças crescentes devido à mudança climática e ao desmatamento acelerado (Arruda, 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 modelagem de nicho ecológico para prever 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 nos próximos décadas.

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 nos cenários mais pessimistas (SSP585) (IPCC, 2021). Por outro lado, espécies como *H. courbaril* e *H. aurea*, mais associadas a ambientes úmidos, tendem a manter melhor 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 *et al.*, 2019), enquanto a sazonalidade da precipitação influencia diretamente a sobrevivência em períodos de seca (Allan *et al.*, 2010; Tan *et al.*, 2015; 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 (Carvalho, 2011).

Os impactos das mudanças climáticas sobre a 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 nas áreas de adequabilidade ambiental, enquanto a Amazônia permanece como um refúgio para algumas espécies. No cenário SSP585, a projeção é de perda superior a 70% das áreas de ocorrência para a maioria das espécies, indicando risco de extinção local.

Além do impacto ecológico, a perda dessas espécies pode gerar 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.

Estratégias de preservação como a utilização das espécies em sistemas agroflorestais com as espécies do gênero *Hymenaea* podem contribuir para soluções práticas sustentáveis do uso da terra em áreas agrícolas baseada nas práticas ancestrais indígenas, ribeirinhas e caboclas (Silva *et al.*, 2019; Miccolis, *et al.*, 2017).

A utilização de espécies nativas na recuperação de áreas degradadas vem ganhando notoriedade por trazer diversos benefícios como alta adaptabilidade ao clima, produção de alimentos para espécies de animais locais (Demartelaere, *et al.*, 2022; Schneider, *et al.*, 2023; Rodrigues, *et al.*, 2023).

Para ambas as estratégias citadas e muitas outras, há uma dependência da produção de mudas para os plantios. Assim, o incentivo à produção de mudas nativas é considerado uma outra estratégia de preservação de espécies (Rodrigues, *et al.*, 2023).

Os dados apresentados evidenciam a urgência da implementação de estratégias de conservação e manejo sustentável, especialmente nos domínios Amazônia, Cerrado e 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 (MAPBIOMAS, 2024). A integração entre políticas de conservação e uso sustentável dos recursos naturais pode garantir a manutenção dessas espécies no longo prazo, minimizando os impactos da mudança climática sobre a flora brasileira.

6. CONCLUSÕES

O nicho ecológico das espécies *Hymenaea stigonocarpa*, *Hymenaea parvifolia*, *Hymenaea martiana*, *Hymenaea eriogyne*, *Hymenaea courbaril* e *Hymenaea aurea* apresenta ampla distribuição nos domínios fitogeográficos brasileiros, com maior concentração na Amazônia, Cerrado e Caatinga. Essas regiões demonstram alta adequabilidade ambiental para a ocorrência dessas espécies no presente, ressaltando sua importância para a conservação do gênero.

As projeções futuras indicam uma redução significativa das áreas adequadas para essas espécies, mesmo sob um cenário climático menos pessimista, embora as taxas de perda se mantenham relativamente constantes ao longo do tempo. No cenário mais crítico, a retração das áreas propícias ocorre de forma acelerada, intensificando-se progressivamente e sinalizando um declínio severo da distribuição do gênero *Hymenaea*.

Diante desse panorama, recomenda-se priorizar ações de conservação na Amazônia, Cerrado e Caatinga, regiões que apresentam maior adequabilidade ambiental tanto no presente quanto no futuro e possuem relevante importância ecológica, social, cultural e econômica para o gênero. Os esforços devem ser concentrados especialmente em *H. parvifolia* e *H. courbaril*, devido à sua ampla distribuição e maior valor para as comunidades locais. Estratégias eficazes de manejo e preservação são essenciais para mitigar os impactos das mudanças climáticas e assegurar a manutenção dessas espécies nos ecossistemas brasileiros.

7. REFERÊNCIAS

- AIELLO-LAMMENS, M. E.; BORJA, R. A.; RADOSAVLJEVIC, A.; VILELA, B.; ANDERSON, R.P. SpThin: an r package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. **Ecography**, v. 38, n. 5, p. 541-545, 2015.
- ALBERT, J. S., CARNAVAL, A. C., FLANTUA, S. G., LOHMANN, L. G., RIBAS, C. C., RIFF, *et al.* Human impacts outpace natural processes in the Amazon. **Science**, v. 379(6630), eabo5003, 2023.
- ALMEIRA, D. P.; LOPES, R.; BEZERRA, C. S.; TOMAZ, J. S.; SOUZA, S. F.; RAMOS, S. L. F.; *et al.* Climate change impact on modeling the distribution of ornamental species in brazilian territory. **Interciencia**, v. 49, n. 9, p. 527-534, 2024.
- ALLAN, R. P; SODEN, B. J; JOHN, V. O; INGRAM, W.; GOOD, P. Current changes in tropical precipitation. **Environmental Research Letters**, v. 5, n. 2, p. 025205, 2010.
- ALLOUCHE, O.; TSOAR, A.; KADMON, R. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (tss). **Journal Of Applied Ecology**, v. 43, n. 6, p. 1223-1232, 2006.
- AMARAL, L. A.; FERREIRA, R. A.; MANN, R. S. O uso de modelagem de distribuição de espécies para restauração florestal: Uma revisão sistemática. **Research, Society and Development**, v 10, n. 8, e46610817158, 2021.
- ANDERSON, Robert P.; GONZALEZ JR, Israel. Species-specific tuning increases robustness to sampling bias in models of species distributions: an implementation with Maxent. **Ecological Modelling**, v. 222, n. 15, p. 2796-2811, 2011
- ANDRADE, A. F. A.; VELAZCO, S. J. E.; MARCO JÚNIOR, P. ENMTML: an r package for a straightforward construction of complex ecological niche models. **Environmental Modelling & Software**, v. 125, p. 104615, 2020.
- ARRUDA, D. M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FONSECA, R. S.; FERNANDES-FILHO, E. I.; VELOSO, G. V.; GOMES, L. C.; *et al.* Vegetações amazônicas e terras indígenas ameaçadas pelas próximas mudanças climáticas: Previsão de impacto nos biomas brasileiros. **Austral Ecology**, v. 48, n. 1, e13394, 2023.

- BABUSHKINA, E.; ZHIRNOVA, D.; BELOKOPYTOVA, L.; VAGANOV, E. Warming induced changes in wood matter accumulation in tracheid walls of spruce. **Journal of Mountain Science**, v. 17, p. 16-30. 2020.
- BALDRIAN, P.; LÓPEZ-MONDÉJAR, R.; KOHOUT, P.. Forest microbiome and global change. **Nature Reviews Microbiology**, v. 21, n. 8, p. 487-501, 2023.
- BEGOVIĆ, K. RYDAL, M.; MIKAC, S.; CUPIC, S.; SVOBODAVA, K.; MIKOLAS, M.; *et al.* Climate-growth relationships of Norway Spruce and silver fir in primary forests of the Croatian Dinaric mountains. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 288-289, 108000, 2020.
- BENJAMIM, J. K. F., COSTA, K. A. D., SANTOS, A. S. Chemical, Botanical and Pharmacological Aspects of Leguminosae. **Pharmacognosy Reviews**, v. 14, n. 28, 2020.
- BORTOLOTTI, I. M., DE SOUZA, P. R., POTT, A., DAMASCENO-JUNIOR, G. A. Wild Food plants of the Pantanal: past, present, and future. **Flora and vegetation of the pantanal wetland**, pp. 689-738, 2022.
- 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(2), P. 124-131, 2023.
- BRITO, T. R. C.; LIMA, J. R. S.; OLIVEIRA, C. L.; SOUZA, R. M. S.; ANTONIO, A. C. D.; MEDEIROS, E. V.; *et al.* Mudanças no Uso da Terra e Efeito nos Componentes do Balanço Hídrico no Agreste Pernambucano. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v 13, n. 02, p. 870-886, 2020.
- CABALLERO, C. B., RUHOFF, A., BIGGS, T. Land use and land cover changes and their impacts on surface-atmosphere interactions in Brazil: A systematic review. **Science of The Total Environment**, V. 808, 152134, 2022.
- 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, 158858, 2023.
- CARVALHO, P. E. R. Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidades e uso de madeira. Brasília. Brasília: **Embrapa-Cnpf/Spi**, p. 639, 2011.

CENTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DA FLORA (CNCFlora).

Hymenaea parvifolia. Disponível em: <http://cncflora.ibrij.gov.br/portal/ptbr/profile/Hymenaea%20parvifolia>. Acesso em: 7 fev. 2025.

COHEN, J. A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Educational And Psychological Measurement*, v. 20, n. 1, p. 37-46, 1960.

CORDEIRO, A. L.; TOMAZ, J. S.; BEZERRA, C. S.; MENESES, C. H. S. G.; AGUIAR, A. V.; WREGE, M. S.; *et al.* Prediction of the geographic distribution and conservation of Amazonian Palm Trees *Astrocaryum acaule* Mart. and *Astrocaryum aculeatum* Mart. **Árvore**, v. 47, e4719, 2023.

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.

CRESPO, A. M., SOUZA, M. N., SILVA, M. A. B. Ciclo do carbono e sistemas agroflorestais na sustentabilidade da produção agrícolas: revisão de literatura. **Incaper em Revista**, v. 13 e 14, p. 6-19, 2023.

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* Linneaus) occurring in the brazilian cerrado: a review. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 1, p. e22612139812, 2023.

CRUZ, J. E. R., SADANHA, H. C., NASCIMENTO, A. M., BORGES, R. B., GOMES, M. S.; FREITAS, G. R. O., *et al.* Jhonatas Emílio Ribeiro da et al. Evaluation of the Antioxidant, Antimicrobial, and Anti-Biofilm Effects of the Stem Bark, Leaf, and Seed Extracts from *Hymenaea courbaril* and Characterization by UPLC-ESI-QTOF-MS/MS Analysis. **Antibiotics**, v. 12, n. 11, p. 1601, 2023.

CYSNEIROS, V. C., JÚNIOR, J. O. M., LANZA, T. R., MORAES, J. C. R., SAMOR, O. J. M. Espécies madeireiras da Amazônia: riqueza, nomes populares e suas peculiaridades. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, e201801567, p 1-14, 2018.

DAMBROWSKI, V.; MARENZI, R. C. Modelos de nicho ecológico de espécies arbóreas como estratégia para seleção de áreas para a conservação da biodiversidade. **Boletim Gaúcho de Geografia**, v. 50, n 1, 2023.

- DANIELE-SILVA, A., TENÓRIO, C. J. L., RODRIGUES, J. R. C., TORRES-RÊGO, M., CAVALCANTI, F. F., FERREIRA, S. S., *et al.* Anti-inflammatory and antiophidic effects of extract of *Hymenaea eriogyne* benth and structure-activity relationship prediction of the major markers in silico. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 335, p. 118619, 2024.
- DAMARTELAERE, A. C. F., FEITOSA, S. S., LEÃO, F. S. N., COSTA, B. P. Revisão bibliográfica: impactos em áreas nativas da caatinga causadas pelas atividades econômicas e as técnicas de reflorestamento. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 4, p. 25085-25306, 2022.
- DE MENEZES REBELLO, K.; DE ALMEIDA, G. S. S.; DE BRITO, G. R. Modelagem de distribuição de *Moquiniastrium oligocephalum* (Gardner) G. Sancho (Asteraceae: Gochnatieae) para a Bahia, Brasil. **Peer Review**, v. 5, n. 19, p. 414-428, 2023.
- DICK, M., DA SILVA, M. A., DA SILVA, R. R. F., FERREIRA, O. G. L., MAIA, M. S., DE LIMA, *et al.* Climate change and land use from Brazilian cow-calf production amidst diverse levels of biodiversity conservation. **Journal of Cleaner Production**, v. 342, 130941, 2022.
- DORMANN, C. F. *et al.* Model averaging in ecology: A review of Bayesian, information-theoretic, and tactical approaches for predictive inference. **Ecological monographs**, v. 88, n. 4, p. 485-504, 2018.
- 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.
- FIELDING, A. H.; BELL, J. F. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. **Environmental Conservation**, v. 24, n. 1, p. 38-49, 1997.
- FILARDI, F. L. R.; BARROS, F. D.; BAUMGRATZ, J. F. A.; BICUDO, C. E.; CAVALCANTI, T. B.; COELHO, *et al.* Brazilian Flora 2020: innovation and collaboration to meet Target 1 of the Global Strategy for Plant Conservation (GSPC). **Rodriguésia**, v. 69, p. 1513-1527, 2018.
- 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, 2019.

GIBSON, E. L., SOARES, R. N., MAGALHÃES, A. P., LOBATO, F. S., SILVA, P. H. F., COSTA, G. G., *et al.* Biometria, germinação e danos em sementes de *Hymenaea parvifolia* Huber. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 7, e17911729790-e17911729790, 2022.

GOMES, L. M.; BEZERRA, C. S.; AGUIAR, A. V.; WREGE, M. S.; LOPES, M. T. G. Prediction of the natural distribution and conservation of *Urena lobata* L. in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 52, 2023.

GONZAGA, L. N. N., MORAIS, O. P. D., COELHO, A. S. G., GONZAGA, A. F. N., CHAVES, L. J. Quantitative genetic characterization of an in vivo germplasm collection of *Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 24, n. 1, p. e437724111, 2024.

GUÉGAN, J., DE THOISY, B., GOMEZ-GALLEGO, M., JACTEL, H. World forests, global change, and emerging pests and pathogens. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v61, p. 101266, 2023.

GUISAN, A. W., THUILLER, W.; ZIMMERMANN, N. E. **Habitat Suitability and Distribution Models**. With Applications in R Camb. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.

HE, J.; LU, K.; FOSU, B.; FUEGLISTALER, S. A. Diverging hydrological sensitivity among tropical basins. **Nature Climate Change**, p. 1-2, 2024.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). *Jatobá*. Disponível em: <https://madeiras.ipt.br/jatoba/>. Acesso em: 7 fev. 2025.

IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, 2022.

JONES, M. W., ABATZOGLOU, J. T., VERAVERBEKE, S., ANDELA, N., LASSLOP, G., FORKEL, M., *et al.* Global and regional trends and drivers of fire under climate change. **Reviews of Geophysics**, V. 60, n. 3, p. e2020RG000726, 2022.

LAPOLA, D. M., PINHO, P., BARLOW, J., ARAGÃO, L. E., BERENGUER, E., CARMENTA, R., *et al.* The drivers and impacts of Amazon forest degradation. **Science**, v. 379, n. 6630, p. eabp8622, 2023.

- 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.
- LIAN, X., JIAO, L., LIU, Z., JIA, Q., LIU, W., LIU, Y. A detection of street trees and green space: Understanding contribution of urban trees to climate change mitigation. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 102, p. 128561, 2024.
- MAPBIOMAS. Destaques RAD 2023. **MAPBIOMAS ALERTA**. 2024.
- MARQUES, M. J.; BEZERRA, C. S., TOMAZ, J. S.; LOPES, R.; WREGE, M. S.; AGUIAR, A. V.; *et al.* Predicton of geographic distribution and ecological niche modeling of açaí palm trees in the Amazon. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 54, p. e78108, 2024.
- MELO-MERINO, S. M.; REYES-BONILLA, H., LIRA-NORIEGA, A. Ecological niche models and species distribution models in marine environments: a literature review and spatial analysis of evidence. **Ecological Modelling**, v. 415, p. 108837, 2020.
- MICCOLIS, A., PENEIREIRO, F. M., VIEIRA, D. L. M., MARQUES, H. R., HOFFMANN, M. R. M. Restoration Through agroforestry: Option for reconciling Livelihoods with conservation in the Cerrado and Caatinga Biomes in Brazil. **Experimental Agriculture**, v. 55, n s1, p. 208-255, 2019.
- MONTEVERDE, C.; DE SALES, F.; JONES, C. Evaluation of the CMIP6 performance in simulating precipitation in the Amazon River basin. **Climate**, v. 10, n. 8, p. 122, 2022.
- NEVES-BRADES, A. F., NOVELLO, B. Q., DOMINGUES, G. D. A. F., BARROS, C. F., TAMAIO, N. Endangered species account for 10% of Brazil's documented timber trade. **Journal for Nature Conservation**, V. 55, p. 125821, 2020.
- NUNES, E.N., DA SILVA RIBEIRO, J.E., SOUZA, R.S., DE QUEIROZ, R.T., da Cruz, D.D., DE LUCENA, R.F.P. *Hymenaea courbaril* L. Fabaceae. In: Farias Paiva de Lucena, R., Dias da Cruz, D. (eds) Ethnobotany of the Mountain Regions of Brazil. **Ethnobotany of Mountain Regions**. Springer, 2022.
- OLIVEIRA W. L., MEDEIROS, M. B., MOSER, P., PINHEIRO R., OLSEN, L. B. Regeneração e estrutura populacional de jatobá-da-mata (*Hymenaea courbaril* L.), em dois fragmentos com diferentes graus de perturbação antrópica. **Acta Botânica Brasilica**, v. 25, n. 4, p. 876–884, 2011.

- PACHECO, A. G. M., PACHECO, E. J., MACEDO, L. A. R. O., SILVA, J. C., LIMA-SARAIVA, S. R. G., BARROS, V. P., *et al.* Antinociceptive and anti-inflammatory activities of *Hymenaea martiana* Hayne (Fabaceae) in mice. **Brazilian Journal of Biology**, v. 82, p. e240359, 2021.
- PALEARI, L. M. Jatobá. **Frutas e seus frugívoros**, p. 121-126, 2017.
- PALOMO-KUMUL, J.; VALDEZ-HERNÁNDEZ, M.; ISLEBE, G. A.; CACH-PÉREZ, Manuel 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.
- PIMENTEL, F. C.; ALVES, C. C. F.; FORIM, M. R.; MATOS, A. P.; CUNHA, G. O. S.; CAZAL, C. D. M. Chemical composition and antifungal activity of the essential oil from the *Hymenaea stigonocarpa* Mart. Ex Hayne (jatobá-do-cerrado) fruit peel. **Natural Product Research**, v. 38, n. 11, p. 1945-1949, 2024.
- 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, pp. 253-294, 2020.
- PINTO, R. B.; TOZZI, A. M. G. A.; MANSANO, V. F. *Hymenaea*. In: FLORA DO BRASIL 2020. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB22971>. Acesso em: 5 jan. 2025.
- PRASAD, J. *et al.* Influence of integrated nutrient management on yield and soil properties in maize-wheat cropping system in an Alfisol of Jharkhand. **Journal of the Indian Society of Soil Science**, v. 58, n. 2, p. 200-204, 2010.
- QUINTÃO, J. M. B.; CANTINHO, R. Z.; ALBUQUERQUE, G. M.; MARACAHIPES, LBUSTAMANTE, M. M. C. Mudança do uso e cobertura da terra no Brasil, emissões de GEE e políticas em curso. **Ciência e Cultura**, v. 73, n. 1, p. 20-29, 2021.
- R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>, 2024.
- RIBEIRO, O. D., CRUZ, E. D., SILVA, M. F. D., CHAVES, B. D. A., RIBEIRO, O. M. D., GURGEL, E. S. C. *Hymenaea parvifolia* Huber: dormancy breaking, morphology of fruit, seed and seedling. **Revista Ceres**, v. 68, n. 2, p. 105-114, 2021.

- RODRIGUES, L. J.; JÚNIOR, A. F. M.; MANVAILER, L. P.; CARDOSO, M. P.; FROTA, O. P. Óleos, plantas e frutas do bioma cerrado utilizado na alimentação humana. **Perspectivas Experimentais e Clínicas, Inovações Biomédicas e Educação em Saúde (PECIBES)**, v. 7, n. 1, p. 2-12, 1 jul. 2021.
- RODRIGUES, F. C. W., CAMPOS, M. C. C., BERGAMIN, A. C., SILVA, M. N. S., LIMA, R. A., SANTOS, R. V. A importância da produção de mudas de essências florestais na região Amazônica: uma revisão sistemática. **Faema**, v. 14, n 1, p. 10-24, 2023.
- ROY, P. S., RAMACHANDRAN, R. M., PAUL, O., RHAKUR, P. K., RAVAN, S., BEHERA, M. D., *et al.* Anthropogenic land use and land cover changes—A review on its environmental consequences and climate change. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 50, n. 8, p. 1615-1640, 2022.
- SÁNCHEZ-FERNÁNDEZ, D.; LOBO, J. M.; HERNÁNDEZ-MANRIQUE, O. L. Species distribution models that do not incorporate global data misrepresent potential distributions: a case study using iberian diving beetles. *Diversity And Distributions*, v. 17, n. 1, p. 163-171, 2010.
- 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, p. e192022, 2024.
- SCARAMUSSA, L., SOARES, A., SANTANA, A. Extracts from jatobá (*Hymenaea courbaril* L.) peel and seeds: Antioxidant and antimicrobial activities and synergistic effect of extract combinations. **Food Science and Technology International**, v. 30, n. 2, p. 128-136, 2022.
- SCNEIDER, C. R., ANGELO, D. H., ANGELO, A. C., BEHLING, A., RÍOS, R. C., BLUM, C. T. Espécies, práticas silviculturais e monitoramento: estratégias para restauração ecológica de áreas protegidas da Mata Atlântica. **Ciência Florestal**, v. 33, v. 4, 2023.
- SILVA, E. B. R., SILVA, W. C., SOUZA, E. D. V., GATO, A. P. C., ARAUJO, L. J. S. Sistemas agroflorestais como alternativa agroecológica: revisão. **Puvet**, v. 13, n. 2, p. 1-6, 2019.
- SILVA, L. F., SOUZA, N. F., SOUZA, N. F. D., ROCHA, N. S. Impactos das ações antrópicas aos Biomas do Brasil: artigo de revisão. **Meio Ambiente (Brasil)**, v. 4, n. 1, p. 21-44, 2022.

SILVA, D., ROSARIO, M., MATOS, M. L., JARDIM, I. Uso De Esterco Bovino Proporciona Melhores Mudanças De Jatobá (*Hymenaea courbaril* L.). **Agrarian Academy**, v. 10(19), p. 50-61, 2023.

SILVA, E. L.; ROCHA, Q. A. Implicações da modelagem de nicho ecológico na distribuição e conservação de espécies: revisão de literatura. **Contribuciones a Las Ciencias Sociales**, v. 17, n. 5, p. 01-19, 2024.

SOUZA, I.; FUNCH, L.; QUEIROZ, L. Flora da Bahia: Leguminosae – Hymenaea (Caesalpinioideae: Detarieae). **Sitientibus: Série Ciências Biológicas**, v. 16, 2016.

SOUZA, I. M.; FUNCH, L. S. Synchronization of leafing and reproductive phenological events in *Hymenaea* L. species (Leguminosae, Caesalpinioideae): the ¹ role of photoperiod as the trigger. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 40, n. 1, p. 125-136, 2017.

SOUZA, S. F., KASPER, A. A. M., DE SOUZA JUNIOR, J. J. V., COSTA, I. C. G., SARTORATTO, A., MOUTINHO, V. H. P., *et al.* Análise fitoquímica e atividade antimicrobiana do extrato etanólico do resíduo madeireiro de *Hymenaea courbaril* L. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 11, n. 4, p. 72-80, 2020.

SOUZA-SILVA, D., FREITAS V. D., DIAS, P. D. BIOMETRIA E QUALIDADE FISIOLÓGICA DE SEMENTES DE *Hymenaea stigonocarpa*. **Revista Agrotecnologia**, v. 13, n. 1, 2022.

SOUZA, L. V. C., ZANATTA, B., SIQUEIRA, A., PEREIRA, B. L. C., LENGOWSKI, E. C., OLIVEIRA, A. C. Physical, mechanical, and combustion properties of twelve wood species from the Brazilian Amazon. **Maderas: Ciencia y tecnología**, v. 27, n. 1, p. 2, 2025.

TAN, J.; JAKOB, C.; ROSSOW, W. B.; TSELIODIS, G. Increases in tropical rainfall driven by changes in frequency of organized deep convection. *Nature*, v. 519, n. 7544, p. 451-454, 2015.

TOMAZ, J. S.; BEZERRA, C. S.; AGUIAR, A. V.; WREGE, M. S.; LOPES, M. T. G. Prediction of the natural distribution, habitat and conservation of *Stryphnodendron pulcherrimum* (Willd.) Hochr. in response to global climate change. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 52, e72422, 2022.

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, p. 117353, 2023.

VELAZCO, S. J. E. et al. Using worldwide edaphic data to model plant species niches: An assessment at a continental extent. **PLoS One**, v. 12, n. 10, p. e0186025, 2017.

ZHENG, B., CIAIS, P., CHEVALLIER, F., YANG, H., CANADELL, J. G., CHEN, Y., *et al.* Record-high CO₂ emissions from boreal fires in 2021. **Science**, v. 379, n. 6635, p. 912-917, 2023.

WICKHAM, H.; WICKHAM, M. H. **Package tidyverse**. Easily install and load the ‘Tidyverse’, 2017. <https://www.tidyverse.org>.

WREGE, M. S.; FRITZSONS, E.; SOARES, M. T. S.; BOGNOLA, I. A.; DE SOUSA, V. A.; DE SOUSA, L. P, et al. Distribuição natural e habitat da araucária frente às mudanças climáticas globais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 91, p. 331-346, 2017.

8. ANEXOS

ANEXO 1. Valores de autovetores dos nove componentes principais (PC) das variáveis bioclimáticas e edáficas utilizados no processo de modelagem de nicho ecológico das espécies.

variable	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10	PC11	PC12	PC13
bdod30 (Densidade Aparente)	0,01335	-0,3024	-0,1062	0,09689	-0,011	0,13155	-0,15496	0,1088	-0,14089	0,06918	-0,19732	0,06265	0,77005
bio01	0,25012	-0,13408	-0,02052	0,01888	0,08171	-0,02059	-0,04546	0,12862	-0,00793	0,11363	-0,02341	-0,0591	-0,05824
bio02	-0,16078	-0,18664	0,00703	0,08859	-0,40193	-0,14524	-0,13518	-0,08989	-0,04111	0,18831	-0,08945	-0,4689	-0,16462
bio03	0,19871	0,03839	0,28746	0,07518	-0,11552	0,25729	-0,03016	0,1659	-0,0907	-0,04853	0,11423	-0,3536	-0,10408
bio04	-0,21098	-0,05189	-0,31267	-0,08929	-0,01008	-0,05455	0,00782	-0,18523	0,03619	0,18108	-0,09788	0,1493	-0,02445
bio05	0,18832	-0,22586	-0,16908	-0,01247	0,07135	-0,07955	-0,10782	-0,01921	-0,00114	0,26614	-0,04906	-0,14784	-0,12461
bio06	0,26304	-0,04979	0,04605	0,0019	0,16107	0,06933	-0,01564	0,11959	-0,01403	0,03413	0,02751	-0,02985	-0,02117
bio07	-0,21236	-0,12999	-0,21795	-0,0139	-0,16937	-0,17155	-0,07381	-0,19034	0,01929	0,1887	-0,08372	-0,08905	-0,08083
bio08	0,21858	-0,16375	-0,09236	0,07646	-0,01294	-0,05603	-0,0917	0,20644	-0,05213	0,18599	-0,09847	-0,01921	0,04936

bio09	0,2494	-0,07391	0,06948	-0,03656	0,1812	0,04824	-0,00161	0,03328	0,01813	0,02405	0,04278	-0,08785	-0,13422
bio10	0,21952	-0,17933	-0,15315	-0,01552	0,11083	-0,03544	-0,05592	0,06431	0,0017	0,21701	-0,06048	-0,01767	-0,08007
bio11	0,25861	-0,09202	0,06619	0,03807	0,07605	0,00239	-0,0384	0,14545	-0,01662	0,04624	0,00999	-0,09056	-0,03932
bio12	0,23216	0,15252	-0,01574	-0,07458	-0,17983	-0,00991	-0,14035	-0,16414	0,03451	0,00064	0,01174	0,04015	0,04088
bio13	0,23602	0,08351	0,10999	0,01131	-0,09483	-0,14991	-0,1996	-0,25857	0,09159	-0,03484	-0,03399	0,08348	0,05951
bio14	0,12662	0,22669	-0,18592	-0,20823	-0,26758	0,28643	0,03168	0,06955	-0,05238	0,11688	-0,09589	-0,03833	0,08463
bio15	-0,03757	-0,17633	0,35342	0,25228	-0,01363	-0,22425	-0,30251	-0,03134	-0,07623	-0,05848	-0,27811	0,0657	0,00687
bio16	0,23719	0,08598	0,10129	0,00228	-0,10689	-0,15391	-0,20313	-0,25666	0,08918	-0,04474	-0,01026	0,08624	0,05307
bio17	0,13619	0,22998	-0,17832	-0,2048	-0,25654	0,2729	0,01901	0,04707	-0,05109	0,12145	-0,08513	-0,03733	0,07435
bio18	0,14751	0,11882	-0,11704	0,01274	-0,48316	-0,26417	0,00969	0,32262	0,01644	-0,07861	0,01963	0,21798	0,01971
bio19	0,16802	0,14583	0,03576	-0,10786	0,10778	0,24477	-0,20906	-0,54508	0,03604	0,16544	-0,08629	-0,07788	0,03994
cec30 (Capacidade de troca)	-0,16728	0,16491	-0,18987	0,09293	0,22615	0,12126	-0,07055	0,11774	-0,1219	0,02198	0,04503	-0,39521	0,08548

cfvo30 (fragmentos grossos)	-0,16704	0,08588	0,29759	0,03261	0,09834	0,33848	-0,09035	-0,03517	-0,11786	0,15084	-0,26593	0,20351	-0,04154
clay30 (argila)	0,15351	0,06708	-0,04364	0,34865	0,00173	0,01195	0,53855	-0,10094	0,24321	-0,0093	-0,5107	-0,08991	0,00044
elevation	-0,16104	0,07675	0,31152	0,19996	-0,34066	0,1493	-0,0177	0,00691	-0,07034	-0,02512	-0,00489	-0,19495	0,11783
nitrogen30	-0,05227	0,31203	0,00848	-0,00568	0,18831	-0,17885	-0,17758	0,18394	-0,04074	-0,00821	-0,18432	0,05151	0,1624
ocd30 (densidade de carbono)	-0,05273	0,32049	-0,01958	0,06113	0,20188	-0,27222	-0,05046	-0,03157	0,05554	0,10019	0,02791	-0,20307	0,12922
ocs30 (estoque de carbono)	0,00104	0,32438	-0,07666	0,12594	0,10718	-0,24399	-0,04898	0,0156	0,08854	0,06182	0,12229	-0,3079	0,23024
phh2o30	-0,23567	-0,10369	-0,07215	-0,01637	0,05191	0,15455	-0,08737	0,05496	-0,11982	0,1185	-0,12571	-0,00212	-0,14603
sand30	-0,11923	-0,10505	0,22343	-0,54191	0,01357	-0,09989	-0,14042	0,11468	0,09049	0,05009	0,09456	-0,08247	0,09918
silt30	0,03723	0,09385	-0,28839	0,48228	-0,02161	0,13599	-0,2789	-0,07713	-0,35209	-0,06545	0,32117	0,20188	-0,14612
slope1 (declividade)	-0,07464	0,19135	0,25826	0,17733	-0,02772	-0,02934	0,08239	0,16458	0,15285	0,75503	0,20517	0,26461	-0,02549
soc30 (Conteudo de carbono)	-0,00608	0,28617	-0,04986	-0,13837	0,05673	-0,10422	-0,24807	0,24136	-0,23096	-0,0565	-0,49716	0,03612	-0,33514

wrb (classes e -0,11458 -0,0231 -0,14908 0,15856 -0,01031 0,28379 -0,41646 0,21217 0,7785 -0,13829 -0,03111 0,008 -0,08343
probabilidade)

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 (mm); 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); CTC = capacidade de troca catiônica no pH 7 (mmol(c)/kg); FGV = fragmentos grossos volumétricos (cm³/dm³); DCO = densidades de carbono orgânico (hg/m³); ECOS = estoque de carbono orgânico do solo (t/ha); CCO = conteúdo de carbono orgânico do solo (dg/kg); CB = classes e probabilidades "World Reference Base.

