



## **Impacto da Mudança Climática na Distribuição e Conservação de Camu-camu**

## **Impact of Climate Change on the Distribution and Conservation of Camu-camu**

## **Impacto del Cambio Climático en la Distribución y Conservación del Camu-camu**

Caroline Bogo Rota<sup>1</sup>

Maria José Marques<sup>2</sup>

Jennifer Souza Tomaz<sup>3</sup>

Caroline de Souza Bezerra<sup>4</sup>

Ricardo Lopes<sup>5</sup>

Santiago Linorio Ferreyra Ramos<sup>6</sup>

Carlos Henrique Salvino Gadelha Meneses<sup>7</sup>

Samuel Freitas de Souza<sup>8</sup>

Helinara Lais Vieira Capucho<sup>9</sup>

Maria Teresa Gomes Lopes<sup>10</sup>

<sup>1</sup> Graduada em Agronomia. Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Manaus, Amazonas, Brasil.

E-mail: [carolbogorota@gmail.com](mailto:carolbogorota@gmail.com) Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1146-257X>

<sup>2</sup> Doutora em Agronomia Tropical. Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Manaus, Amazonas, Brasil.

E-mail: [marquesfjm@gmail.com](mailto:marquesfjm@gmail.com) Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9399-8727>

<sup>3</sup> Doutora em Agronomia Tropical. Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Manaus, Amazonas, Brasil.

E-mail: [jennifer.tomaz@ufam.edu.br](mailto:jennifer.tomaz@ufam.edu.br) Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6612-2172>

<sup>4</sup> Doutora em Agronomia Tropical. Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Manaus, Amazonas, Brasil.

E-mail: [caroline.bezerra@ufam.edu.br](mailto:caroline.bezerra@ufam.edu.br) Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0380-4181>

<sup>5</sup> Doutor em Agronomia: Genética e Melhoramento de Plantas. Embrapa Amazônia Ocidental. Manaus, Amazonas, Brasil. E-mail: [ricardo.lopes@embrapa.br](mailto:ricardo.lopes@embrapa.br) Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5559-9685>

<sup>6</sup> Doutor em Agronomia: Genética e Melhoramento de Plantas. Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Manaus, Amazonas, Brasil. E-mail: [slfr@ufam.edu.br](mailto:slfr@ufam.edu.br) Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0364-316X>

<sup>7</sup> Doutor em Biotecnologia Vegetal e Bioprocessos. Estadual da Paraíba, Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, Departamento de Biologia. Campina Grande, Paraíba, Brasil.

E-mail: [carlos.meneses@servidor.uepb.edu.br](mailto:carlos.meneses@servidor.uepb.edu.br) Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8394-1305>

<sup>8</sup> Mestre em Ciências Florestais e Ambientais. Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Manaus, Amazonas, Brasil. E-mail: [sfs.florestal@gmail.com](mailto:sfs.florestal@gmail.com) Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9672-0197>

<sup>9</sup> Doutora em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade. Amazônia Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Manaus, Amazonas, Brasil. E-mail: [helinara.capucho@ufam.edu.br](mailto:helinara.capucho@ufam.edu.br)

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3010-9096>

<sup>10</sup> Doutora em Agronomia: Genética e Melhoramento de Plantas. Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Manaus, Amazonas, Brasil. E-mail: [mtglopes@ufam.edu.br](mailto:mtglopes@ufam.edu.br)





## Resumo

A mudança climática global impõe ameaças à biodiversidade, especialmente para espécies nativas da Amazônia como *Myrciaria dubia* (camu-camu), que se encontra em bioma sensível devido à sua dependência de ambientes de várzea e igapó. Este estudo teve como objetivo modelar a distribuição potencial da espécie em diferentes cenários climáticos futuros (SSP245 e SSP585), com base em 234 registros de ocorrência e 33 variáveis ambientais (bioclimáticas e edáficas). Para isso, foram aplicados cinco algoritmos de modelagem de distribuição de espécies (SDM), sendo o Random Forests o que apresentou melhor desempenho preditivo. Os resultados revelam uma redução expressiva nas áreas ambientalmente adequadas para *M. dubia*, sobretudo no cenário mais pessimista (SSP585), com perdas superiores a 49% da área atual. A Amazônia ocidental destaca-se como principal refúgio climático, enquanto outros domínios fitogeográficos, como Cerrado, Caatinga e Mata Atlântica, apresentaram severa perda de adequabilidade ambiental. As projeções indicam elevada vulnerabilidade da espécie à mudança climática, ressaltando a necessidade de estratégias integradas de conservação *in situ*, migração assistida e uso sustentável, especialmente em territórios com maior resiliência ambiental.

**Palavras-chave:** Amazônia. *Myrciaria Dubia*. Modelagem de Distribuição de Espécies (SDM). Conservação da Biodiversidade. Gestão da Biodiversidade. Gestão de Recursos Genéticos.

## Abstract

Global climate change poses threats to biodiversity, especially for native Amazonian species such as *Myrciaria dubia* (camu-camu), which is in a sensitive biome due to its dependence on lowland and igapó environments. This study aimed to model the potential distribution of the species in different future climate scenarios (SSP245 and SSP585), based on 234 occurrence records and 33 environmental variables (bioclimatic and edaphic). For this, five algorithms of species distribution modeling (SDM) were applied, and Random Forests presented the best predictive performance. The results show an expressive reduction in the environmentally suitable areas for *M. dubia*, especially in the most pessimistic scenario (SSP585), with losses greater than 49% of the current area. The western Amazon stands out as the main climatic refuge, while other phytogeographic domains, such as Cerrado, Caatinga and Atlantic Forest,

---

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1988-7126>





presented severe loss of environmental suitability. The projections indicate high vulnerability of the species to climate change, highlighting the need for integrated strategies of in situ conservation, assisted migration and sustainable use, especially in territories with greater environmental resilience.

**Keywords:** Amazon. *Myrciaria Dubia*. Species Distribution Modeling (SDM). Biodiversity Conservation. Biodiversity Management. Management of Genetic Resources.

## Resumen

El cambio climático global impone amenazas a la biodiversidad, especialmente para especies nativas del Amazonas como *Myrciaria dubia* (camu-camu), que se encuentra en bioma sensible debido a su dependencia de ambientes de várzea e igapó. Este estudio tuvo como objetivo modelar la distribución potencial de la especie en diferentes escenarios climáticos futuros (SSP245 y SSP585), sobre la base de 234 registros de ocurrencia y 33 variables ambientales (bioclimáticas y edáficas). Para ello, se aplicaron cinco algoritmos de modelado de distribución de especies (SDM), siendo el Random Forests el que presentó mejor rendimiento predictivo. Los resultados revelan una reducción expresiva en las áreas ambientalmente adecuadas para *M. dubia*, sobre todo en el escenario más pesimista (SSP585), con pérdidas superiores al 49% del área actual. La Amazonia occidental se destaca como principal refugio climático, mientras que otros dominios fitogeográficos, como el Cerrado, Caatinga y Mata Atlántica, presentaron severa pérdida de adecuación ambiental. Las proyecciones indican alta vulnerabilidad de la especie al cambio climático, destacando la necesidad de estrategias integradas de conservación in situ, migración asistida y uso sostenible, especialmente en territorios con mayor resiliencia ambiental.

**Palabras clave:** Amazonia. *Myrciaria Dubia*. Modelación de Distribución de Especies (SDM). Conservación de la Biodiversidad. Gestión de la Biodiversidad. Gestión de Recursos Genéticos.

## Introdução

Nas últimas décadas, as atividades antrópicas como a intensificação da emissão de gases de efeito estufa, o desmatamento e a expansão desordenada dos centros urbanos têm provocado alterações significativas nas condições edafoclimáticas em diversas regiões do





mundo. Essas alterações decorrem do aumento da temperatura e da irregularidade das chuvas (Arruda *et al.*, 2024; Oliveira *et al.*, 2024). As consequências desses processos abrangem a desestabilização dos ecossistemas, a degradação de habitats naturais e o aumento do risco de extinção de inúmeras espécies da flora e da fauna silvestres (Sullivan *et al.*, 2020).

Estudos recentes indicam que, nas últimas seis décadas, a temperatura média na região amazônica aumentou cerca de 1 °C, especialmente durante a estação seca, com elevações de até 2 °C em partes centrais e sudeste do bioma (Bottino *et al.*, 2024). Simulações climáticas projetam que, se esse aquecimento atingir 4 °C, extensas áreas da floresta poderão transitar para formações savânicas, processo conhecido como savanização, acompanhado por redução substancial da pluviosidade e ampliação do período seco (Flores *et al.*, 2024). Esse fenômeno representa uma ameaça crítica à biodiversidade, sobretudo para espécies endêmicas que dependem de condições edafoclimáticas restritas, cujo habitat natural pode ser irreversivelmente perdido (Bottino *et al.*, 2024).

Nesse contexto de mudanças climáticas aceleradas, a resiliência ecológica da floresta dependerá, em grande parte, da capacidade das espécies nativas de se adaptarem a novas condições ambientais. Plantas com tolerância a variações térmicas e hídricas poderão desempenhar um papel-chave na manutenção dos serviços ecossistêmicos, atuando como importantes recursos genéticos para estratégias de restauração e mitigação (Nobre *et al.*, 2023). Além disso, o uso sustentável dessas espécies pode incentivar práticas agroecológicas e econômicas que conciliem conservação e subsistência das populações locais, reduzindo pressões sobre ecossistemas mais sensíveis (Nobre *et al.*, 2023).

Diante desse cenário, a valorização de espécies nativas adaptadas a ambientes específicos, como as da floresta amazônica, é essencial tanto para a conservação da biodiversidade quanto para o desenvolvimento sustentável. Um exemplo é *Myrciaria dubia* (Kunth) McVaugh, espécie nativa da Amazônia que se destaca por suas propriedades nutricionais e bioativas. Popularmente conhecida como camu-camu, ocorre naturalmente às margens de rios e em áreas alagadas do Brasil, Peru e Colômbia, apresentando preferência por temperaturas entre 22 °C e 35 °C e precipitação anual de 1600 a 4000 mm. Na região amazônica, é tradicionalmente utilizada por populações locais há gerações, sobretudo por suas propriedades medicinais (Maqsood *et al.*, 2025). Além de seu valor nutricional, a espécie possui elevado potencial como recurso sustentável, contribuindo para a conservação ambiental, a valorização da sociobiodiversidade amazônica e a geração de renda às comunidades locais (Yunis-Aguinaga *et al.*, 2016). Sua crescente demanda internacional





relaciona-se à busca por alimentos funcionais, cosméticos naturais e suplementos dietéticos, inserindo o camu-camu no contexto global de produtos bioativos e sustentáveis (Ferreira *et al.*, 2021).

Segundo Conceição *et al.* (2019), os avanços em práticas agrícolas e em tecnologias de processamento podem ampliar a eficiência produtiva e favorecer a inserção de *M. dubia* em cadeias de valor sustentáveis. A espécie constitui um exemplo relevante de como o conhecimento tradicional pode ser integrado à ciência contemporânea, resultando em benefícios significativos para a saúde humana e para o desenvolvimento socioambiental. Contudo, mesmo que essa espécie não venha a perder completamente seu habitat natural, é plausível que sofra impactos significativos em sua qualidade e produtividade em decorrência das mudanças nas condições ambientais. Considerando o elevado teor de vitamina C como um de seus principais atributos nutricionais e comerciais, qualquer alteração nas variáveis climáticas pode comprometer seu potencial funcional e econômico.

Nesse cenário, torna-se imprescindível compreender os limites ecológicos da espécie frente às novas pressões ambientais. É nesse contexto que a modelagem de nicho ecológico (MNE) se destaca como uma ferramenta estratégica, ao permitir a integração de registros de ocorrência com variáveis ambientais como clima, solo e topografia para prever a distribuição potencial de *M. dubia*. Essa abordagem possibilita identificar as condições mais favoráveis ao desenvolvimento da espécie, bem como áreas com maior aptidão para conservação, manejo sustentável e expansão agrícola (Marques *et al.*, 2024). Dessa maneira, a MNE oferece subsídios valiosos para ações de planejamento territorial e adaptação frente às mudanças climáticas, contribuindo para a resiliência ecológica e a segurança alimentar de populações que dependem diretamente dos recursos da floresta (Capucho *et al.*, 2025).

O objetivo deste trabalho é aplicar técnicas de modelagem de distribuição de espécies para identificar as áreas potencialmente adequadas à ocorrência de *M. dubia* na região amazônica, considerando diferentes cenários climáticos.

### Metodologia

O conjunto de dados com as coordenadas geográficas do *M. dubia* foram delimitados para os domínios fitogeográficos brasileiros e obtidos durante o ano de 2025 no Laboratório de Melhoramento Vegetal da Universidade Federal do Amazonas (UFAM). O banco de dados consolidado integrou informações georreferenciadas referentes ao período de 1970 a 2025.





Esse intervalo temporal foi definido de modo a assegurar representatividade ampla das amostras em termos espaciais e temporais, além de reduzir possíveis inconsistências associadas a revisões taxonômicas e à precisão de registros mais antigos.

Estes dados foram obtidos a partir de bases de dados públicas, como o Centro de Referência de Informação Ambiental, na plataforma SpeciesLink (CRIA, 2025) e do Global Biodiversity Information Facility (GBIF, 2025). Além dessas fontes, foram incluídas coordenadas geográficas a partir de publicações científicas consultadas no levantamento bibliográfico da espécie, informações de dados de herbários virtuais como o Re flora (2025), artigos científicos com dados de populações naturais e de coleções da Universidade Federal do Amazonas e do Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia, permitindo ampliar a cobertura espacial dos registros e melhorar a representatividade das espécies na base de dados.

Para garantir a precisão e aumentar a confiabilidade das informações, os dados foram submetidos a um processo de limpeza e análises de consistência para excluir dados duplicados, *outliers* e informações incompletas. A verificação das coordenadas foi conduzida utilizando o pacote tidyverse no software R (Wickham & Wickham, 2017; R Core Team, 2025). Para evitar o viés de amostragem espacial, conforme recomendado por Aiello-Lammens *et al.* (2015), foi aplicado o pacote spThin, no software RStudio. Esse procedimento remove pontos de ocorrência muito próximos entre si, que poderiam gerar uma super-representação de determinadas áreas. E para isso, foi estabelecida uma distância mínima de 5 km entre os pontos, como critério para a filtragem. Dessa forma, o conjunto final originou uma base de dados consistente e espacialmente equilibrada, utilizada nas análises de modelagem da distribuição potencial e na elaboração das camadas ambientais referentes ao território brasileiro.

A modelagem da distribuição potencial baseou-se em variáveis ambientais que sintetizam os principais gradientes climáticos e edáficos vinculados à distribuição natural das espécies estudadas. Essa abordagem, amplamente consolidada em pesquisas ecológicas e biogeográficas (Andrade *et al.*, 2020; Morais *et al.*, 2024), possibilita estimar zonas ambientalmente adequadas à ocorrência das espécies a partir de registros confiáveis.

Dessa forma, foram utilizadas 33 variáveis ambientais que incluem aspectos climáticos e edáficos que são considerados essenciais para o crescimento e persistência das espécies vegetais. As 19 variáveis bioclimáticas utilizadas para a predição de distribuição de *M. dubia*, foram obtidas a partir da base de dados do Worldclim – Global Climate Data, que utiliza dados climáticos mensais espacialmente interpolados em uma escala global e em alta resolução





espacial (de 340 km<sup>2</sup> a 1 km<sup>2</sup>) (Fick & Hijmans, 2017). As variáveis consideradas incluem indicadores de temperatura (média, máxima e mínima) e precipitação (média e sazonal), derivadas de médias mensais correspondentes ao intervalo de 1970 a 2000. Esses parâmetros expressam a variação térmica, o padrão sazonal de precipitação e a disponibilidade hídrica, elementos determinantes para a distribuição espacial e os mecanismos adaptativos das espécies amazônicas.

As 14 variáveis edáficas foram obtidas do banco de dados SoilGrids, mantido pelo International Soil Reference and Information Centre (ISRIC – World Soil Information, 2024), considerando propriedades físicas e químicas do solo na profundidade de 15–30 cm. Esses parâmetros refletem a heterogeneidade edáfica e são fundamentais para compreender a relação entre fertilidade do solo e desempenho ecológico das espécies. Adicionalmente, foram incluídas duas variáveis topográficas, elevação e declividade, derivadas do banco de dados EarthEnv (ISRIC, 2024). Tais variáveis contribuem para caracterizar as condições geomorfológicas e microclimáticas, uma vez que a altitude e a inclinação do terreno influenciam a disponibilidade de água, luz e nutrientes no ambiente (Alvarez *et al.*, 2022).

Com o objetivo de minimizar a multicolinearidade entre os preditores ambientais e aprimorar a performance dos modelos de distribuição, foi realizada uma Análise de Componentes Principais (PCA) a partir do conjunto de dados ambientais históricos (1970–2000), utilizado como base para a modelagem. A análise incorporou simultaneamente as 33 variáveis ambientais, possibilitando uma avaliação integrada dos gradientes ecológicos e das interações entre fatores climáticos e do solo que influenciam a distribuição das espécies.

A análise de componentes principais (PCA) foi utilizada para reduzir a colinearidade entre variáveis e selecionar os eixos que explicaram 95% da variância total conforme as recomendações de Sánchez-Fernández *et al.* (2013) e Velazco *et al.* (2017). As cargas fatoriais associadas a cada variável permitiram identificar os eixos ambientais mais relevantes, que compuseram a estrutura final de modelagem. Essa etapa assegurou a redução da dimensionalidade e a eliminação de redundâncias entre os preditores, preservando a representatividade dos gradientes ambientais dominantes (Magalhães *et al.*, 2025).

Como não há projeções edáficas futuras disponíveis na mesma escala e formato das projeções climáticas, apenas os componentes relacionados às variáveis climáticas foram projetados para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. As variáveis de solo foram consideradas estáticas, com base na premissa de que apresentam alterações lentas ao longo do tempo e menor sensibilidade às mudanças nas emissões de gases de efeito estufa (Velazco *et al.*, 2017;

Alvarez *et al.*, 2022; Magalhães *et al.*, 2025). Dessa forma, o componente edáfico foi mantido constante nas simulações futuras, enquanto as condições climáticas foram atualizadas conforme cada cenário.

Essa abordagem metodológica garantiu coerência entre preditores estáticos e dinâmicos, resultando em um pipeline de modelagem preciso, capaz de integrar múltiplas dimensões de variabilidade ambiental de forma consistente (Evangelista-Vale *et al.*, 2021; Magalhães *et al.*, 2025).

A previsão dos dados climáticos para cenários futuros foi realizada com base nas projeções de mudanças climáticas do sexto relatório do IPCC (2023), utilizando dados climáticos reduzidos do Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6). Esses dados encontram-se disponíveis no WorldClim v2.1 e estão organizados em três períodos: 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100. São categorizados em dois cenários distintos dos *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP): o SSP245, é considerado o “menos pessimista”, onde assume-se que políticas de mitigação das emissões de gases de efeito estufa serão implementadas globalmente, e o cenário SSP585 “mais pessimista”, considera que não haverá estratégias para redução de emissões de gases de efeito estufa. Para as projeções atuais e futuras, foi utilizado o modelo de circulação atmosférica CNRM-CM6-1 do CNRM-CERFACS (Centro Nacional de Pesquisas Meteorológicas e Centro Europeu de Pesquisa e Formação Avançada em Cálculo Científico) (Velazco *et al.*, 2017; Andrade *et al.*, 2020).

A modelagem do nicho ecológico da espécie foi realizada no ambiente R, amplamente utilizado em análises estatísticas e ecológicas, por meio do pacote ENMTML (*Ecological Niche Models with TheMetaLand*), uma ferramenta consolidada para modelagem de nicho e distribuição de espécies (Andrade *et al.*, 2020). As análises foram executadas no RStudio (v.4.2), com base nos dados de ocorrência e nas variáveis ambientais previamente descritos.

Dessa forma, foram testados os algoritmos: Bioclim - BIO (Nix, 1986), Maximum Entropy - MXD (Anderson & Gonzalez, 2011), Random Forests - RDF (Prasad *et al.*, 2006), Support Vector Machine - SVM (Prasad *et al.*, 2006) e Generalized Linear Models – GLM, os quais permitiram gerar um modelo consenso a fim de selecionar o que apresentou melhor qualidade preditiva.

A avaliação dos modelos foi realizada utilizando sete métricas diferentes: a Área sob a curva (AUC) (Fielding & Bell, 1997), Kappa (Cohen, 1968), True Skill Statistic (Allouche *et al.*, 2006), Jaccard (Leroy *et al.*, 2018) e Sorensen (Leroy *et al.*, 2018). E foram considerados bons modelos aqueles com valores superiores a 0,7 em todas as métricas.



Com base nesses modelos, foram gerados mapas binários para a espécie-alvo, utilizando o consenso dos modelos que apresentaram boas métricas de avaliação e considerando os valores máximos de sensibilidade e especificidade (MX\_TSS).

## Resultados e Discussões

A espécie *M. dubia* apresentou, inicialmente, 771 registros de ocorrência e após o processo de limpeza e redução espacial dos dados de ocorrência da espécie, foi obtida uma matriz de ocorrência final com 234 registros, cerca de 30% dos dados obtidos, considerados confiáveis e representativos para as análises posteriores de modelagem da distribuição da ocorrência de *M. dubia* (Figura 1). Observou-se que *M. dubia* ocorre predominantemente nos domínios fitogeográficos da Amazônia e do Cerrado.

### Figura 1

*Pontos de ocorrência restritos aos domínios fitogeográficos brasileiros após análise de colinearidade e redução espacial de Myrciaria dubia.*

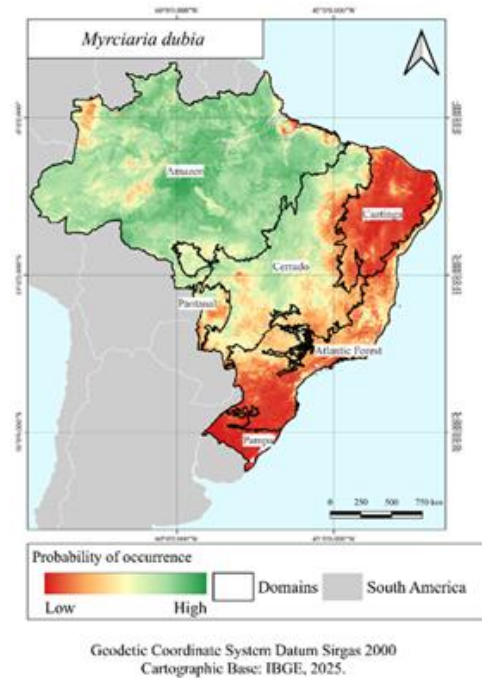


A projeção da distribuição atual (2009–2019) para *M. dubia* evidencia uma alta adequabilidade ambiental na Amazônia, com potencial de ocorrência também em áreas úmidas adjacentes ao Cerrado e Pantanal (Figura 2). Em contraste, domínios como Caatinga,

Pampa e porções da Mata Atlântica demonstram baixa adequabilidade climática, indicando restrição ecológica natural da espécie a ambientes tropicais úmidos (Figura 2).

## Figura 2

*Projeção da distribuição atual (2009-2019) para as espécies Myrciaria dubia.*



A análise de componentes principais (PCA) permitiu a identificação das variáveis ambientais em seis eixos (PC21, PC23, PC24, PC25, PC28 e PC31) (Tabela 1), com o objetivo de reduzir a multicolinearidade e identificar os gradientes mais relevantes na modelagem da distribuição potencial de *M. dubia*.

O PC21 destacou-se como componente edáfico, fortemente influenciado pelo carbono orgânico total ( $ocd30 = 0,70$ ), carbono orgânico superficial ( $ocs30 = -0,56$ ) e pH do solo ( $phh2o30 = -0,23$ ) (Tabela 1), refletindo um gradiente de fertilidade e acidez do solo. O PC23 está relacionado à sazonalidade térmica, com elevada contribuição da sazonalidade da temperatura ( $bio04 = 0,63$ ), isothermalidade ( $bio03 = 0,49$ ) e temperatura média do trimestre mais quente ( $bio10 = 0,24$ ), indicando a importância das amplitudes térmicas anuais na distribuição da espécie. O PC24 expressa um gradiente hídrico, com forte influência negativa da precipitação anual ( $bio12 = -0,72$ ) e contribuições positivas da precipitação nos meses mais úmido ( $bio13 = 0,43$ ) e mais seco ( $bio14 = 0,33$ ), sugerindo que a variação na disponibilidade hídrica é um fator limitante para a espécie. O PC25 representa a variação térmica em períodos úmidos, influenciado pela temperatura do mês ( $bio09 = -0,56$ ) e do trimestre mais úmido

(bio08 = -0,54), além da temperatura máxima do mês mais quente (bio05 = 0,37), revelando sensibilidade da espécie a temperaturas elevadas associadas à umidade. O PC28 está associado à sazonalidade da precipitação, com destaque para os trimestres mais úmido (bio16 = 0,56) e mais seco (bio17 = 0,50), em contraste com a precipitação do mês mais seco (bio14 = -0,35), o que reforça a relevância da regularidade hídrica ao longo do ano. Por fim, o PC31 é fortemente determinado pela temperatura média do trimestre mais frio (bio11 = 0,82) (Tabela 1), evidenciando a influência das temperaturas mínimas na adequabilidade ambiental da espécie, especialmente em regiões mais frias ou de maior altitude.

**Tabela 1**

*Valores de autovetores dos seis componentes principais (PC) das variáveis bioclimáticas e edáficas utilizados no processo de modelagem da distribuição de Myrciaria dubia.*

| <b>Componentes Principais</b> |             |             |             |             |             |             |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Variáveis</b>              | <b>PC21</b> | <b>PC23</b> | <b>PC24</b> | <b>PC25</b> | <b>PC28</b> | <b>PC31</b> |
| bio01                         | -0,02       | -0,01       | 0,01        | 0,14        | -0,12       | -0,21       |
| bio02                         | 0,06        | -0,19       | 0,11        | -0,11       | -0,07       | 0,00        |
| bio03                         | 0,17        | 0,49        | -0,15       | -0,03       | 0,03        | 0,01        |
| bio04                         | 0,06        | 0,63        | -0,10       | -0,18       | -0,07       | 0,37        |
| bio05                         | -0,04       | 0,06        | -0,13       | 0,37        | 0,17        | 0,00        |
| bio06                         | 0,00        | 0,01        | -0,05       | 0,20        | 0,05        | -0,01       |
| bio07                         | -0,03       | 0,04        | -0,04       | 0,05        | 0,08        | 0,00        |
| bio08                         | 0,10        | -0,13       | 0,16        | -0,54       | 0,04        | 0,01        |
| bio09                         | -0,15       | 0,09        | 0,15        | -0,56       | 0,02        | 0,00        |
| bio10                         | 0,01        | 0,24        | -0,09       | 0,16        | -0,11       | -0,37       |
| bio11                         | -0,02       | -0,18       | 0,02        | 0,20        | -0,05       | 0,82        |
| bio12                         | -0,07       | -0,21       | -0,72       | -0,21       | -0,38       | 0,01        |
| bio13                         | 0,03        | 0,13        | 0,43        | 0,08        | -0,31       | 0,00        |
| bio14                         | -0,01       | -0,05       | 0,33        | 0,13        | -0,35       | 0,00        |
| bio15                         | -0,08       | 0,01        | -0,13       | 0,00        | -0,01       | 0,00        |
| bio16                         | 0,00        | 0,00        | 0,13        | 0,00        | 0,56        | 0,00        |
| bio17                         | -0,01       | -0,07       | -0,14       | -0,06       | 0,50        | 0,00        |
| bio18                         | 0,04        | 0,06        | 0,01        | 0,06        | 0,02        | 0,00        |
| bio19                         | -0,03       | -0,05       | 0,05        | 0,02        | -0,01       | 0,00        |
| cec30                         | 0,02        | -0,03       | 0,04        | -0,02       | 0,00        | 0,00        |
| cfvo30                        | 0,07        | 0,01        | -0,02       | 0,01        | 0,00        | 0,00        |
| clay30                        | -0,02       | -0,01       | -0,03       | 0,00        | 0,00        | 0,00        |
| elevação                      | -0,08       | 0,17        | 0,00        | 0,09        | 0,01        | 0,00        |
| nitrogênio                    | -0,18       | 0,13        | -0,01       | 0,02        | 0,01        | 0,00        |
| ocd30                         | 0,70        | -0,12       | -0,06       | 0,00        | 0,00        | 0,00        |
| ocs30                         | -0,56       | 0,09        | 0,00        | -0,01       | -0,01       | 0,00        |
| phh2o30                       | -0,23       | -0,24       | 0,02        | 0,01        | 0,01        | 0,00        |
| sand30                        | -0,01       | 0,01        | 0,00        | 0,00        | 0,00        | 0,00        |
| silt30                        | 0,03        | -0,01       | 0,03        | 0,00        | 0,00        | 0,00        |
| slope1                        | -0,03       | -0,04       | 0,02        | -0,02       | 0,00        | 0,00        |
| soc30                         | 0,03        | 0,03        | 0,02        | 0,00        | 0,00        | 0,00        |
| wrb                           | 0,04        | -0,01       | 0,00        | 0,00        | 0,00        | 0,00        |
| bdod30                        | 0,08        | 0,02        | -0,02       | -0,01       | 0,00        | 0,00        |

Bio1–Bio19: variáveis bioclimáticas de temperatura e precipitação derivadas do WorldClim; variáveis edáficas e topográficas obtidas do SoilGrids, incluindo elevação (m), nitrogênio total (cg/kg), carbono orgânico total

(ocd30, g/kg), carbono superficial (ocs30, g/kg), carbono orgânico do solo (soc30, g/kg), pH em H<sub>2</sub>O (phh2o30), teor de areia (sand30, %), silte (silt30, %), declividade (slope1, %), densidade aparente (bdod30, cg/cm<sup>3</sup>) e classes de solo conforme a WRB.

Considerando os resultados das métricas de validação para os seis algoritmos utilizados na predição da distribuição de *M. dubia*, com base nas médias e os desvios padrão (DP) das métricas de desempenho: o modelo Random Forests (RDF) apresentou o melhor desempenho geral, com os maiores valores de AUC ( $0,98 \pm 0,01$ ), Kappa ( $0,87 \pm 0,04$ ), TSS ( $0,87 \pm 0,04$ ), Jaccard ( $0,88 \pm 0,03$ ) e Sorensen ( $0,94 \pm 0,02$ ), indicando alta capacidade preditiva e consistência nas classificações entre presença e ausência da espécie (Tabela 2).

Os modelos BIO, GAU e MXD também apresentaram desempenhos elevados, com valores de AUC variando entre 0,95 e 0,96, e métricas de Kappa, TSS e Jaccard entre 0,84 e 0,90. O modelo BIO, por exemplo, obteve Kappa e TSS de  $0,90 \pm 0,04$ , refletindo alto equilíbrio entre sensibilidade e especificidade. O modelo GLM teve desempenho levemente inferior às abordagens baseadas em aprendizado de máquina, embora ainda satisfatório, com AUC de  $0,95 \pm 0,01$  e TSS de  $0,85 \pm 0,03$ . O SVM, apesar de apresentar AUC elevada ( $0,96 \pm 0,01$ ), apresentou os menores valores entre os modelos para as métricas Kappa ( $0,83 \pm 0,01$ ), TSS ( $0,83 \pm 0,01$ ) e Jaccard ( $0,85 \pm 0,01$ ), o que pode indicar uma tendência ao superajuste ou sensibilidade reduzida em relação à variação espacial dos dados (Tabela 2). De modo geral, os resultados demonstram que todos os modelos avaliados apresentam alta capacidade de discriminar áreas adequadas e inadequadas para *M. dubia*, com destaque para o Random Forests, que se sobressaiu em todas as métricas analisadas, configurando-se como o algoritmo mais robusto para predição da distribuição potencial da espécie.

**Tabela 2**

*Indicadores e desvios-padrão (DP) empregados na validação de seis modelos preditivos da área potencial de ocorrência de Myrciaria dúbia.*

| Métricas         | BIO <sup>1</sup> | GAU <sup>2</sup> | GLM <sup>2</sup> | MXD <sup>3</sup> | RDF <sup>4</sup> | SVM <sup>5</sup> |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| AUC <sup>6</sup> | 0,95±0,02        | 0,96±0,01        | 0,95±0,01        | 0,96±0,01        | 0,98±0,01        | 0,96±0,01        |
| Kappa            | 0,90±0,04        | 0,84±0,03        | 0,85±0,03        | 0,84±0,06        | 0,87±0,04        | 0,83±0,01        |
| TSS <sup>7</sup> | 0,90±0,04        | 0,84±0,03        | 0,85±0,03        | 0,84±0,06        | 0,87±0,04        | 0,83±0,01        |
| Jaccard          | 0,90±0,04        | 0,86±0,02        | 0,86±0,03        | 0,85±0,04        | 0,88±0,03        | 0,85±0,01        |
| Sorensen         | 0,95±0,02        | 0,92±0,01        | 0,93±0,02        | 0,92±0,02        | 0,94±0,02        | 0,92±0,01        |

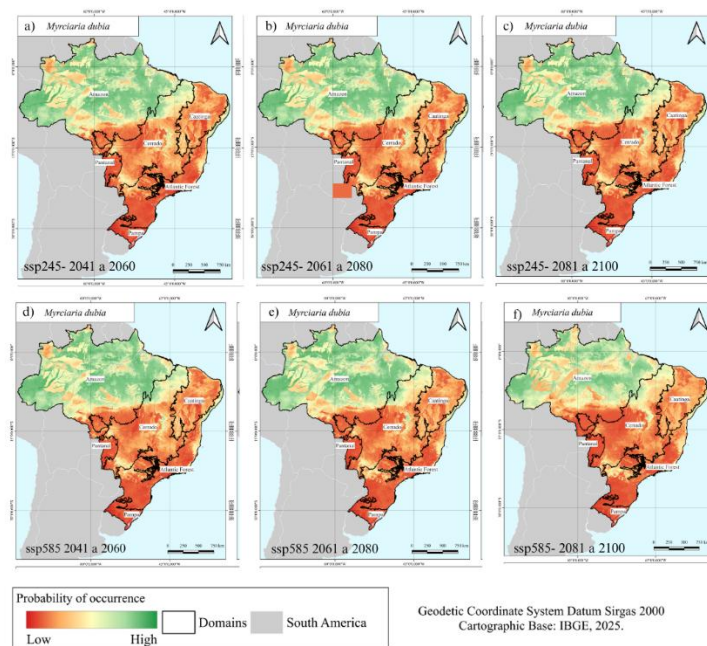
<sup>1</sup>BIO = <sup>2</sup>GAU = Bayesian Gaussian Process; <sup>3</sup>GLM = <sup>4</sup>MXD = Maximum Entropy Default; <sup>5</sup>RDF = Random Forests; <sup>6</sup>SVM = Support Vector Machine; <sup>7</sup>AUC = Area Under the Curve e <sup>8</sup>TSS = True Skill Statistics.

A partir das projeções da adequabilidade ambiental para *M. dubia* no território brasileiro, considerando dois cenários de mudança climática, o cenário intermediário

(SSP245) e o cenário mais pessimista (SSP585), ao longo de três intervalos temporais 2041–2060, 2061–2080 e 2081–2100, observa-se no cenário SSP245, relativa estabilidade na distribuição potencial da espécie até meados do século (Figura 3).

### Figura 3

*Projeção da adequabilidade ambiental para Myrciaria dubia no cenário climático menos pessimista SSP245 (a, b, c) e mais pessimista SSP585 (d, e, f) nos intervalos de tempo 2041-2060 (a, d), 2061-2080 (b, e) e 2081-2100 (c, f) nos domínios fitogeográficos brasileiros.*



No período de 2041–2060 (Figura 3a), a Amazônia, particularmente sua porção ocidental, permanece como a principal região de alta adequabilidade ambiental. Núcleos costeiros da Mata Atlântica setentrional também apresentam valores moderados a altos, ao passo que o Cerrado, a Caatinga e o Pantanal apresentam predominantemente baixa adequabilidade. No intervalo 2061–2080 (Figura 3b), há uma leve retração nas áreas adequadas da Amazônia oriental e nas faixas litorâneas, indicando início de fragmentação. No final do século 2081–2100 (Figura 3c), verifica-se um estreitamento das áreas de alta adequabilidade, restritas sobretudo à região noroeste da Amazônia (alto Solimões), enquanto os demais domínios passam a apresentar baixa ou nula adequabilidade ambiental para a espécie (Figura 3c).

No cenário SSP585, mais pessimista, que assume emissões mais intensas de gases de efeito estufa, os impactos projetados são significativamente mais severos. Já no primeiro



intervalo 2041–2060 (Figura 3d), a adequabilidade ambiental da espécie se torna mais restrita, com ampla perda de áreas adequadas na Amazônia e nos demais domínios. A tendência intensifica-se nos intervalos 2061–2080 e 2081–2100 (Figuras 3e,f), com o avanço de áreas de baixa adequabilidade em direção ao centro da Amazônia e praticamente desaparecimento das áreas verdes nos demais domínios. Ao final do século, apenas pequenos enclaves na Amazônia ocidental mantêm condições ambientais propícias à ocorrência da espécie.

A Amazônia mantém-se como o principal refúgio climático de *M. dubia* em todos os cenários analisados, embora apresente perdas progressivas de adequabilidade em suas porções leste e sul, especialmente sob o SSP585. O Cerrado, a Caatinga, o Pantanal e a Mata Atlântica tendem à inviabilidade ambiental até o final do século. Essas projeções indicam forte retração da distribuição potencial da espécie e reforçam a necessidade de estratégias de conservação *in situ* e manejo adaptativo, incluindo a criação de corredores ecológicos, a proteção de áreas de refúgio climático e a formação de bancos de germoplasma para migração assistida e uso sustentável da biodiversidade amazônica.

A análise evidencia a vulnerabilidade de *M. dubia* frente à mudanças climática futura e ressalta a importância de políticas públicas voltadas à mitigação das emissões globais de gases de efeito estufa. No entanto, mesmo sob o cenário intermediário, observa-se contração da área adequada para a espécie, indicando a urgência da adoção de medidas locais de adaptação e conservação. A manutenção da espécie no território brasileiro dependerá da integração entre conservação ambiental, pesquisa científica e políticas de uso sustentável da biodiversidade amazônica.

No cenário SSP245, observa-se uma redução geral na área total adequada, passando de 4.814.795 km<sup>2</sup> no período base para 3.040.086 km<sup>2</sup> em 2041–2060 (–36,9%), com pequenas variações negativas nos períodos seguintes (–37,3% em 2061–2080 e –36,9% em 2081–2100). A Amazônia, principal domínio de ocorrência da espécie, sofre uma redução significativa (–28,2% em 2041–2060), mas estabiliza nos períodos seguintes, sugerindo uma possível resiliência relativa da espécie nesse bioma sob condições moderadas de aquecimento. Em contrapartida, o Cerrado apresenta perdas drásticas, com reduções superiores a 74% em todos os períodos. Curiosamente, há um discreto aumento na Caatinga, com acréscimos que chegam a +51,9% em 2061–2080, possivelmente indicando um deslocamento da adequabilidade ambiental para áreas mais secas. A Mata Atlântica também mostra uma leve expansão até 2061–2080 (+16,5%), seguida de retração (Tabela 3).



**Tabela 3**

*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 Myrciaria dubia.*

| SSP245         |               |      |              |              |              |
|----------------|---------------|------|--------------|--------------|--------------|
| Abrangência    | Período (Km²) | Base | 2041 – 2060  | 2061 – 2080  | 2081 – 2100  |
| Amazônia       | 3.866.055,84  |      | 2.777.179,33 | 2.766.988,32 | 2.788.346,07 |
| Caatinga       | 1.712,96      |      | 2.233,35     | 2.601,96     | 2.450,18     |
| Cerrado        | 876.534,96    |      | 233.113,85   | 222.228,99   | 218.434,46   |
| Mata Atlântica | 25.260,69     |      | 27.428,99    | 29.423,82    | 26.605,03    |
| Pampa          | 0,00          |      | 0,00         | 0,00         | 0,00         |
| Pantanal       | 45.230,72     |      | 130,10       | 43,37        | 0,00         |
| Total          | 4.814.795     |      | 3.040.086    | 3.021.286    | 3.035.836    |
| SSP585         |               |      |              |              |              |
| Abrangência    | Período (Km²) | Base | 2041 – 2060  | 2061 – 2080  | 2081 – 2100  |
| Amazônia       | 3.866.055,84  |      | 2.807.860,76 | 2.807.860,76 | 2.273.288,27 |
| Caatinga       | 1.712,96      |      | 2.428,50     | 2.428,50     | 693,86       |
| Cerrado        | 876.534,96    |      | 220.537,71   | 220.537,71   | 128.341,63   |
| Mata Atlântica | 25.260,69     |      | 24.566,83    | 24.566,83    | 19.297,86    |
| Pampa          | 0,00          |      | 0,00         | 0,00         | 0,00         |
| Pantanal       | 45.230,72     |      | 21,68        | 21,68        | 0,00         |
| Total          | 4.814.795     |      | 3.055.415    | 3.055.415    | 2.421.622    |

No cenário mais pessimista (SSP585), observa-se uma redução ainda mais acentuada das áreas adequadas, com retração contínua da Amazônia e perda quase total de adequabilidade no Cerrado, Pantanal e Caatinga até o final do século. As projeções confirmam que o camu-camu tende a permanecer restrito à Amazônia Ocidental, evidenciando sua alta vulnerabilidade climática (Tabela 3).

O camu-camu por ser uma espécie nativa de várzeas e igapós amazônicos, representa um recurso estratégico para a bioeconomia e conservação da sociobiodiversidade regional, por permitir a geração de produtos devido ao seu elevado teor de vitamina C e compostos antioxidantes (García-Chacón *et al.*, 2024). Contudo, os cenários de mudança climática global indicam forte risco de perda de habitats adequados para a espécie, decorrente do aumento das temperaturas médias e da irregularidade das chuvas na Amazônia (Arruda *et al.*, 2024; Bottino *et al.*, 2024). A modelagem de distribuição potencial desenvolvida neste estudo confirma essa tendência, evidenciando que *M. dubia* poderá perder até 49 % de suas áreas ambientalmente adequadas até 2100, sobretudo no cenário mais pessimista de emissões (SSP5-8.5), permanecendo restrita à Amazônia Ocidental, nas bacias do alto Solimões e do Purus.



Estudos recentes reforçam que a vulnerabilidade do *M. dubia* às alterações climáticas está intimamente associada não apenas à temperatura e à precipitação, mas também à degradação edáfica e ao manejo inadequado das várzeas (Santos *et al.*, 2024). Essa relação entre fatores climáticos e composição fitoquímica sugere que a perda de habitats adequados poderá impactar tanto a produtividade quanto o valor funcional da espécie, comprometendo cadeias produtivas emergentes ligadas à bioeconomia amazônica.

Esses resultados reforçam a urgência de ações integradas de conservação *in situ*, migração assistida e manejo participativo para minimizar impactos climáticos sobre a espécie. A Amazônia Ocidental atua como principal refúgio climático, enquanto o Cerrado e a Caatinga tendem à quase total inviabilidade até o fim do século. O cenário SSP2-4.5 sugere relativa estabilidade até 2060, seguida de redução gradual ( $\approx 37\%$ ) da adequabilidade, ao passo que o SSP5-8.5 projeta perdas superiores a 49 % e forte fragmentação da distribuição em 2081-2100. As variáveis mais determinantes da adequabilidade ambiental foram o carbono orgânico do solo (ocd30), a sazonalidade térmica e a precipitação anual, o que evidencia a dependência da espécie de solos férteis e altamente úmidos. Tais relações indicam que alterações no regime hídrico e na fertilidade do solo poderão afetar diretamente a produtividade e o teor de vitamina C dos frutos (Maqsood *et al.*, 2025).

As evidências recentes de diversidade genética revelam ampla variação intraespecífica em *M. dubia*, especialmente quanto ao teor de ácido ascórbico e à tolerância a estresses ambientais. A disponibilização de novos microssatélites (SSR) por Castro *et al.* (2024) possibilitou a seleção de genótipos adaptados a diferentes condições edafoclimáticas, subsidiando a criação de bancos de germoplasma e coleções centrais na Amazônia peruana e brasileira, fundamentais para programas de migração assistida e manejo adaptativo de genótipos resistentes ao aquecimento e à deficiência hídrica. Estudos complementares também apontam que a plasticidade química e a variabilidade nos compostos bioativos conferem à espécie potencial de resiliência fisiológica, reforçando sua importância em sistemas agroflorestais sustentáveis (Ferreira *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2024; Pineda-Lázaro *et al.*, 2024).

A abordagem participativa na conservação do camu-camu é igualmente determinante, pois integra saberes tradicionais e científicos. Comunidades ribeirinhas do Alto Solimões e Ucayali identificam e selecionam genótipos mais produtivos, contribuindo para a manutenção da diversidade local (Leandro *et al.*, 2024). Essas práticas devem ser incorporadas em planos de conservação *in situ* e *on farm*, com incentivo à criação de bancos comunitários de sementes





e à implantação de sistemas agroflorestais (SAFs) que integrem espécies amazônicas de alto valor, como açaí, cupuaçu e taperebá (Pineda-Lázaro *et al.*, 2024). Além do benefício ecológico, a conservação participativa promove geração de renda sustentável e reduz a dependência de práticas extrativistas. Programas de ciência cidadã, formação técnica local e certificação de origem fortalecem a autonomia das comunidades e garantem sua inclusão socioprodutiva nas cadeias de valor da bioeconomia amazônica (Pineda-Lázaro *et al.*, 2024), configurando uma estratégia de conservação da biodiversidade aliada à justiça socioambiental.

O presente estudo reforça que a redução de áreas adequadas projetada sob SSP2-4.5 e SSP5-8.5 representa uma ameaça concreta à resiliência populacional da espécie. A plasticidade ecológica observada, capacidade de frutificar em terra firme e manter produção mesmo fora de várzeas, pode oferecer vantagem adaptativa, mas não compensa integralmente a perda projetada de habitats. A combinação entre erosão genética, fragmentação e pressões antrópicas (fogo, desmatamento, barragens) já observadas em Rondônia agrava esse cenário, ressaltando a importância de refúgios climáticos e de políticas integradas de uso do solo (Leandro *et al.*, 2024).

A redução das áreas climáticas adequadas projetada neste estudo reflete um risco de erosão genética e perda de serviços ecossistêmicos associados a *M. dubia*, espécie que desempenha fundamental importância na estabilização de margens fluviais e na oferta de recursos alimentares para a fauna aquática e terrestre. Nesse contexto, estratégias de conservação integradas são fundamentais, entre elas a conservação *in situ*, com proteção de populações naturais em ambientes alagáveis da Amazônia ocidental, que devem funcionar como refúgios climáticos prioritários. A conservação *ex situ* e sistemas agroflorestais sustentáveis, associando o cultivo de *M. dubia* e outras espécies nativas em sistemas de uso múltiplo, promovendo renda e serviços ecossistêmicos (Leandro *et al.*, 2024).

Os resultados desta pesquisa evidenciam que *M. dubia* é altamente suscetível aos impactos da mudança climática sob cenários mais extremos e que a sua conservação requer ações combinando abordagens ecológicas, genéticas e socioeconômicas. A integração entre modelagem preditiva, caracterização fenotípica e manejo participativo representa um caminho promissor para garantir a persistência da espécie e o fortalecimento da bioeconomia amazônica. Assim como observado para espécies como cacaueiro e o cupuaçuzeiro (Magalhães *et al.*, 2025), o camu-camu reafirma a importância de políticas públicas voltadas à restauração de ecossistemas e ao uso sustentável da biodiversidade regional. A integração





entre modelagem climática, diversidade genética e química e o aproveitamento integral da biomassa de *M. dubia* posiciona a espécie como modelo emblemático da bioeconomia amazônica de baixo carbono, alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 12 e 15.

### Conclusão

A integração entre modelagem climática, genética da conservação e participação comunitária constitui a via mais eficaz para garantir a persistência de *Myrciaria dubia* frente às mudanças climáticas. As projeções indicam acentuada redução das áreas ambientalmente adequadas sob cenários de aquecimento, reforçando a necessidade de planejamento territorial, conservação *in situ* e estratégias de migração assistida. O fortalecimento de coleções de germoplasma e o uso sustentável da espécie em sistemas agroflorestais contribuem para a adaptação climática e para a valorização da sociobiodiversidade amazônica. Esse modelo de conservação integrado é essencial para assegurar a sobrevivência do camu-camu e a manutenção dos serviços ecossistêmicos da floresta tropical.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Edital nº. 16/2020 - PROCAD- SPCF, Processo Número: 88881.516217/2020-01 e Edital nº 16/2022 - Programa de Desenvolvimento da Pós-Graduação (CAPES-PDPG) Pós-doutorado Estratégico, Processo número: 88887.692247/2022-00. Os autores também desejam agradecer ao CNPq por fornecer a bolsa de produtividade em pesquisa que permitiu completar esta pesquisa: Carlos Henrique Salvino Gadelha Meneses (Processo no. 306943/2025-5); Santiago Linorio Ferreyra Ramos (Processo no. 305280/2022-8); Ricardo Lopes (Processo no. 308815/2023-8) e Maria Teresa Gomes Lopes (Processo no. 306943/2025-5).





## Referências

- Aiello-Lammens, M. E., Boria, R. A., Radosavljevic, A., Vilela, B., & Anderson R. P. (2015). SpThin: an r package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. *Ecography*, 38(5), 541-545. <https://doi.org/10.1111/ecog.01132>
- Allouche, O., Tsoar, A., & Kadmon, R. (2006). Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa, and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, 43(6), 1223-1232. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01214.x>
- Alvarez, F., Morandi, P. S., Marimon-Junior, B. H., Exavier, R., Araújo, I., Mariano, L. H., Muller, A. O., Felpausch, T. R., & Marimon, B. S. (2022). Climate defined but not soil-restricted: the distribution of a Neotropical tree through space and time. *Plant Soil*, 471, 175-191. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05202-6>
- Anderson, R. P., & Gonzalez Júnior, I. (2011). Species-specific tuning increases robustness to sampling bias in models of species distributions: an implementation with Maxent. *Ecological Modelling*, 222(15), 2796-2811. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.04.011>
- Andrade, A. F. A. D., Velazco, S. J. E., & De Marco Júnior, P. (2020). ENMTML: An R package for a straightforward construction of complex ecological niche models. *Environmental Modelling & Software*, 125, 104615. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104615>
- Arruda, D. M., Schaefer, C. E. G. R., Fonseca, R. S., Fernandes-Filho, E. I., Veloso, G. V., Gomes, L. C., Oliveira, F. S., Corrêa, G. R., Espírito-Santo, M. M., Oliveira, G. C., & Solar, R. R. C. (2024). Vegetações amazônicas e terras indígenas ameaçadas pelas próximas mudanças climáticas: Previsão de impacto nos biomas brasileiros. *Austral Ecology*, 49(1), e13394. <https://doi.org/10.1111/aec.13394>
- Bottino, M. J., Nobre, P., Giarolla, E., da Silva Junior, M. B., Capistrano, V. B., Malagutti, M., Tamaoki, J. N., Oliveira, B. F. A., & Nobre, C. A. (2024). Amazon savannization and climate change are projected to increase dry season length and temperature extremes over Brazil. *Scientific Reports*, 14(1), 5131. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55176-5>
- Capucho, H. L. V., Bezerra, C. S., Tomaz, J. S., Souza, S. F., Lopes, R., Ramos, S. F. L., & et al. (2025). Modelagem de nicho ecológico para conservação de *Manilkara huberi* (Ducke) A. Chev. em cenários de mudanças climáticas. *Nativa*, 13(1), 144-155. <https://doi.org/10.31413/nat.v13i1.18574>
- Castro, J. C., Vasquez-Guizado, S. J., Vigil, B. E., Ascue, F., Rojas-Villa, N., Paredes, J. D., ... & Maddox, J. D. (2024). Development and application of microsatellite markers for genetic diversity assessment and construction of a core collection of *Myrciaria dubia* (Kunth) Mcvaugh germplasm from the peruvian Amazon. *Forests*, 15(11), 1873. <https://doi.org/10.3390/f15111873>
- Centro de Referência e Informação Ambiental (CRIA) (2025, janeiro 05). SinBiota: sistema de informação ambiental do Programa Biota/FAPESP. Recuperado em 05 de janeiro, 2025, de <http://www.biotasp.org.br/sia/>





- Cohen, J. (1968). Weighted kappa: Nominal scale agreement provision for scaled disagreement or partial credit. *Psychological Bulletin*, 70(4), 213-220.
- Conceição, N., Albuquerque, B. R., Pereira, C., Corrêa, R. C. G., Lopes, C. B., Calhelha, R. C., Alves, M. J., Barros, L., & C. F. R. Ferreira, I. (2020). By-Products of Camu-Camu [*Myrciaria dubia* (Kunth) McVaugh] as Promising Sources of Bioactive High Added-Value Food Ingredients: Functionalization of Yogurts. *Molecules*, 25(1), 70. <https://doi.org/10.3390/molecules25010070>
- Evangelista-Vale, J. C., Weihs, M., José-Silva, L., Arruda, R., Sander, N. L., Gomides, S. C., Machado, T. M., Pires-Oliveira, J. C., Barros-Rosa, L., Castuera-Oliveira, L., Matias, R. A. M., Martins-Oliveira, A. T., Bernardo, C. S. S., Silva-Pereira, I., Carnicer, C., Carpanedo, R. S., & Eisenlohr, P. V. (2021). Climate change may affect the future of extractivism in the Brazilian Amazon. *Biological Conservation*, 257, 109093. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109093>
- Ferreira, G. A. C., Barnett, A. P. A., & Krug, C. (2021). Phenology and fruit set comparison of camu-camu (*Myrciaria dubia*) in a natural population and a plantation in the central Amazon, Brazil. *Acta Amazonica*, 51, 91-101.
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Fielding, A. H., & Bell, J. F. (1997). A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence model. *Environmental Conservation*, 24, 38-49. <https://doi.org/10.1017/S0376892997000088>
- Flores, B. M., Montoya, E., Sakschewski, B., Nascimento, N., Staal, A., Betts R. A., & et al. (2024). Critical transitions in the Amazon forest system. *Nature*, 626, 555-564. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06970-0>
- García-Chacón, J. M., Rodríguez-Pulido, F. J., Heredia, F. J., González-Miret, M. L., & Osorio, C. (2024). Characterization and bioaccessibility assessment of bioactive compounds from camu-camu (*Myrciaria dubia*) powders and their food applications. *Food Research International*, 176, 113820. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113820>
- Global Biodiversity Information Facility (GBIF) (2025, janeiro 05). Occurrence download. 2025. Recuperado em 05 de janeiro, 2025, de <https://www.gbif.org/pt/occurrence/search>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change: the physical science basis. (2024, março 28). Recuperado em 28 de março, 2024, de <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
- Leandro, R. C., Chagas, E. A., Lima Feitosa, I., & Aragón, S. (2024). Potential Vulnerability of Natural Populations of Camu-camu (*Myrciaria dubia*) to Anthropogenic Stressors in Southwestern Amazon. *Revista Delos*, 17(53), e1370. <https://doi.org/10.55905/rdelosv17.n53-032>
- Leroy, B., Delsol, R., Hugueny, B., Meynard, C. N., Barhoumi, C., Barbet-Massin, M., & Bellard, C. (2018). Without quality presence-absence data. discrimination metrics such







- as TSS can be misleading measures of model performance. *Journal of Biogeography*, 45, 1994–2002. <https://doi.org/10.1111/jbi.13402>
- Magalhães, L. L., Tomaz, J. S., Souza Bezerra, C., Lopes, M. T. G., Lopes, R., Souza, S. F., ... & Ramos, S. L. F. (2025). Climate Change Threatens the Geographic Distribution of Cupuaçu More Than Cacao: Insights from Ecological Modeling in Brazil. *Ethnobiology and Conservation*, 14(31), 1-20. <https://doi.org/10.15451/ec2025-09-14.31-1-18>
- Maqsood, S., Arshad, M. T., Ikram, A., & Gnedeka, K. T. (2025). Nutritional Composition, Pharmacological Properties, and Industrial Applications of *Myrciaria dubia*: An Undiscovered Superfruit. *Food Science & Nutrition*, 13(6), e70331. <https://doi.org/10.1002/fsn3.70331>
- Marques, M. J., Bezerra, C. de S., Tomaz, J. S., Lopes, R., Wrege, M. S., Aguiar, A. V. de, Ramos, S. L. F., Meneses, C. H. S. G., Fraxe, T. de J. P., & Lopes, M. T. G. (2024). Predição de distribuição geográfica e modelagem de nicho ecológico de açazeiros na Amazônia. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 54, e78108. <https://doi.org/10.1590/1983-40632024v5478108>
- Morais, I. L. L., Lima, A. A., Santos, I. N. L., Meneses, C., Silva, R. F., Lopes, R., Ramos, S. L. F., Aguiar, A. V., Wrege, M. S., Lopes, M. T. G. (2024). Climate Change Impact on the Distribution of Forest Species in the Brazilian Amazon. *Sustainability*, 16, 3458. <https://doi.org/10.3390/su16083458>
- Nix, H. A. (1986). A biogeographic analysis of Australian elapid snakes. *Atlas of Elapid Snakes of Australia*. Australian Government Publishing Service, Canberra, ACT: ed R. Longmore, 4–15.
- Nobre, C. A., Sampaio, G., Borma, L. S., Castilla-Rubio, J. C., Silva, J. S., & Cardoso, M. (2016). Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(39), 10759-10768. <https://doi.org/10.1073/pnas.1605516113>
- Pineda-Lázaro, A. J., Vallejos-Tapullima, A., Hernández-Amasifuen, A. D., Carballar-Hernández, S., Imán-Correa, S., Carvajal-Vallejos, F. M., ... & Corazon-Guivin, M. A. (2024). Arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Myrciaria dubia* in the Amazonia Region, Peru. *Advances in Agriculture*, 2024(1), 9977517. <https://doi.org/10.1155/2024/9977517>
- Prasad, A. M., Iverson, L. R., & Liaw, A. (2006). Newer Classification and Regression Tree Techniques: Bagging and Random Forests for Ecological Prediction. *Ecosystems*, 9, 181–199. <https://doi.org/10.1007/s10021-005-0054-1>
- R Core Team. (2025, março 19). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria; 2024. Recuperado em 19 de março, 2025, de <https://www.R-project.org/>
- Santos, O. V., Rosário, R. C., & Teixeira-Costa, B. E. (2024). Sources of carotenoids in amazonian fruits. *Molecules*, 29(10), 2190.
- Sullivan, M. J. P., Lewis, S. L., Affum-Baffoe, K., Castilho, C., Costa, F., Sanchez, A. C., & et al. (2020). Long-term thermal sensitivity of Earth's tropical forests. *Science*, 368(6493), 869–874. doi: <https://doi.org/aaw7578>





- Velazco, S. J. E., Galvão, F., Villalobos, F., Marco Júnior, P. D. (2017). Using worldwide edaphic data to model plant species niches: An assessment at a continental extent. PLoS ONE, 12, e0186025. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186025>
- Wickham, H., Wickham, M.H. (2017, julho 04). Package tidyverse. Easily install and load the “Tidyverse”. World Soil Information (ISRIC) (2024) SoilGrids — global gridded soil information. Recuperado em 04 de julho, 2025, de <https://www.isric.org/explore/soilgrids>
- Yunis-Aguinaga, J., Fernandes, D. C., Eto, S. F., Claudiano, Paulo F Marcusso, P. F., Marinho-Neto, F. A., & et al. (2016). Dietary Camu Camu, Myrciaria dubia, Enhances Immunological Response in Nile Tilapia. Fish & Shellfish Immunology, 58, 284–291. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2016.08.030>.

Received: 10.24.2025

Accepted: 11.20.2025

