



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

BRENO FURTADO BELLOTTI PORTES

**MODELAGEM DA ADEQUABILIDADE DE HABITAT ATUAL E FUTURA
DE *Euterpe edulis* Mart. NA MATA ATLÂNTICA**

Prof. Dr. BRUNO ARAUJO FURTADO DE MENDONÇA
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
JUNHO – 2026



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

BRENO FURTADO BELLOTTI PORTES

**MODELAGEM DA ADEQUABILIDADE DE HABITAT ATUAL E FUTURA
DE *Euterpe edulis* Mart. NA MATA ATLÂNTICA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Florestal, como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Florestal, Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Prof. Dr. BRUNO ARAUJO FURTADO DE MENDONÇA
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
JUNHO – 2026

**MODELAGEM DA ADEQUABILIDADE DE HABITAT ATUAL E FUTURA
DE *Euterpe edulis* Mart. NA MATA ATLÂNTICA.**

BRENO FURTADO BELLOTTI PORTES

APROVADA EM: 26/06/2026.

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 **BRUNO ARAUJO FURTADO DE MENDONÇA**
Data: 30/06/2026 08:44:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. BRUNO ARAUJO FURTADO MENDONÇA – UFRRJ
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **TIAGO BOER BREIER**
Data: 30/06/2026 10:59:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. TIAGO BÖER BREIER – UFRRJ
Membro

Documento assinado digitalmente
 **EMANUEL JOSE GOMES DE ARAUJO**
Data: 01/07/2026 19:00:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. EMANUEL JOSÉ GOMES DE ARAÚJO - UFRRJ
Membro

SEROPÉDICA, RJ
JUNHO – 2026

“Sobre os ombros de gigantes” ...

Sr. Isaac Newton.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à toda comunidade da Rural, em especial todo elenco de professores altamente capacitados, a oportunidade de obter todo conhecimento adquirido, para conseguir obter minha habilitação profissional. Nesse sentido tenho o sentimento de gratidão para com todos que me ajudaram e não me deixaram desistir, ou ainda desanimar.

Dedico este trabalho à minha família, minha mãe (LINDAMAR FURTADO DE SOUZA), pai (NIODALBO SCHWAMBACK) e aos meus irmãos (RAMON e SAVIO). Agradeço ao professor Dr. Bruno Araújo Furtado Mendonça a credibilidade da confiança e orientação para elaboração deste trabalho.

RESUMO

A palmeira juçara é uma espécie nativa da Mata Atlântica que desempenha papel ecológico fundamental na manutenção da biodiversidade, especialmente como importante fonte alimentar para a fauna frugívora. Atualmente, é considerada vulnerável à extinção em decorrência da exploração predatória do palmito, da perda de habitat e da fragmentação florestal. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo modelar a adequabilidade de habitats atual e futura da espécie na Mata Atlântica, utilizando técnicas de Modelagem de Distribuição de Espécies associadas a variáveis bioclimáticas e dados de uso e cobertura da terra. Foram utilizados 771 registros de ocorrência obtidos em bases de dados de biodiversidade, juntamente com variáveis climáticas provenientes da plataforma WorldClim versão 2.1 e projeções futuras do CMIP6 para os cenários de 2050 e 2100. A modelagem foi realizada por meio do algoritmo Maximum Entropy (MaxEnt), sendo o desempenho avaliado pelas métricas Área Sob a Curva ROC (AUC) e True Skill Statistic (TSS). O modelo apresentou desempenho satisfatório, com valores de AUC igual a 0,826 e TSS igual a 0,498. Os resultados indicaram expansão da adequabilidade climática potencial da espécie, passando de 6,75% da área total da Mata Atlântica no cenário atual para 43,99% em 2050 e 78,51% em 2100. Entretanto, quando considerados os remanescentes florestais, as áreas efetivamente disponíveis reduziram-se para 2,85%, 7,11% e 11,66% do bioma, respectivamente. Nas Unidades de Conservação de Proteção Integral, a representatividade das áreas adequadas mostrou-se ainda mais limitada, correspondendo a apenas 0,23%, 0,69% e 0,82% da área total do bioma nos cenários atual, 2050 e 2100. Conclui-se que, embora as mudanças climáticas possam favorecer a expansão da adequabilidade ambiental de *Euterpe edulis*, a perda e a fragmentação dos habitats permanecem como os principais fatores limitantes para a manutenção de populações viáveis. Dessa forma, a conservação da espécie depende diretamente da proteção, recuperação e conectividade dos remanescentes florestais, bem como do fortalecimento das estratégias de conservação na Mata Atlântica.

Palavras-chave: MaxEnt; mudanças climáticas; adequabilidade ambiental; fragmentação florestal; conservação da biodiversidade.

ABSTRACT

The juçara palm is a native species of the Atlantic Forest that plays a fundamental ecological role in maintaining biodiversity, particularly as an important food resource for frugivorous fauna. Currently, it is considered vulnerable to extinction due to illegal palm heart harvesting, habitat loss, and forest fragmentation. In this context, this study aimed to model the current and future environmental suitability of the species in the Atlantic Forest using Species Distribution Modeling techniques associated with bioclimatic variables and land-use and land-cover data. A total of 771 occurrence records obtained from biodiversity databases were used, together with climatic variables from WorldClim version 2.1 and future climate projections from CMIP6 for the years 2050 and 2100. Modeling was performed using the Maximum Entropy (MaxEnt) algorithm, and model performance was evaluated through the Area Under the Receiver Operating Characteristic Curve (AUC) and the True Skill Statistic (TSS). The model showed satisfactory performance, with AUC and TSS values of 0.826 and 0.498, respectively. The results indicated an expansion of the species' potential climatic suitability, increasing from 6.75% of the total Atlantic Forest area under current conditions to 43.99% in 2050 and 78.51% in 2100. However, when forest remnants were considered, the effectively available areas decreased to 2.85%, 7.11%, and 11.66% of the biome, respectively. Within Strictly Protected Conservation Units, the representation of suitable areas was even more limited, corresponding to only 0.23%, 0.69%, and 0.82% of the total biome area under current, 2050, and 2100 scenarios, respectively. The findings indicate that although climate change may favor the expansion of environmentally suitable areas for *E. edulis*, habitat loss and fragmentation remain the main limiting factors for maintaining viable populations. Therefore, the conservation of the species depends directly on the protection, restoration, and connectivity of forest remnants, as well as on strengthening conservation strategies throughout the Atlantic Forest.

Keywords: MaxEnt; climate change; environmental suitability; forest fragmentation; biodiversity conservation.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1 Aspectos biológicos e ecológicos de <i>E.edulis</i>	2
2.2 Interações ecológicas e papel funcional nos ecossistemas	2
2.3 Conservação e ameaças à persistência de <i>E.edulis</i>	3
2.4 Modelagem de Distribuição de Espécies aplicada à conservação da biodiversidade.....	4
2.5 Mudanças climáticas e projeções futuras para <i>E.edulis</i>	4
2.6 Algoritmo Maximum Entropy (MaxEnt).....	5
2.6.1 Fundamentos do algoritmo MaxEnt	5
2.6.2 Funcionamento da modelagem MaxEnt	6
2.6.3 Aplicações do MaxEnt em estudos de conservação	6
3. MATERIAL E MÉTODOS	6
3.1 Área de estudo	6
3.2 Dados de ocorrência	8
3.3 Variáveis ambientais	8
3.3.1 Variáveis bioclimáticas	8
3.3.2 Pré-processamento e seleção das variáveis.....	9
3.4 Cenários climáticos futuros.....	9
3.5 Modelagem da distribuição potencial	10
3.6 Avaliação do desempenho do modelo	10
3.7 Análise de ganho e perda de habitat	11
3.8 Softwares e pacotes utilizados.....	11
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	12
4.1 Importância das variáveis bioclimáticas na modelagem de distribuição potencial de <i>Euterpe edulis</i>	12

4.2 Desempenho do modelo e adequabilidade climática	12
4.3 Influência dos remanescentes florestais na disponibilidade de habitat	15
4.4 Representatividade das áreas adequadas em Unidades de Conservação	18
4.5 Dinâmica temporal da adequabilidade ambiental e disponibilidade efetiva de habitat.....	20
4.6 Incerteza da modelagem.....	21
5.CONCLUSÃO	21
6.DECLARAÇÃO	22
7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variáveis bioclimáticas utilizadas na modelagem.....	9
Tabela 2 - Variáveis bioclimáticas selecionadas após análise de colinearidade.....	12
Tabela 3 - Proporção da área adequada para <i>E.edulis</i> na Mata Atlântica nos cenários atual, 2050 e 2100, considerando a adequabilidade climática, os remanescentes florestais e as Unidades de Conservação de Proteção Integral	13
Tabela 4 - Distribuição dos registros de ocorrência de <i>E.edulis</i> em relação aos remanescentes florestais da Mata Atlântica obtidos pelo MapBiomias Coleção 9.	16

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de Localização dos Registros da E.edulis na Mata Atlântica (GBIF).	7
Figura 2 - Fluxograma da Metodologia.	8
Figura 3 - Distribuição das áreas com adequabilidade climática potencial para E.edulis na Mata Atlântica nos cenários atual (2026), 2050 e 2100, obtidos por meio da modelagem MaxEnt.	14
Figura 4 - Distribuição das áreas potencialmente adequadas para E.edulis associadas aos remanescentes florestais da Mata Atlântica nos cenários atual (2026), 2050 e 2100.	17
Figura 5 - Distribuição das áreas potencialmente adequadas para E.edulis inseridas em Unidades de Conservação de Proteção Integral federais nos cenários atual (2026), 2050 e 2100.	19

1.INTRODUÇÃO

A Mata Atlântica é reconhecida como um dos principais hotspots mundiais de biodiversidade, em razão de sua elevada riqueza de espécies, altos níveis de endemismo e intenso grau de ameaça decorrente da ação antrópica (MYERS, 2000). Originalmente, esse bioma ocupava aproximadamente 1,5 milhão de km² ao longo da costa leste da América do Sul, abrangendo principalmente o território brasileiro. Entretanto, séculos de exploração dos recursos naturais, associados à expansão agropecuária, à urbanização e ao desenvolvimento industrial, resultaram em uma drástica redução de sua cobertura florestal original, promovendo intensa fragmentação da paisagem e a formação de remanescentes florestais isolados (RIBEIRO, 2009).

A perda e a fragmentação dos habitats figuram entre as principais ameaças à conservação da biodiversidade da Mata Atlântica, comprometendo processos ecológicos fundamentais, como o fluxo gênico, a dispersão de sementes e a manutenção de populações viáveis. Recentemente, avaliações abrangentes sobre o estado de conservação da flora do bioma indicaram que aproximadamente 65% das espécies arbóreas e mais de 80% das espécies endêmicas encontram-se ameaçadas de extinção, evidenciando a gravidade do processo de degradação ambiental e a necessidade de fortalecimento das estratégias de conservação (LIMA et al., 2024).

Nesse contexto, destaca-se a palmeira juçara, espécie nativa e endêmica da Mata Atlântica, amplamente distribuída ao longo do bioma e associada a ambientes florestais úmidos e bem conservados (SOUZA; PREVEDELLO, 2019). Pertencente à família Arecaceae, a espécie desempenha papel ecológico fundamental na dinâmica dos ecossistemas florestais, sendo considerada uma espécie-chave devido à elevada produção de frutos, que constituem importante recurso alimentar para diversas espécies de aves e mamíferos frugívoros ao longo do ano (GALETTI et al., 2013). Dessa forma, *E.edulis* contribui diretamente para a manutenção das interações ecológicas e dos processos de dispersão de sementes e regeneração natural das florestas.

Apesar de sua relevância ecológica, *E.edulis* sofreu intenso declínio populacional em decorrência da exploração predatória para extração do palmito. Como a remoção do meristema apical resulta na morte do indivíduo, a exploração não sustentável das populações naturais provocou significativa redução da abundância da espécie em diversas regiões da Mata Atlântica (GODOY et al., 2022). Além da exploração histórica, a espécie permanece sujeita aos efeitos combinados da perda de habitat, da fragmentação florestal e das mudanças climáticas, fatores que podem alterar sua distribuição geográfica e comprometer a persistência de populações naturais em longo prazo (PORTELA et al., 2023).

Estudos recentes demonstram que, embora existam extensas áreas climaticamente adequadas para a ocorrência de *E.edulis*, grande parte desses ambientes já foi convertida para usos antrópicos, reduzindo substancialmente a disponibilidade de habitat efetivamente utilizável pela espécie (SOUZA; PREVEDELLO, 2019). Nesse sentido, avaliações baseadas exclusivamente em variáveis climáticas podem superestimar a distribuição potencial da espécie, tornando necessária a incorporação de informações relacionadas ao uso e cobertura da terra para obtenção de cenários mais realistas sobre sua conservação.

A Modelagem de Distribuição de Espécies (MDE) tem se consolidado como uma importante ferramenta para compreender as relações entre as espécies e os fatores ambientais, permitindo identificar áreas potencialmente adequadas para sua ocorrência e projetar alterações em sua distribuição sob diferentes cenários ambientais. Entre os métodos disponíveis, o algoritmo Maximum Entropy (MaxEnt) destaca-se por sua elevada capacidade preditiva, especialmente quando aplicado a dados de presença, sendo amplamente utilizado em estudos de conservação da biodiversidade e planejamento ambiental.

Diante desse cenário, o presente estudo teve como objetivo modelar a adequabilidade ambiental atual e futura de *E.edulis* na Mata Atlântica, utilizando variáveis bioclimáticas e informações de uso e cobertura da terra. Adicionalmente, buscou-se avaliar a influência dos remanescentes florestais e das Unidades de Conservação de Proteção Integral sobre a disponibilidade potencial de habitats para a espécie, fornecendo subsídios para ações de conservação, restauração ecológica e planejamento ambiental no bioma.

2.REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Aspectos biológicos e ecológicos de *E.edulis*

A palmeira juçara pertence à família Arecaceae e constitui uma das espécies vegetais mais emblemáticas da Mata Atlântica. Trata-se de uma palmeira monocaule, com estipe único, que pode atingir entre 10 e 20 metros de altura e apresentar diâmetro à altura do peito variando entre 10 e 25 cm. Seu crescimento relativamente lento, associado à presença de um único meristema apical, torna a espécie particularmente vulnerável à exploração para extração de palmito, uma vez que a remoção dessa estrutura resulta na morte do indivíduo (HENDERSON et al., 1995; LORENZI, 2010).

A distribuição natural da espécie abrange grande parte da Mata Atlântica brasileira, ocorrendo desde o Nordeste até o Sul do país, principalmente em formações de Floresta Ombrófila Densa. Sua ocorrência está associada a ambientes com elevada disponibilidade hídrica, temperaturas amenas e cobertura florestal contínua, sendo frequentemente encontrada em florestas maduras e bem conservadas (HENDERSON et al., 1995; SOUZA; PREVEDELLO, 2019).

O ciclo reprodutivo de *E.edulis* caracteriza-se pela produção anual de inflorescências e elevada produção de frutos do tipo drupa. A frutificação ocorre predominantemente durante o outono e o inverno, período em que os frutos constituem importante recurso alimentar para a fauna silvestre. As sementes apresentam comportamento recalcitrante, perdendo rapidamente sua viabilidade quando submetidas à dessecação, o que limita seu armazenamento e dificulta estratégias de conservação ex situ (MARTINS et al., 2000).

A regeneração natural da espécie depende fortemente das condições microclimáticas proporcionadas pelo ambiente florestal. Plântulas e indivíduos jovens apresentam elevada tolerância ao sombreamento, permanecendo por longos períodos no sub-bosque até que alterações na estrutura do dossel permitam seu crescimento para estágios mais avançados de desenvolvimento. Essa estratégia ecológica evidencia a estreita dependência da espécie em relação à manutenção da integridade estrutural dos remanescentes florestais da Mata Atlântica (REIS et al., 2000).

2.2 Interações ecológicas e papel funcional nos ecossistemas

A juçara desempenha papel ecológico fundamental na manutenção dos ecossistemas da Mata Atlântica, sendo amplamente reconhecida como uma espécie-chave (keystone species). Sua importância decorre principalmente da elevada produção de frutos, que servem como recurso alimentar para dezenas de espécies de aves e mamíferos frugívoros, incluindo tucanos, jacutingas, sabiás, cotias, pacas e primatas (GALETTI et al., 2013).

A disponibilidade de frutos ao longo de períodos de escassez de recursos alimentares faz com que *E.edulis* seja considerada um recurso-chave para a fauna. A redução de suas populações pode desencadear impactos em cascata sobre as redes ecológicas, afetando processos como dispersão de sementes, recrutamento de plântulas e regeneração florestal.

Dessa forma, a conservação da espécie extrapola sua importância individual e contribui para a manutenção da funcionalidade dos ecossistemas florestais (GALETTI et al., 2013).

A interação entre a juçara e seus dispersores representa um exemplo clássico de mutualismo ecológico. Enquanto os animais obtêm alimento por meio do consumo dos frutos, promovem simultaneamente a dispersão das sementes para locais potencialmente favoráveis ao estabelecimento de novos indivíduos. Alterações na composição da fauna, decorrentes da caça, fragmentação florestal ou perda de habitat, podem comprometer significativamente essa dinâmica ecológica, reduzindo o sucesso reprodutivo e a capacidade de regeneração da espécie.

Estudos recentes demonstram que a perda de grandes dispersores em áreas fragmentadas pode produzir alterações evolutivas detectáveis nas populações naturais de *E.edulis*, incluindo mudanças no tamanho das sementes e possíveis impactos sobre a diversidade genética. Esses resultados evidenciam a forte dependência da espécie em relação às interações ecológicas que sustentam os ecossistemas da Mata Atlântica e reforçam a necessidade de estratégias de conservação que considerem simultaneamente a flora e a fauna associadas (GALETTI et al., 2013; PORTELA et al., 2023).

2.3 Conservação e ameaças à persistência de *E.edulis*

A exploração do palmito de *E.edulis* constituiu, durante décadas, uma das principais atividades extrativistas desenvolvidas na Mata Atlântica. Diferentemente de outras espécies de palmeiras que apresentam múltiplos estipes, a juçara possui apenas um meristema apical funcional, de modo que a retirada do palmito resulta inevitavelmente na morte do indivíduo. Em virtude dessa característica biológica, a exploração intensiva promoveu expressiva redução das populações naturais em grande parte de sua área de ocorrência, levando a espécie a ser classificada como vulnerável à extinção em diversas avaliações de conservação (REIS; KAGEYAMA, 2000; GODOY et al., 2022).

Além da exploração histórica, a persistência da espécie encontra-se diretamente relacionada à estrutura e à conectividade da paisagem. A fragmentação florestal reduz o tamanho efetivo das populações, limita o fluxo gênico entre fragmentos e aumenta os efeitos da deriva genética, comprometendo a viabilidade populacional em longo prazo. Estudos realizados em remanescentes da Mata Atlântica demonstram que populações isoladas tendem a apresentar menor diversidade genética e maior susceptibilidade a perturbações ambientais quando comparadas a populações inseridas em paisagens mais conectadas (SEOANE et al., 2005).

Outro fator relevante refere-se à defaunação, caracterizada pela redução ou desaparecimento de espécies da fauna responsáveis por processos ecológicos essenciais. A diminuição de dispersores de médio e grande porte compromete a dispersão de sementes e reduz a capacidade de colonização de novas áreas pela espécie, afetando diretamente a dinâmica de regeneração natural das populações (GALETTI et al., 2013).

Nos últimos anos, iniciativas voltadas ao aproveitamento sustentável dos frutos da juçara têm sido apontadas como alternativas capazes de conciliar conservação e geração de renda. A produção de polpa, comercializada em diversas regiões sob a denominação de “juçaí”, permite a exploração econômica da espécie sem a remoção dos indivíduos, favorecendo a manutenção das populações naturais e incentivando a conservação dos remanescentes florestais onde a espécie ocorre (GODOY et al., 2022).

Dessa forma, a conservação de *E.edulis* depende de estratégias integradas que envolvam a proteção dos remanescentes florestais, a recuperação da conectividade da paisagem, a manutenção das interações ecológicas e a promoção de sistemas produtivos compatíveis com a conservação da biodiversidade.

2.4 Modelagem de Distribuição de Espécies aplicada à conservação da biodiversidade

A Modelagem de Distribuição de Espécies (MDE) consiste em um conjunto de técnicas destinadas a relacionar registros de ocorrência de organismos com variáveis ambientais, permitindo estimar áreas potencialmente adequadas para sua ocorrência em diferentes escalas espaciais e temporais (ELITH; LEATHWICK, 2009; FRANKLIN, 2010). Essa abordagem tem sido amplamente utilizada em estudos de biogeografia, ecologia da conservação e planejamento ambiental, especialmente em cenários de mudanças ambientais globais.

Os fundamentos conceituais da MDE estão associados à teoria do nicho ecológico proposta por Hutchinson (1957), segundo a qual a distribuição das espécies é condicionada por um conjunto multidimensional de fatores ambientais que permitem sua sobrevivência, crescimento e reprodução. A partir desse conceito, os modelos utilizam informações ambientais observadas nos locais de ocorrência para inferir padrões espaciais de adequabilidade ambiental em áreas amostradas ou não amostradas.

Nas últimas décadas, a disponibilidade crescente de bases globais de dados climáticos, associada ao avanço dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e das técnicas de sensoriamento remoto, ampliou significativamente a aplicação da modelagem de distribuição de espécies em estudos de conservação da biodiversidade (GUISAN; THUILLER, 2005).

Entre os algoritmos mais empregados destaca-se o Maximum Entropy (MaxEnt), desenvolvido por Phillips, Anderson e Schapire (2006). O método baseia-se no princípio da máxima entropia, segundo o qual a distribuição potencial mais provável de uma espécie corresponde àquela que maximiza a entropia, respeitando as restrições impostas pelos dados observados. Uma das principais vantagens do MaxEnt consiste na utilização exclusiva de registros de presença, característica particularmente relevante para espécies cujos dados de ausência são escassos ou inexistentes.

Diversos estudos comparativos demonstram que o MaxEnt apresenta elevado desempenho preditivo quando comparado a outros algoritmos de modelagem, especialmente em situações com amostragem limitada ou distribuição geográfica incompleta dos registros de ocorrência (ELITH et al., 2006). Além da geração de mapas contínuos de adequabilidade ambiental, o algoritmo permite avaliar a contribuição relativa das variáveis ambientais, identificar fatores limitantes à distribuição das espécies e projetar cenários futuros sob diferentes condições climáticas.

A qualidade dos modelos é frequentemente avaliada por métricas estatísticas como a Área Sob a Curva ROC (Area Under the Curve – AUC) e o True Skill Statistic (TSS). A AUC mede a capacidade do modelo em discriminar áreas adequadas e inadequadas para a espécie, enquanto o TSS considera simultaneamente erros de omissão e comissão, sendo amplamente utilizado por apresentar menor sensibilidade à prevalência dos dados (ALLOUCHE et al., 2006).

2.5 Mudanças climáticas e projeções futuras para *E. edulis*

As mudanças climáticas constituem um dos principais fatores responsáveis pela reorganização espacial da biodiversidade em escala global. Alterações nos padrões de temperatura e precipitação afetam diretamente os limites fisiológicos das espécies, influenciando processos relacionados à sobrevivência, crescimento, reprodução e distribuição geográfica (IPCC, 2023).

Em espécies vegetais, as respostas às mudanças climáticas frequentemente se manifestam por meio do deslocamento das áreas ambientalmente adequadas para diferentes latitudes ou altitudes. Entretanto, a efetiva ocupação dessas novas áreas depende não apenas da disponibilidade de condições climáticas favoráveis, mas também da capacidade de dispersão

das espécies e da existência de habitats adequados para sua colonização (BELLARD et al., 2012).

No caso de *E.edulis*, a disponibilidade hídrica representa um dos principais fatores associados à sua distribuição geográfica. Estudos demonstram que variáveis relacionadas à precipitação anual, sazonalidade climática e disponibilidade de cobertura florestal exercem forte influência sobre a adequabilidade ambiental da espécie, refletindo sua dependência de ambientes úmidos característicos da Mata Atlântica (SOUZA; PREVEDELLO, 2019).

A incorporação de cenários climáticos futuros em modelos de distribuição tem permitido avaliar possíveis alterações na adequabilidade ambiental da espécie ao longo do século XXI. Esses cenários são derivados de Modelos de Circulação Global (Global Climate Models – GCMs), capazes de simular diferentes trajetórias de emissão de gases de efeito estufa e seus efeitos sobre o sistema climático terrestre (IPCC, 2023).

Embora projeções climáticas indiquem potencial expansão ou deslocamento de áreas adequadas para determinadas regiões, estudos recentes demonstram que a disponibilidade de habitat permanece como um dos principais fatores limitantes para a conservação de *E. edulis*. Souza e Prevedello (2019) verificaram que grande parte das áreas climaticamente favoráveis na Mata Atlântica já foi convertida para usos antrópicos, reduzindo significativamente o habitat efetivamente disponível para a espécie.

De forma semelhante, Portela et al. (2023) destacam que os efeitos das mudanças climáticas devem ser analisados conjuntamente com a dinâmica da cobertura da terra, uma vez que a perda de remanescentes florestais pode comprometer a persistência das populações mesmo em regiões climaticamente favoráveis. Nesse contexto, abordagens que integrem variáveis climáticas, uso e cobertura da terra e áreas protegidas tornam-se fundamentais para compreender os desafios futuros relacionados à conservação da juçara.

Assim, a utilização de modelos preditivos associados a cenários climáticos futuros representa uma importante ferramenta para identificar áreas prioritárias para conservação, restauração ecológica e planejamento territorial, contribuindo para a formulação de estratégias voltadas à manutenção da biodiversidade da Mata Atlântica diante das mudanças ambientais globais.

2.6 Algoritmo Maximum Entropy (MaxEnt)

2.6.1 Fundamentos do algoritmo MaxEnt

O algoritmo Maximum Entropy (MaxEnt), desenvolvido por Steven J. Phillips, Robert P. Anderson e Robert E. Schapire, constitui atualmente uma das principais ferramentas utilizadas na Modelagem de Distribuição de Espécies (Species Distribution Modeling – SDM). O método baseia-se no princípio da máxima entropia, segundo o qual a distribuição potencial mais provável corresponde àquela que apresenta a maior entropia possível, respeitando as restrições impostas pelos registros conhecidos da espécie e pelas variáveis ambientais observadas (PHILLIPS et al., 2006).

Diferentemente de outros algoritmos, o MaxEnt utiliza exclusivamente dados de presença, característica que o torna particularmente adequado para estudos envolvendo bancos de dados de biodiversidade, nos quais informações de ausência são frequentemente inexistentes ou pouco confiáveis. Essa característica contribuiu para sua ampla adoção em estudos de conservação, ecologia e planejamento ambiental (ELITH et al., 2011).

2.6.2 Funcionamento da modelagem MaxEnt

O funcionamento do MaxEnt consiste em relacionar os registros de ocorrência da espécie com variáveis ambientais, como temperatura, precipitação, altitude e outras características do ambiente. A partir dessas relações, o algoritmo estima a probabilidade relativa de adequabilidade ambiental para cada célula da paisagem, produzindo mapas contínuos com valores variando entre 0 e 1. Valores próximos de 1 indicam elevada adequabilidade ambiental e maior probabilidade de ocorrência da espécie, enquanto valores próximos de 0 representam condições menos favoráveis (FRANKLIN, 2010).

Além dos mapas de adequabilidade, o MaxEnt fornece importantes produtos para interpretação ecológica, como a contribuição percentual das variáveis ambientais, curvas de resposta, teste Jackknife para avaliação da importância dos preditores e métricas de desempenho, como a Área Sob a Curva ROC (AUC) e o True Skill Statistic (TSS). Esses produtos permitem compreender os fatores ambientais que condicionam a distribuição das espécies e avaliar a qualidade preditiva do modelo (ELITH et al., 2006).

2.6.3 Aplicações do MaxEnt em estudos de conservação

Nas últimas duas décadas, o MaxEnt consolidou-se como um dos algoritmos mais utilizados em estudos de conservação da biodiversidade. Sua aplicação tem permitido identificar áreas prioritárias para conservação, avaliar impactos das mudanças climáticas, estimar distribuições potenciais de espécies ameaçadas e subsidiar programas de restauração ecológica e planejamento territorial (ELITH; LEATHWICK, 2009).

No Brasil, diversos trabalhos empregaram o algoritmo para modelar a distribuição potencial de espécies da Mata Atlântica, evidenciando a influência das variáveis climáticas sobre os padrões de adequabilidade ambiental. Para *E. edulis*, estudos demonstram que a combinação entre variáveis bioclimáticas e informações sobre cobertura florestal fornece estimativas mais realistas da distribuição potencial da espécie, destacando a importância da conservação dos remanescentes florestais e da conectividade da paisagem para sua persistência em longo prazo (SOUZA; PREVEDELLO, 2019; CORREIA et al., 2019; PORTELA et al., 2023).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A área de estudo compreendeu o domínio fitogeográfico da Mata Atlântica, localizado predominantemente na porção leste do Brasil, com ocorrência também em áreas do Paraguai e da Argentina. Esse bioma apresenta elevada heterogeneidade ambiental, resultante de amplos gradientes latitudinais, altitudinais e climáticos, sendo reconhecido como um dos principais hotspots mundiais de biodiversidade (MYERS et al., 2000; RIBEIRO et al., 2009).

Os limites espaciais da Mata Atlântica foram utilizados para delimitação da área de modelagem, recorte das variáveis ambientais e filtragem dos registros de ocorrência de *E. edulis*. A Figura 1 apresenta a distribuição espacial dos registros utilizados no estudo.

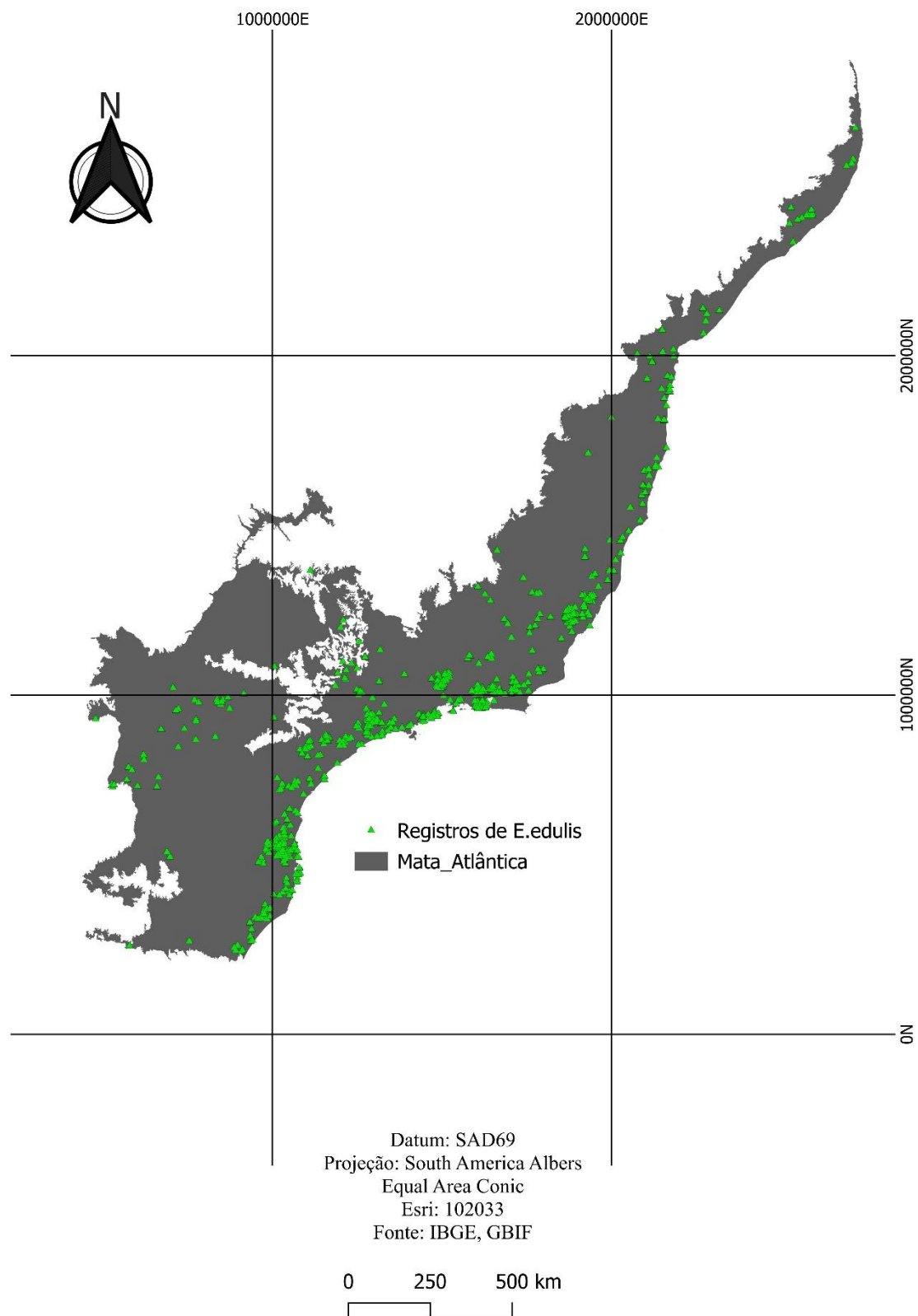


Figura 1 - Mapa de Localização dos Registros da *E.edulis* na Mata Atlântica (GBIF).

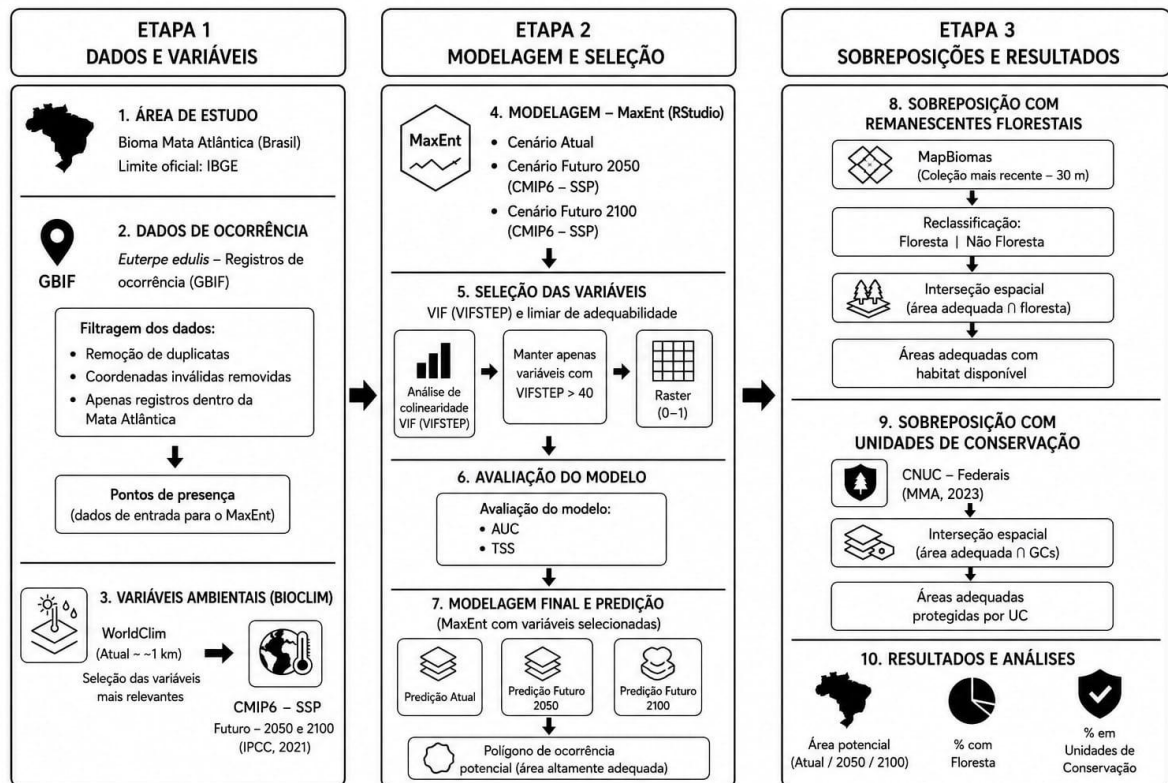


Figura 2 - Fluxograma da Metodologia.

3.2 Dados de ocorrência

Os registros georreferenciados de ocorrência de *E. edulis* Mart. foram obtidos por meio da plataforma Global Biodiversity Information Facility (GBIF), uma das principais bases globais de dados sobre biodiversidade. Foram considerados apenas registros contendo coordenadas geográficas válidas e localizados dentro dos limites da Mata Atlântica.

Após a obtenção dos dados, foi realizado um procedimento de controle de qualidade com o objetivo de reduzir inconsistências espaciais e erros de amostragem. Foram removidos registros duplicados, ocorrências sem coordenadas geográficas válidas e pontos localizados fora da área de estudo. Adicionalmente, foi realizada a padronização das coordenadas geográficas e a eliminação de registros redundantes com a mesma localização espacial.

Após as etapas de filtragem e controle de qualidade, foram utilizados 771 registros de ocorrência para a construção e validação dos modelos de distribuição potencial da espécie (Figura 2).

3.3 Variáveis ambientais

3.3.1 Variáveis bioclimáticas

As variáveis ambientais utilizadas na modelagem foram obtidas da base WorldClim versão 2.1, com resolução espacial de 2,5 minutos de arco, equivalente a aproximadamente 5 km. Essas variáveis representam padrões médios, extremos e sazonais de temperatura e precipitação, sendo amplamente utilizadas em estudos de Modelagem de Distribuição de Espécies (HIJMANS et al., 2005; FICK; HIJMANS, 2017)(Figura 2).

Inicialmente, foram consideradas as 19 variáveis bioclimáticas disponíveis no WorldClim v2.1, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Variáveis bioclimáticas utilizadas na modelagem.

Código	Variável Bioclimática	Unidade
BIO1	Temperatura Média Anual	°C
BIO2	Amplitude Diurna Média	°C
BIO3	Isotermalidade (BIO2/BIO7 × 100)	%
BIO4	Sazonalidade da Temperatura	Desvio padrão ×100
BIO5	Temperatura Máxima do Mês Mais Quente	°C
BIO6	Temperatura Mínima do Mês Mais Frio	°C
BIO7	Amplitude Térmica Anual (BIO5-BIO6)	°C
BIO8	Temperatura Média do Trimestre Mais Úmido	°C
BIO9	Temperatura Média do Trimestre Mais Seco	°C
BIO10	Temperatura Média do Trimestre Mais Quente	°C
BIO11	Temperatura Média do Trimestre Mais Frio	°C
BIO12	Precipitação Anual	mm
BIO13	Precipitação do Mês Mais Úmido	mm
BIO14	Precipitação do Mês Mais Seco	mm
BIO15	Sazonalidade da Precipitação	CV (%)
BIO16	Precipitação do Trimestre Mais Úmido	mm
BIO17	Precipitação do Trimestre Mais Seco	mm
BIO18	Precipitação do Trimestre Mais Quente	mm
BIO19	Precipitação do Trimestre Mais Frio	mm

Fonte: Adaptado de Hijmans et al. (2005) e Fick e Hijmans (2017).

3.3.2 Pré-processamento e seleção das variáveis

As camadas bioclimáticas foram recortadas para os limites da Mata Atlântica e padronizadas quanto ao sistema de coordenadas e à resolução espacial, garantindo compatibilidade entre os dados ambientais e os registros de ocorrência de *E.edulis*.

Posteriormente, foi realizada a análise de multicolinearidade entre as variáveis ambientais com o objetivo de reduzir a redundância entre os preditores e melhorar a robustez do modelo. Para essa etapa, foram extraídos aleatoriamente 5.000 valores das camadas bioclimáticas, os quais foram utilizados na análise do Fator de Inflação da Variância (*Variance Inflation Factor* – VIF), implementada por meio da função `vifstep` do pacote **usdm** no ambiente R.

Foi adotado o limiar de VIF igual a 10, removendo-se iterativamente as variáveis que apresentavam maior colinearidade até a obtenção de um conjunto de variáveis menos redundantes. Ao final desse procedimento, foram selecionadas nove variáveis bioclimáticas para a modelagem da distribuição potencial de *E.edulis*.

3.4 Cenários climáticos futuros

Além das condições climáticas atuais, foram utilizadas projeções climáticas futuras derivadas do Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6), obtidas por meio do pacote `geodata` no software R. Foi utilizado o Modelo de Circulação Global (GCM) MIROC6, sob o cenário SSP585 (Shared Socioeconomic Pathway 5–8.5), considerando os períodos de 2041–2060 e 2081–2100.

As variáveis bioclimáticas futuras foram submetidas aos mesmos procedimentos de recorte espacial aplicados aos dados climáticos atuais, utilizando os limites da Mata Atlântica. Posteriormente, as camadas foram padronizadas e compatibilizadas com as variáveis selecionadas para o cenário atual, permitindo a projeção do modelo MaxEnt para os cenários climáticos futuros.

3.5 Modelagem da distribuição potencial

A distribuição potencial de *E.edulis* foi modelada por meio do algoritmo Maximum Entropy (MaxEnt), implementado no pacote **dismo** do software R. O MaxEnt baseia-se no princípio da máxima entropia e estima a distribuição potencial de uma espécie a partir de registros de presença e variáveis ambientais, sendo amplamente utilizado em estudos de Modelagem de Distribuição de Espécies devido ao seu elevado desempenho preditivo e à sua capacidade de produzir resultados consistentes mesmo com conjuntos de dados limitados (PHILLIPS et al., 2006; ELITH et al., 2006).

Os registros de ocorrência foram divididos aleatoriamente em conjuntos de treinamento (70%) e teste (30%), utilizando-se uma semente aleatória fixa (*seed* = 123), permitindo a calibração e a validação independente do modelo. A modelagem foi realizada utilizando os registros de ocorrência filtrados e as variáveis bioclimáticas selecionadas após a análise de multicolinearidade baseada no Fator de Inflação da Variância (VIF).

A partir do modelo calibrado, foram gerados mapas contínuos de adequabilidade ambiental para as condições climáticas atuais e futuras. Os valores de adequabilidade variaram entre 0 e 1, sendo que valores próximos de 1 indicam maior probabilidade de ocorrência da espécie e maior adequabilidade ambiental, enquanto valores próximos de 0 indicam condições menos favoráveis para seu estabelecimento e permanência.

Posteriormente, o modelo calibrado para as condições atuais foi projetado sobre os cenários climáticos futuros derivados do CMIP6, permitindo avaliar possíveis alterações espaciais na adequabilidade ambiental de *E.edulis* sob diferentes condições climáticas ao longo do século XXI.

3.6 Avaliação do desempenho do modelo

O desempenho do modelo foi avaliado por meio da métrica Área Sob a Curva ROC (AUC – Area Under the Curve), obtida a partir da função *evaluate* do pacote *dismo*. A AUC mede a capacidade discriminatória do modelo em distinguir áreas adequadas e inadequadas para a ocorrência da espécie, sendo valores superiores a 0,80 considerados indicativos de bom desempenho preditivo (PHILLIPS et al., 2006).

Também foi calculado o índice True Skill Statistic (TSS), conforme a expressão:

$$\text{TSS} = \text{Sensibilidade} + \text{Especificidade} - 1$$

Essa métrica considera simultaneamente erros de omissão e comissão, apresentando valores entre -1 e $+1$, sendo que valores superiores a $0,40$ indicam desempenho satisfatório do modelo (ALLOUCHE; TSOAR; KADMON, 2006).

Para a conversão dos mapas contínuos de adequabilidade em mapas binários de presença e ausência potencial, foi adotado o limiar que maximiza simultaneamente a sensibilidade e a especificidade, conforme recomendado por Liu et al. (2013).

3.7 Análise de ganho e perda de habitat

Os mapas binários de adequabilidade ambiental gerados para os cenários atual, 2021–2040 e 2081–2100 foram comparados com o objetivo de identificar áreas de permanência, ganho e perda de habitat potencial para *E.edulis*.

A comparação entre os cenários foi realizada por subtração entre os mapas binários futuros e o mapa binário atual. Dessa forma, foram identificadas áreas de permanência de habitat, áreas de ganho potencial e áreas de perda de adequabilidade ambiental.

Posteriormente, os mapas de adequabilidade foram sobrepostos aos remanescentes florestais da Mata Atlântica obtidos a partir da Coleção 9 do Projeto MapBiomass, que disponibiliza mapas anuais de cobertura e uso da terra do Brasil com resolução espacial de 30 m (PROJETO MAPBIOMASS, 2024). Foram consideradas as classes correspondentes à vegetação florestal nativa, visando representar a disponibilidade real de habitat para a espécie.

Adicionalmente, foi realizada a sobreposição dos mapas de adequabilidade com os limites das Unidades de Conservação de Proteção Integral federais, obtidos junto ao Cadastro Nacional de Unidades de Conservação (CNUC), mantido pelo Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (BRASIL, 2026).

Essas análises permitiram avaliar a proporção de habitat potencial climaticamente adequado efetivamente disponível em remanescentes florestais e sua representatividade em áreas legalmente protegidas.

3.8 Softwares e pacotes utilizados

As análises estatísticas, o processamento espacial e a modelagem da distribuição potencial foram realizados no ambiente R. Foram utilizados os pacotes **terra** para manipulação de dados raster e vetoriais, **raster** para operações complementares com dados matriciais, **dismo** para implementação do algoritmo MaxEnt e avaliação dos modelos, **geodata** para obtenção dos dados climáticos atuais e futuros e **usdm** para análise de multicolinearidade e seleção das variáveis ambientais por meio do Fator de Inflação da Variância (VIF).

A elaboração dos mapas temáticos, cálculos de área e análises espaciais complementares foram realizados no software QGIS versão 3.34 LTR, utilizando ferramentas de geoprocessamento para recorte, sobreposição e quantificação das áreas adequadas, dos remanescentes florestais e das Unidades de Conservação de Proteção Integral.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Importância das variáveis bioclimáticas na modelagem de distribuição potencial de *Euterpe edulis*

As variáveis bioclimáticas utilizadas na modelagem foram previamente selecionadas por meio da análise de colinearidade, utilizando o método Variance Inflation Factor (VIF), de forma a reduzir a redundância entre os preditores ambientais. Após esse procedimento, foram mantidas nove variáveis consideradas independentes e ecologicamente relevantes para a distribuição de *E. edulis* na Mata Atlântica (Tabela 2).

A análise da contribuição das variáveis bioclimáticas indicou que a variável BIO2 (Amplitude Diurna Média da Temperatura) foi a que apresentou maior influência na modelagem da distribuição potencial de *E. edulis*, destacando-se amplamente em relação às demais variáveis. Esse resultado sugere que as variações térmicas diárias exercem papel fundamental na determinação das áreas ambientalmente adequadas para a espécie, influenciando processos fisiológicos relacionados ao crescimento, desenvolvimento e estabelecimento das populações.

As variáveis BIO18 (Precipitação do Trimestre Mais Quente), BIO3 (Isotermalidade) e BIO12 (Precipitação Anual) apresentaram contribuições expressivas, evidenciando a importância da disponibilidade hídrica e da estabilidade térmica para a ocorrência da espécie. A elevada relevância das variáveis associadas à precipitação corrobora o caráter higrófilo de *E. edulis*, espécie tipicamente associada a florestas úmidas e ambientes com elevada disponibilidade de água (HENDERSON et al., 1995; REIS et al., 2000).

As demais variáveis selecionadas, incluindo BIO16 (Precipitação do Trimestre Mais Chuvoso), BIO8 (Temperatura Média do Trimestre Mais Úmido), BIO14 (Precipitação do Mês Mais Seco), BIO4 (Sazonalidade da Temperatura) e BIO11 (Temperatura Média do Trimestre Mais Frio), apresentaram contribuições menores, porém relevantes para o desempenho do modelo. Em conjunto, os resultados demonstram que a distribuição potencial de *E. edulis* é fortemente condicionada pela interação entre fatores térmicos e pluviométricos, especialmente pela estabilidade climática e pela disponibilidade hídrica ao longo do ano.

Tabela 2 - Variáveis bioclimáticas selecionadas após análise de colinearidade.

Código	Variável selecionada
BIO2	Amplitude diurna média
BIO3	Isotermalidade
BIO4	Sazonalidade da temperatura
BIO8	Temperatura média do trimestre mais úmido
BIO11	Temperatura média do trimestre mais frio
BIO12	Precipitação anual
BIO14	Precipitação do mês mais seco
BIO16	Precipitação do trimestre mais úmido
BIO18	Precipitação do trimestre mais quente

4.2 Desempenho do modelo e adequabilidade climática

O algoritmo MaxEnt apresentou desempenho satisfatório na modelagem da distribuição potencial de *E. edulis*, obtendo valores de AUC igual a 0,826 e TSS igual a 0,498. Esses resultados indicam boa capacidade de discriminação entre áreas adequadas e inadequadas para

a ocorrência da espécie, evidenciando desempenho preditivo compatível com estudos de modelagem de distribuição de espécies tropicais (PHILLIPS; ANDERSON; SCHAPIRE, 2006; ALLOUCHE; TSOAR; KADMON, 2006; ELITH et al., 2011).

Os resultados da modelagem são apresentados na Figura 3. No cenário climático atual, aproximadamente 6,75% da área total da Mata Atlântica apresentou elevada adequabilidade ambiental para a espécie. As áreas mais favoráveis concentram-se principalmente ao longo da Serra do Mar e em porções das regiões Sul e Sudeste do Brasil, caracterizadas por elevada disponibilidade hídrica, alta umidade atmosférica e reduzida sazonalidade climática.

Observou-se expansão expressiva das áreas adequadas nos cenários futuros, alcançando 43,99% da área do bioma em 2050 e 78,51% em 2100 (Tabela 3). Esses resultados sugerem que as condições climáticas projetadas pelo modelo MIROC6 sob o cenário SSP585 tendem a favorecer a ampliação da adequabilidade ambiental para *E.edulis* ao longo do século XXI.

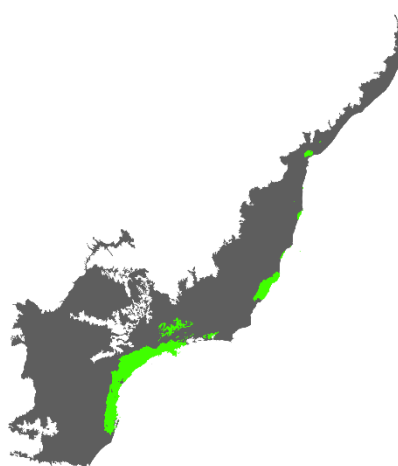
A predominância de variáveis relacionadas à disponibilidade hídrica e à estabilidade térmica entre os principais preditores ambientais reforça a estreita associação da espécie com ambientes úmidos e climaticamente estáveis. Resultados semelhantes foram observados por Souza e Prevedello (2019), Correia et al. (2019) e Muler et al. (2014), que identificaram a precipitação e o regime térmico como fatores determinantes para a distribuição geográfica da espécie.

A elevada influência dessas variáveis está diretamente relacionada à ecologia de *E.edulis*, espécie típica de florestas ombrófilas que apresenta maior desenvolvimento em ambientes com elevada disponibilidade hídrica e baixa sazonalidade climática (REIS et al., 2000; LORENZI, 2010).

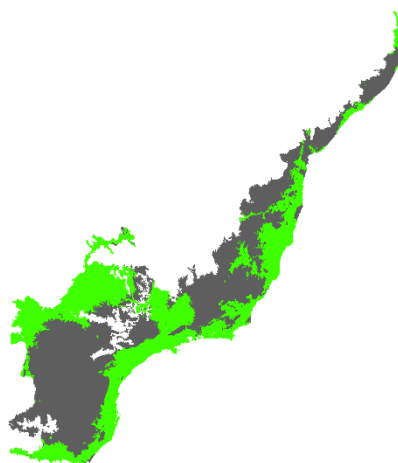
Tabela 3 - Proporção da área adequada para *E.edulis* na Mata Atlântica nos cenários atual, 2050 e 2100, considerando a adequabilidade climática, os remanescentes florestais e as Unidades de Conservação de Proteção Integral

Modelagem	%bioma(2026)	%bioma(2050)	%bioma(2100)
Área adequada	6.75	43.99	78.51
Área adequada Remanescentes	2.85	7.11	11.66
Área adequada em UC's	0.23	0.69	0.82

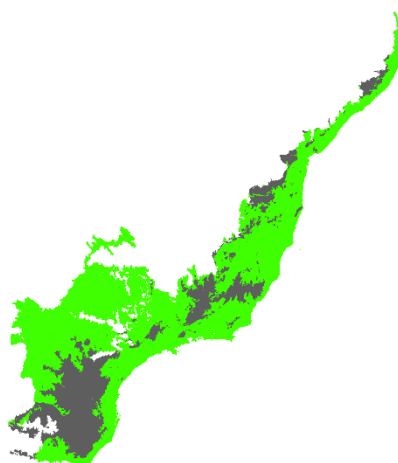
2026



2050



2100



Legenda

Área Adequada

Limite Mata Atlântica

0 500 1.000 km



Figura 3 - Distribuição das áreas com adequabilidade climática potencial para *E. edulis* na Mata Atlântica nos cenários atual (2026), 2050 e 2100, obtidos por meio da modelagem MaxEnt.

4.3 Influência dos remanescentes florestais na disponibilidade de habitat

A sobreposição da adequabilidade climática com os remanescentes florestais da Mata Atlântica resultou na delimitação das áreas potencialmente disponíveis para a espécie (Figura 4). Os resultados demonstraram redução expressiva da área efetivamente disponível quando considerada a atual cobertura florestal do bioma. Embora a adequabilidade climática tenha alcançado 78,51% da Mata Atlântica no cenário de 2100, apenas 11,66% permaneceu associada aos remanescentes florestais existentes (Tabela 3).

Os resultados obtidos corroboram os achados de Souza e Prevedello (2019), que demonstraram que a disponibilidade efetiva de habitat para *E. edulis* é substancialmente inferior à área indicada como climaticamente adequada. Esses autores verificaram que grande parte das áreas potencialmente favoráveis à espécie já se encontra convertida para usos antrópicos, reforçando a importância da integração entre informações climáticas e cobertura da terra em estudos de modelagem de distribuição.

Esse resultado reflete o elevado grau de fragmentação da Mata Atlântica, que atualmente conserva apenas uma pequena parcela de sua cobertura original distribuída em fragmentos de diferentes tamanhos e níveis de isolamento (RIBEIRO et al., 2009; REZENDE et al., 2018; SOS MATA ATLÂNTICA; INPE, 2024). A substituição histórica da vegetação nativa por áreas agrícolas, urbanas e outras formas de uso da terra reduziu significativamente a disponibilidade de habitat para espécies florestais dependentes de ambientes conservados.

A análise da sobreposição entre os registros de ocorrência e os remanescentes florestais (Tabela 4) demonstrou que 329 registros (42,67%) coincidem espacialmente com áreas atualmente classificadas como vegetação florestal pelo MapBiomas. Embora parte dos registros não tenha coincidido diretamente com os remanescentes atuais, esse resultado pode estar relacionado a diferenças temporais entre a coleta das ocorrências e o mapeamento da cobertura da terra, imprecisões espaciais ou alterações recentes na paisagem.

Além disso, *E. edulis* é considerada uma espécie típica do sub-bosque da Mata Atlântica, apresentando elevada tolerância ao sombreamento durante grande parte de seu ciclo de vida e baixa capacidade de estabelecimento em áreas abertas e expostas (REIS et al., 2000; MANTOVANI; MORELLATO, 2000; FAVRETO et al., 2010). Dessa forma, a existência de condições climáticas favoráveis não garante necessariamente a ocorrência da espécie, sendo indispensável a presença de cobertura florestal capaz de fornecer condições adequadas de luminosidade, umidade e proteção microclimática.

Por outro lado, é importante destacar que os remanescentes florestais utilizados nesta análise representam a situação atual da Mata Atlântica. Como não existem projeções espacialmente explícitas da cobertura florestal para os cenários de 2050 e 2100 utilizadas neste estudo, a análise foi realizada considerando os remanescentes atuais para todos os cenários climáticos. Assim, os resultados devem ser interpretados como uma estimativa conservadora da disponibilidade futura de habitat. Caso processos de restauração ecológica, regeneração natural e recuperação da conectividade da paisagem avancem nas próximas décadas, parte das áreas climaticamente adequadas identificadas pelo modelo poderá tornar-se efetivamente disponível para a espécie.

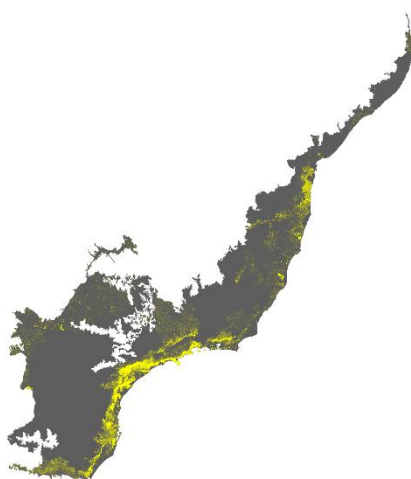
Tabela 4 - Distribuição dos registros de ocorrência de E.edulis em relação aos remanescentes florestais da Mata Atlântica obtidos pelo MapBiomas Coleção 9.

Situação dos registros	Número de pontos	Percentual (%)
Intersectam remanescentes florestais	329	42,67
Não intersectam remanescentes florestais	442	57,33
Total	771	100,00

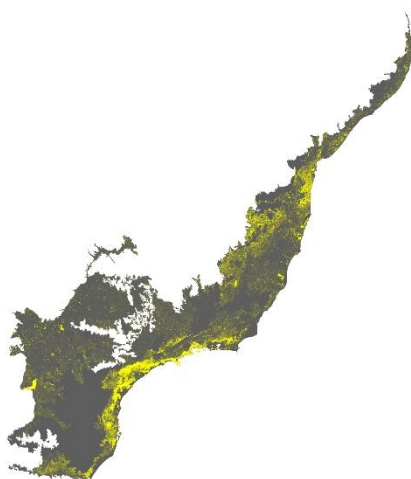
2026



2050



2100



Legenda

Área Adequada
em Remanescentes.

Limite Mata Atlântica.

0 500 1.000 km



Figura 4 - Distribuição das áreas potencialmente adequadas para *E.edulis* associadas aos remanescentes florestais da Mata Atlântica nos cenários atual (2026), 2050 e 2100.

4.4 Representatividade das áreas adequadas em Unidades de Conservação

A distribuição das áreas potencialmente adequadas para *E.edulis* inseridas em Unidades de Conservação de Proteção Integral federais é apresentada na Figura 5.

Os resultados indicaram que apenas uma pequena parcela das áreas consideradas adequadas para a espécie encontra-se atualmente inserida nessas unidades. As áreas adequadas protegidas corresponderam a aproximadamente 0,23% da área total da Mata Atlântica no cenário atual, aumentando para 0,69% em 2050 e 0,82% em 2100 (Tabela 3).

Embora seja observada expansão gradual da adequabilidade climática dentro das unidades ao longo do tempo, sua representatividade permanece reduzida quando comparada à área total potencialmente adequada prevista pelos modelos.

Esse padrão indica que a rede atual de Unidades de Conservação de Proteção Integral contempla apenas uma pequena fração das áreas consideradas adequadas para a espécie. Consequentemente, grande parte do habitat potencial identificado pelo modelo encontra-se localizada em áreas privadas ou sujeitas a diferentes formas de uso da terra, tornando a conservação da espécie dependente de estratégias complementares de gestão da paisagem.

Resultados semelhantes têm sido observados para diversas espécies da Mata Atlântica, evidenciando que a rede atual de unidades de conservação nem sempre contempla integralmente as áreas ambientalmente mais adequadas para a manutenção da biodiversidade (RIBEIRO et al., 2009; JENKINS; JOPPA, 2009; BRANCALION et al., 2016).

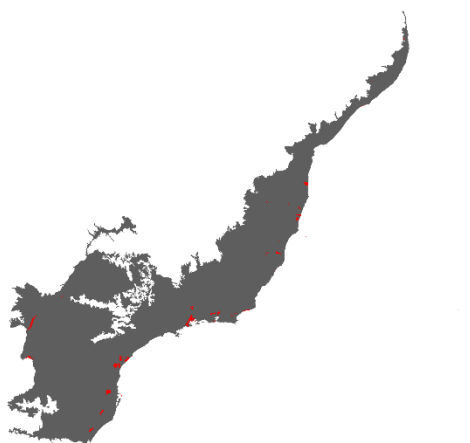
No caso específico de *E.edulis*, essa situação é particularmente preocupante devido à intensa exploração histórica da espécie para extração do palmito, atividade que provocou reduções populacionais significativas em diversas regiões da Mata Atlântica (REIS et al., 2000; GALETTI; FERNANDEZ, 1998). Além disso, a fragmentação florestal reduz a conectividade entre populações e compromete processos ecológicos fundamentais, como dispersão de sementes, recrutamento e fluxo gênico (GALETTI et al., 2013).

Dessa forma, os resultados indicam que a conservação da espécie não depende exclusivamente das unidades de conservação existentes, mas também da implementação de estratégias complementares de restauração ecológica, proteção de fragmentos privados, ampliação da conectividade da paisagem e recuperação de áreas degradadas localizadas fora das áreas formalmente protegidas.

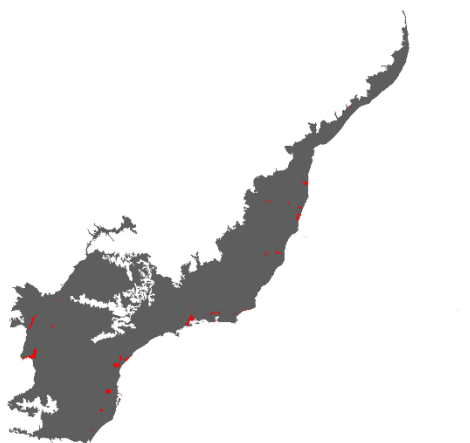
2026



2050



2100



Legenda

- Área adequada em UC's
- Limite Mata Atlântica

0 500 1.000 km



Figura 5 - Distribuição das áreas potencialmente adequadas para *E.edulis* inseridas em Unidades de Conservação de Proteção Integral federais nos cenários atual (2026), 2050 e 2100.

4.5 Dinâmica temporal da adequabilidade ambiental e disponibilidade efetiva de habitat.

A dinâmica temporal da adequabilidade ambiental e da disponibilidade efetiva de habitat para *E.edulis* é apresentada na Tabela 3.

Os resultados demonstram uma expansão expressiva das áreas climaticamente adequadas ao longo do século XXI. A proporção do bioma considerada adequada para a espécie aumentou de 6,75% no cenário atual para 43,99% em 2050 e 78,51% em 2100. Esse comportamento indica que as projeções climáticas adotadas neste estudo apontam para condições ambientais progressivamente mais favoráveis à espécie nas próximas décadas.

Entretanto, quando os remanescentes florestais são incorporados à análise, observa-se redução substancial da área efetivamente disponível. Embora o percentual de habitat associado aos remanescentes também apresente crescimento ao longo do tempo, os valores permanecem significativamente inferiores aos observados para a adequabilidade climática isolada, atingindo apenas 11,66% da área do bioma no cenário de 2100.

Esse resultado evidencia que o clima não constitui atualmente o principal fator limitante para a ocorrência da espécie. A disponibilidade de habitat florestal parece exercer influência ainda mais relevante sobre sua distribuição potencial, uma vez que *E.edulis* apresenta forte dependência de ambientes florestais sombreados e estruturalmente conservados (MANTOVANI; MORELLATO, 2000; REIS et al., 2000; FAVRETO et al., 2010).

Por outro lado, é importante destacar que os remanescentes florestais utilizados na análise correspondem à situação atual da Mata Atlântica. Como não foram utilizadas projeções futuras de cobertura florestal, os cenários de 2050 e 2100 foram avaliados considerando os remanescentes atualmente existentes. Dessa forma, os resultados representam uma estimativa conservadora da disponibilidade futura de habitat.

Nesse contexto, a expansão da adequabilidade climática observada pelo modelo pode ser interpretada não apenas como um indicativo de maior favorabilidade para *E.edulis*, mas também como um sinal de que extensas áreas da Mata Atlântica poderão apresentar condições ambientais favoráveis ao desenvolvimento de formações florestais em geral. Caso programas de restauração ecológica, regeneração natural assistida e recuperação da conectividade da paisagem sejam ampliados nas próximas décadas, parte dessas áreas poderá tornar-se efetivamente disponível para a espécie.

Os resultados também evidenciam uma importante limitação inerente aos modelos baseados exclusivamente em variáveis bioclimáticas.

Embora as projeções indiquem expansão substancial das áreas adequadas, a efetiva ocupação dessas regiões dependerá de fatores adicionais, incluindo dispersão de sementes, dinâmica populacional, competição interespecífica, conectividade da paisagem e disponibilidade de habitat (ELITH; LEATHWICK, 2009; FRANKLIN, 2010).

De forma geral, os resultados demonstram que as mudanças climáticas projetadas para o século XXI, sob o cenário avaliado, não constituem o principal fator limitante para a

distribuição potencial de *E.edulis* na Mata Atlântica. Em contrapartida, a disponibilidade de habitat florestal, a conectividade da paisagem e a conservação dos remanescentes surgem como fatores determinantes para a manutenção de populações viáveis da espécie no futuro.

4.6 Incerteza da modelagem

Embora o modelo MaxEnt tenha apresentado desempenho satisfatório, evidenciado pelos valores de AUC e TSS, é importante considerar que as projeções produzidas estão sujeitas a diferentes fontes de incerteza inerentes aos modelos de distribuição de espécies. Essas incertezas decorrem da qualidade e representatividade dos registros de ocorrência, da seleção das variáveis ambientais, da resolução espacial dos dados climáticos, da parametrização do algoritmo e das próprias projeções climáticas utilizadas para os cenários futuros (Elith; Leathwick, 2009; Franklin, 2010).

Além disso, as projeções para os cenários de 2050 e 2100 dependem das simulações produzidas pelos Modelos de Circulação Global (GCMs), que representam simplificações dos processos climáticos e podem apresentar diferenças quanto à magnitude e à distribuição espacial das mudanças projetadas. Dessa forma, os mapas de adequabilidade potencial devem ser interpretados como estimativas probabilísticas das condições ambientais favoráveis à ocorrência da espécie, e não como previsões determinísticas de sua distribuição futura (Phillips et al., 2006; Elith et al., 2011).

Outro aspecto relevante refere-se ao fato de que a modelagem considerou predominantemente variáveis bioclimáticas, não incorporando diretamente fatores como dispersão da espécie, competição interespecífica, limitações edáficas, uso e ocupação do solo, fragmentação da paisagem e ações antrópicas, fatores que também influenciam a distribuição de *E.edulis*. Assim, áreas classificadas como altamente adequadas climaticamente podem não representar, necessariamente, ambientes efetivamente ocupados pela espécie, especialmente em regiões com elevado grau de degradação ambiental (Franklin, 2010).

Apesar dessas limitações, o algoritmo MaxEnt é reconhecido como uma das ferramentas mais robustas para modelagem baseada em dados de presença, apresentando elevado desempenho preditivo quando comparado a outros algoritmos de modelagem de distribuição de espécies (Elith et al., 2006). Dessa forma, os resultados obtidos neste estudo constituem importante subsídio para o planejamento da conservação de *E.edulis*, desde que interpretados considerando as incertezas inerentes ao processo de modelagem.

5.CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstraram que *E.edulis* apresenta potencial para expansão de sua adequabilidade climática na Mata Atlântica sob os cenários futuros avaliados, com aumento das áreas potencialmente favoráveis de 6,75% no cenário atual para 43,99% em 2050 e 78,51% em 2100.

Entretanto, a análise integrada com os remanescentes florestais revelou uma redução substancial das áreas efetivamente disponíveis para ocupação da espécie. Embora os cenários futuros indiquem expansão da adequabilidade climática, apenas uma parcela dessas áreas coincide com remanescentes florestais capazes de sustentar populações naturais. Em 2100, por exemplo, apenas 11,66% da Mata Atlântica apresentou simultaneamente adequabilidade climática e cobertura florestal remanescente, evidenciando que a degradação e a fragmentação dos habitats constituem os principais fatores limitantes para a conservação da espécie.

Além disso, a baixa representatividade das áreas adequadas no interior das Unidades de Conservação de Proteção Integral demonstra que a rede atual de áreas protegidas pode não ser suficiente para garantir a conservação de longo prazo de *E.edulis*, reforçando a necessidade de estratégias complementares voltadas à conservação em paisagens produtivas e à ampliação da conectividade entre fragmentos florestais.

Dessa forma, conclui-se que a conservação de *E.edulis* na Mata Atlântica dependerá prioritariamente da manutenção, recuperação e conexão dos remanescentes florestais existentes, mais do que da disponibilidade futura de condições climáticas favoráveis. As áreas identificadas pelo modelo como simultaneamente adequadas climaticamente, florestadas e próximas às áreas protegidas representam regiões prioritárias para ações de restauração ecológica, manejo da paisagem e planejamento da conservação, contribuindo para a manutenção da biodiversidade e da viabilidade das populações naturais da espécie em longo prazo.

6.DECLARAÇÃO

Durante a elaboração deste trabalho foi utilizada a ferramenta de inteligência artificial ChatGPT como recurso de apoio em atividades específicas, incluindo a tradução do resumo para o idioma inglês (Abstract), o aprimoramento da redação acadêmica e o desenvolvimento e aperfeiçoamento de rotinas computacionais empregadas na modelagem de distribuição potencial da espécie no ambiente R. A utilização da ferramenta teve caráter exclusivamente auxiliar, não substituindo a análise crítica, a interpretação dos resultados, as decisões metodológicas ou a produção intelectual do autor.

Após a utilização da ferramenta, todo o conteúdo gerado foi revisado, validado e editado pelo autor, que assume integral responsabilidade pela precisão, originalidade e integridade das informações apresentadas neste trabalho.

7. REFEERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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*, Oxford, v. 43, n. 6, p. 1223-1232, 2006.
- BELLARD, C.; BERTELSMEIER, C.; LEADLEY, P.; THUILLER, W.; COURCHAMP, F. Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, Oxford, v. 15, n. 4, p. 365-377, 2012.
- ELITH, J. et al. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, Copenhagen, v. 29, n. 2, p. 129-151, 2006.
- ELITH, J. et al. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, Oxford, v. 17, n. 1, p. 43-57, 2011.
- ELITH, J.; LEATHWICK, J. R. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, Palo Alto, v. 40, p. 677-697, 2009.
- FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, Chichester, v. 37, n. 12, p. 4302-4315, 2017.
- FRANKLIN, J. *Mapping species distributions: spatial inference and prediction*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- GALETTI, M. et al. Functional extinction of birds drives rapid evolutionary changes in seed size. *Science*, Washington, v. 340, n. 6136, p. 1086-1090, 2013.
- GODOY, R. C. B.; PEREIRA, L. O.; SEOANE, C. E. S.; RETT, H. T. *Juçara (Euterpe edulis M.): importância ecológica e alimentícia*. Colombo: Embrapa Florestas, 2022. 24 p. (Documentos, 372).
- GUISAN, A.; THUILLER, W. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, Oxford, v. 8, n. 9, p. 993-1009, 2005.
- HENDERSON, A.; GALEANO, G.; BERNAL, R. *Field guide to the palms of the Americas*. Princeton: Princeton University Press, 1995.
- HIJMANS, R. J. geodata: download geographic data. R package version 0.6-6, 2026. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=geodata>. Acesso em: 17 jun. 2026.
- HIJMANS, R. J. raster: geographic data analysis and modeling. R package version 3.6-32, 2025. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=raster>. Acesso em: 17 jun. 2026.
- HIJMANS, R. J. et al. dismo: species distribution modeling. R package version 1.3-16, 2024. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=dismo>. Acesso em: 17 jun. 2026.
- HIJMANS, R. J. et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, Chichester, v. 25, n. 15, p. 1965-1978, 2005.

HIJMANS, R. J.; BROWN, J.; BARBOSA, A. M. terra: spatial data analysis. R package version 1.8-60, 2026. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=terra>. Acesso em: 17 jun. 2026.

HUTCHINSON, G. E. Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, New York, v. 22, p. 415-427, 1957.

IPCC. *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023.

LIMA, R. A. F. et al. Comprehensive conservation assessments reveal high extinction risks across Atlantic Forest trees. *Science*, v. 384, n. 6695, p. 408-414, 2024.

LIU, C.; WHITE, M.; NEWELL, G. Selecting thresholds for the prediction of species occurrence with presence-only data. *Journal of Biogeography*, Oxford, v. 40, n. 4, p. 778-789, 2013.

LORENZI, H. *Flora brasileira: Arecaceae (Palmeiras)*. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2010.

MARTINS, C. C.; NAKAGAWA, J.; BOVI, M. L. A. Desiccation tolerance of juçara palm seeds (*Euterpe edulis* Mart.). *Seed Science and Technology*, Zurich, v. 28, p. 1-13, 2000.

MYERS, N. et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, London, v. 403, n. 6772, p. 853-858, 2000.

NAIMI, B. usdm: uncertainty analysis for species distribution models. R package version 2.1-7, 2023. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=usdm>. Acesso em: 17 jun. 2026.

PHILLIPS, S. J.; ANDERSON, R. P.; SCHAPIRE, R. E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, Amsterdam, v. 190, n. 3-4, p. 231-259, 2006.

PORTELA, R. C. Q.; TOURINHO, L.; SANTOS, T. V.; VALE, M. M. Juçara palm ecological interactions threatened by climate and land-cover changes. *Biotropica*, Hoboken, v. 55, p. 1-10, 2023. DOI: 10.1111/btp.13257.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation Project, 2026. Disponível em: <https://qgis.org>. Acesso em: 17 jun. 2026.

R CORE TEAM. *R: a language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2026. Disponível em: <https://www.r-project.org>. Acesso em: 17 jun. 2026.

REIS, A.; KAGEYAMA, P. Y. Dispersão e dinâmica populacional de *Euterpe edulis* Martius. In: REIS, A.; REIS, M. S. (org.). *Euterpe edulis Martius (Palmitreiro): biologia, conservação e manejo*. Itajaí: Herbário Barbosa Rodrigues, 2000. p. 101-120.

REIS, M. S. et al. *Euterpe edulis Martius (Palmitreiro): biologia, conservação e manejo*. Itajaí: Herbário Barbosa Rodrigues, 2000.

RIBEIRO, M. C. et al. The Brazilian Atlantic Forest: how much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. *Biological Conservation*, Amsterdam, v. 142, n. 6, p. 1141-1153, 2009.

SEOANE, C. E. S. et al. Efeitos da fragmentação florestal sobre populações de *Euterpe edulis* na Mata Atlântica. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, n. 68, p. 43-52, 2005.

SOUZA, A. C.; PREVEDELLO, J. A. Geographic distribution of the threatened palm *Euterpe edulis* Mart. in the Atlantic Forest: implications for conservation. *Oecologia Australis*, Rio de Janeiro, v. 23, n. 3, p. 636-643, 2019. DOI: 10.4257/oeco.2019.2303.19.