



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOLOGIA VEGETAL



CARLOS ALEXANDRE DOS SANTOS TEIXEIRA

**Modelagem e adequabilidade climática do clado ereta de *Oxypetalum*
(Asclepiadoideae, Apocynaceae)**

Campo Grande – MS
MAIO – 2025

CARLOS ALEXANDRE DOS SANTOS TEIXEIRA

**Modelagem e adequabilidade climática do clado ereta de *Oxypetalum*
(Asclepiadoideae, Apocynaceae)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Biologia Vegetal (PPGBV) da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Biologia Vegetal.

Orientadora: Prof. Dra. Maria Ana Farinaccio

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Leandro Bueno

Ficha Catalográfica

Teixeira, Carlos Alexandre dos Santos

Modelagem e adequabilidade climática do clado ereta de *Oxypetalum* (Asclepioideae, Apocynaceae)

Dissertação (Mestrado) – Instituto de Biociências da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

1. Conservação 2. Filogenia, 3. Nicho ecológico, 4. Sistemática

Comissão Julgadora

Prof (a). Dr. (a).
Instituição

Prof (a). Dr. (a).
Instituição

Prof (a). Dr. (a).
Instituição

Prof (a). Dr. (a).
Instituição

Prof. Dra. Maria Ana
Farinaccio
Orientadora

Agradecimentos

Agradeço, antes de mais nada, a Deus por toda a força, coragem e resiliência que me é concedida todos os dias. À minha família pelo apoio incondicional que sempre me foi dado; aos meus pais, Sueli e Luiz Carlos, pelo amor e incentivo; às minhas irmãs, Carla Drielly e Thaís Alexandra, pelo apoio e ajuda que me foram prestadas por toda a vida e, especialmente, nos últimos anos.

Não poderia deixar de agradecer aos meus orientadores, Profa. Maria Ana Farinaccio e Prof. Marcelo Leandro Bueno por me aceitarem como seu aluno e me guiarem por essa estrada tão difícil que é a pós-graduação; por toda a paciência e atenção que dedicaram a mim. Agradeço, também, à Universidade Federal do Mato Grosso do Sul e ao Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal por permitir a realização deste estudo. Aos professores Flávio Macedo Alves e Ângela Lúcia Bagnatori Sartori que compuseram a primeira banca do meu projeto e aos demais professores da pós-graduação, que contribuíram imensamente para o aprimoramento, não só do meu estudo, mas também do meu desenvolvimento como pesquisador.

Dos meus amigos, agradeço ao Guilherme por me ajudar a encontrar um lugar e apresentar a cidade de Campo Grande, completamente desconhecida por mim. À minha querida amiga Eliane Vieira que me acolheu em sua casa pelo período em que estive em sua cidade para realizar parte deste estudo. Aos meus outros colegas da pós-graduação, João Marcelo, Matheus Razzini, Rony Marcos, Vinícius Leite, pelos risos e muitos momentos de descontração.

Ao amor da minha vida, meu namorado Edson Rodrigo, agradeço pelo forte auxílio prestado nos momentos finais do estudo. Agradeço, especialmente às minhas melhores amigas e irmãs para a vida toda; Débora, que me escolheu como seu padrinho de casamento entre tantos amigos, que me acolheu em sua casa e me proporcionou uma das semanas mais divertidas que consigo me lembrar; à minha amiga Tainá, que sempre escuta e apoia minhas ideias malucas; e à minha amiga, irmã, parceira e confidente, Vitória, comigo há tantos anos e que sempre esteve presente quando eu precisei.

Finalmente, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por financiar meu estudo, permitindo que concluísse essa etapa da minha jornada.

SUMÁRIO

1.	RESUMO GERAL	6
2.	ABSTRACT	7
3.	INTRODUÇÃO GERAL	8
4.	Impacto das mudanças climáticas	8
5.	Modelagem de nicho ecológico e modelagem de distribuição de espécies	10
6.	Família Apocynaceae e caracterização do gênero <i>Oxypetalum</i>	13
7.	Histórico bibliográfico e distribuição geográfica de <i>Oxypetalum</i>	14
8.	OBJETIVOS	16
9.	REFERÊNCIAS	17
10.	ARTIGO 1	27
11.	RESUMO	28
12.	ABSTRATIC	28
13.	INTRODUÇÃO	29
14.	MATERIAL E MÉTODOS	31
15.	Organização e limpeza dos dados geográficos	31
16.	Dados das variáveis bioclimáticas	32
17.	Análise de dados – Modelos de distribuição de espécies (MDE)	33
18.	Mapas de Uso e Ocupação	34
19.	RESULTADOS	35
20.	Base de dados	35
21.	Distribuição do clado ereta	35
22.	Modelagem	36
23.	DISCUSSÃO	40
24.	CONCLUSÃO	43
25.	REFERÊNCIAS	44
26.	MATERIAL SUPLEMENTAR – ANEXO I	51
27.	MATERIAL SUPLEMENTAR – ANEXO II	52

RESUMO GERAL

Oxypetalum é um gênero neotropical da família Apocynaceae que possui uma filogenia bem resolvida, porém apresenta poucos estudos biogeográficos. Seleccionamos um clado com nove espécies eretas de *Oxypetalum*, a partir de uma filogenia previamente publicada, com objetivo de analisar sua distribuição e adequabilidade climática no presente e, em projeções futuras frente às mudanças climáticas, por meio da modelagem preditiva. Os dados geográficos foram obtidos de plataformas digitais e acurados de modo a eliminar pontos duvidosos, duplicatas e centroides. A área de estudo foi delimitada como área total ao redor dos pontos de ocorrência. Os dados foram organizados em uma matriz para a criação dos modelos do presente e do futuro. Posteriormente, os modelos foram combinados com mapas de remanescentes de vegetação para identificar áreas acessíveis às espécies no futuro. Nossos resultados mostraram que o clado ocorre principalmente no Cerrado, chegando até a Bolívia, centro da Argentina e Uruguai. Porém, a maior adequabilidade climática observada para o presente está na região sul do Brasil, alcançando o sul do Paraguai, leste da Argentina e do Uruguai. No futuro, toda a região do Cerrado se torna inadequada climaticamente para o clado ereta. Áreas adequadas são limitadas ao sul do Brasil, incluindo grande parte de Santa Catarina, leste do Paraná e Rio Grande do Sul. Ao combinar os mapas de adequabilidade climática com os remanescentes de vegetação, percebemos que as áreas acessíveis são restritas às regiões de altitude no leste do Paraná e sul de Santa Catarina. Áreas estáveis permanecem principalmente no Rio Grande do Sul. Concluimos que, apesar da preferência pelo clado ereta por ambientes mais quentes e secos, o aumento de eventos extremos de calor e seca ocasionado pelas mudanças climáticas, força o clado a buscar por áreas mais úmidas no futuro, em busca de estabilidade climática.

Palavras-chave: Distribuição geográfica, nicho ecológico, remanescente de vegetação.

ABSTRACT

Oxypetalum is a Neotropical genus of the Apocynaceae family that has a well-resolved phylogeny but few biogeographic studies. We selected a clade with nine erect species of *Oxypetalum*, from a previously published phylogeny, with the aim of analyzing its distribution and climatic suitability in the present and in future projections under climate change, through predictive modeling. The geographic data were obtained from digital platforms and curated to order to eliminate doubtful records, duplicates and centroids. The study area was defined as the total area surrounding the occurrence points. The data were organized in a matrix to create

models for the present and the future. Subsequently, the models were combined with maps of vegetation remnants to identify areas accessible to the species in the future. Our results showed that the clade occurs mainly in the Cerrado, extending to Bolivia, central Argentina and Uruguay. However, the greatest climatic suitability observed for the present is in the southern region of Brazil, extending into southern Paraguay, eastern Argentina, and Uruguay. In the future, the entire Cerrado region becomes climatically suitable for the erect clade. Specific areas are limited to southern Brazil, including much of Santa Catarina, eastern Paraná and Rio Grande do Sul. By combining the climatic suitability maps with remaining vegetation, we found that accessible areas are restricted to high-altitude regions in eastern Paraná and southern Santa Catarina. Remnant areas persist mainly in Rio Grande do Sul. We conclude that, despite the preference of the erect clade for warmer and drier environments, the increase in extreme heat and drought events caused by climate change will force the clade to seek more humid areas in the future, in search of climatic stability.

Keywords: Geographical distribution, ecological niche, vegetation remnant.

INTRODUÇÃO GERAL

Impacto das mudanças climáticas

Nas últimas décadas muito se tem falado sobre as mudanças climáticas e seus efeitos sobre a biodiversidade. Tais mudanças climáticas não são recentes e possuem um viés histórico que remete à Revolução Industrial. O evento histórico do século XVIII marcou o início da automação do trabalho, bem como a intensificação da emissão de gases de efeito estufa pela humanidade (Wolf 2021).

O termo “Aquecimento Global” foi cunhado pela primeira vez em 1975 por Wallace Broecker que alertou sobre a iminente ameaça das alterações climáticas (National Academy of Science 1979). Já nessa época surgiram iniciativas de instituições e do Estado para realização de pesquisas sobre as mudanças climáticas (Wolf, 2021). Na década de 1990, os debates sobre a emissão de gases poluentes e as alterações ambientais que acarretam passaram a ser pauta entre a comunidade científica (Simon et al. 2013).

Artaxo (2020) afirma que as mudanças climáticas são apenas uma das crises enfrentadas pela sociedade e ressalta que sua consequência, a perda da biodiversidade, impacta diretamente a população humana. Segundo esse autor, as crises citadas são um reflexo do atual modelo econômico que segue a premissa de se obter o maior lucro no menor tempo, fazendo com que preocupações com os ecossistemas e a biodiversidade sejam deixados em segundo plano. Logo, proteger a biodiversidade e seus ecossistemas beneficia de diversas formas a espécie humana, sendo alguns exemplos a polinização para agricultura e o controle natural de pragas (Costa & Mello 2021).

Globalmente, os principais fatores antrópicos que ameaçam os ecossistemas e resultam nos declínios populacionais e a extinção de espécies são a perda, degradação e fragmentação de habitats, invasão de espécies exóticas, superexploração, poluição e contaminação ambiental que resultam na manifestação de doenças infecciosas, além do aumento de temperatura (Butchart et al. 2010; Costa & Mello 2021).

Landau et al. (2009) chama atenção para a elevação da temperatura média global. Segundo os autores, a maioria dos organismos sobrevivem dentro de limites estreitos de temperatura. Logo, variações bruscas na amplitude térmica de uma região afetam diretamente os organismos ali presentes, colocando em risco sua sobrevivência.

Analisando as tendências na variação de temperatura no Brasil, Landau et al. (2009) constataram que até o período de 2070-2099 haverá um aumento de até 13,4°C na amplitude térmica no oeste da Amazônia brasileira. Esse cenário evidencia a vulnerabilidade desses

ambientes frente às mudanças climáticas, estando sujeito ao desequilíbrio ecológico e desertificação, que acarretam na perda de sua biodiversidade natural que não consegue acompanhar as transformações abruptas no ambiente (Alves et al. 2020).

A Biologia da Conservação surge como uma resposta às ameaças enfrentadas pela biodiversidade às alterações provocadas pelo homem (Costa & Mello 2021; Rodrigues 2002). Embora o termo tenha surgido ainda na década de 1950 com os avanços na área da Ecologia, foi apenas em meados de 1980 que a Biologia da Conservação tomou forma como uma ciência multidisciplinar (Brito 2018; Costa & Mello 2021).

O termo “ciência de crise” foi cunhado de modo a chamar atenção para a extrema necessidade de proteger e preservar a biodiversidade das transformações impostas pelas atividades humanas (Costa & Mello 2021). Tendo como prioridade a preservação das comunidades biológicas, a Biologia da Conservação busca entender a forma como essas são afetadas pelas ações antrópicas e assim, desenvolver métodos que auxiliem no manejo e conservação dessas populações (Primack & Rodrigues 2001; Brito 2018). Para isso, Rodrigues (2002) ressalta a importância da incorporação de outras áreas do conhecimento pela Biologia da Conservação de modo a se preservar a biodiversidade.

No Brasil, a conservação da biodiversidade passou a ter enfoque a partir da década de 1970 com a criação de parques e Unidades de Conservação e a criação de listas estaduais e nacionais de espécies ameaçadas de extinção (Mittermeier et al. 2005; Costa & Mello 2021).

No âmbito da conservação da biodiversidade, o Brasil merece especial atenção, sendo considerado um dos países mais diversos e ricos em espécies do mundo, abrigando em torno de 15% da biota mundial (Machado et al. 2004; Artaxo 2020). Além disso, o Brasil chama atenção pelas suas florestas tropicais, em especial a Floresta Amazônica a qual ocupa mais da metade de seu território (Muniz et al. 2022).

Estima-se que as florestas tropicais sejam as responsáveis por abrigar cerca de metade das espécies descritas e uma porcentagem ainda maior de espécies não descritas, sendo consideradas os epicentros da biodiversidade global (Wright 2010). Esses centros de diversidade possuem papel de destaque na manutenção do clima regional e global, influenciando diretamente na emissão e retenção de gases, na evapotranspiração, entre outros (Carneiro et al. 2013). Dessa forma, grandes alterações nas florestas tropicais afetam não apenas a biodiversidade local, como também, o clima global.

Entre os anos de 1996 e 2005, o Brasil liderou o desmatamento das florestas tropicais, substituindo cerca de 19.500 km² de floresta nativa por áreas agrícolas e de pastagem (Muniz et al. 2022). Desmatamento esse que, somado às mudanças climáticas, impacta diretamente no

clima da América do Sul e no aquecimento global, alterando o transporte de vapor de água e a incidência de sol sobre a superfície. Como consequência, há uma perturbação no ciclo natural de precipitação, a circulação atmosférica, aumentando a intensidade e a frequência de eventos climáticos extremos, como secas prolongadas ou chuvas torrenciais (Artaxo 2020; Campos et al. 2024).

Prever como as mudanças climáticas afetarão os organismos é de fundamental importância para se proteger a biodiversidade (Wolf 2021). A necessidade de aprofundamento do conhecimento acerca das espécies fez aumentar a demanda por novas tecnologias e ferramentas de análise que auxiliassem, dessa forma, na sua conservação (Giannini et al. 2012). Nesse contexto, a combinação de estudos sobre biodiversidade com a computação, possibilitou a criação dos primeiros modelos preditivos de distribuição de espécies e posteriormente a criação de softwares mais elaborados que são usados em trabalhos voltados para a conservação da biodiversidade (Giannini et al. 2012).

Modelagem de Nicho Ecológico e Modelagem de Distribuição de Espécies

Estudos com foco no desenvolvimento de técnicas computacionais de avaliação da influência das variáveis ambientais sobre a distribuição das espécies começaram na década de 1970, com avanços nos anos 1990 (Guisan & Thuiller 2005; Mendes et al. 2024). Sobretudo nas últimas duas décadas, modelos de distribuição geográfica baseados em variáveis ambientais ganharam muito destaque em diferentes áreas do conhecimento, como ecologia, biogeografia e conservação (Guisan et al. 2013; Bueno et al. 2017; Valavi et al. 2022). Isso se deve, principalmente, pela versatilidade das técnicas de modelagem que podem ser empregadas com diferentes objetivos, tais como: conservação e reintrodução de espécies ameaçadas (Wan et al. 2016; Bellis et al. 2021); potencial de espécies invasoras (Dombrowski et al. 2023) e disseminação de doenças (Dobbelaere et al. 2020); impacto das mudanças climáticas na distribuição de espécies (Souza et al. 2024); distribuição das espécies no passado (Suicmez & Avci 2023), determinação de áreas prioritárias para conservação (González-Fernández et al. 2022), entre outros.

A modelagem consiste em uma análise computacional onde informações conhecidas sobre as espécies, geralmente pontos de ocorrência, são combinados com fatores ambientais, tais como clima, solo e cobertura vegetal, para se obter um escopo das condições necessárias à sobrevivência das espécies (Gaia et al. 2020; Amaral et al. 2021; Kass et al. 2024; Thuiller 2024). Esse processo, comumente chamado de modelagem de distribuição de espécies (MDE) ou modelagem de nicho ecológico (MNE), sendo os dois termos usados como sinônimos na

literatura (Peterson & Soberón 2012; Alexandre et al. 2013; Mendes et al. 2020).

A modelagem de nicho ecológico tem como objetivo a identificação de áreas potencialmente adequadas onde a espécie pode ocorrer, mas não há registro dela nessas regiões, resgatando o conceito de nicho fundamental, que corresponde às condições favoráveis à sobrevivência da espécie sem considerar interações bióticas (Peterson & Soberón 2012; Alexandre et al. 2013). Geralmente baseados apenas em fatores climáticos, os MNEs apontam áreas adequadas muito grandes, onde possivelmente a espécie não ocorre por fatores relacionados à capacidade de dispersão, barreiras geográficas, intervenção humana ou competição (Yang et al. 2013). Uma das estratégias que permitem minimizar a sobreprevisão dos modelos é a inclusão de outras variáveis em conjunto com as variáveis climáticas, como, por exemplo, variáveis edáficas (Syphard & Franklin 2009; Velazco et al. 2017).

Modelos de distribuição de espécies, por outro lado, passam pelas mesmas etapas que os MNEs, porém, requerem procedimentos adicionais, de modo a tornar as áreas potenciais apontadas mais realistas em relação à distribuição das espécies (Peterson & Soberón 2012). Essas etapas podem incluir dados sobre a capacidade de dispersão e colonização da espécie e a delimitação de áreas acessíveis, além de dados bióticos (Peterson & Soberón 2012; Mendes et al. 2020). Em suma, ambos os tipos de modelagem compartilham de metodologias semelhantes, com os modelos de distribuição tendo por objetivo identificar áreas mais precisas de ocorrência das espécies, enquanto modelos de nicho, em geral, concentram-se em identificar áreas de potenciais de ocorrência.

Entre as etapas da modelagem que resultam nas representações preditivas de distribuição das espécies, a primeira é a obtenção e preparação dos dados de ocorrência georreferenciados (Santana et al. 2008), geralmente obtidos de coleções biológicas e museus. Hoje o acesso a tais dados é facilitado por meio dos grandes bancos de dados digitais que buscam padronizar e compartilhar as informações antes restritas às diferentes coleções biológicas. Um grande exemplo é o GBIF, Global Biodiversity Information Facility (<https://www.gbif.org/>), que disponibiliza dados sobre a biodiversidade global, bem como o SpeciesLink (Canhos et al. 2022) (<https://specieslink.net/>) e REFLORA (<https://floradobrasil.jbrj.gov.br/>) no Brasil, que tem o mesmo objetivo, com foco na biodiversidade brasileira. Esta etapa também inclui a obtenção de dados de ausência das espécies, porém esses dados raramente estão disponíveis na bibliografia, sobretudo pela sua dificuldade de obtenção (Giannini et al. 2012).

A segunda etapa consiste na seleção das variáveis ambientais a serem utilizadas, essas variáveis correspondem a dados georreferenciados que contém informações a respeito de fatores ambientais, geralmente abióticos. Dentre elas, as variáveis climáticas do Worldclim (Hijmans

et al. 2005) estão entre as mais utilizadas em estudos de modelagem. Nesses estudos, deve-se evitar o uso de variáveis correlacionadas, pois isso pode resultar em erros de sobreprevisão. Para isso são empregadas técnicas de seleção de variáveis que removem a multicolinearidade entre as variáveis (Giannini et al. 2012).

Uma das técnicas utilizadas na seleção de variáveis ambientais é a análise de componentes principais (PCA); essa técnica produz componentes não correlacionados em quadrantes com base nos dados originais, selecionando aqueles que melhor explicam a variância dos dados originais. Essa técnica tem como uma de suas vantagens a exclusão de variáveis correlacionadas e a redução no número de variáveis utilizadas (Cruz-Cárdenas et al. 2014; Brasil et al. 2021). Outra técnica utilizada na seleção de variáveis são os fatores de inflação de variância (VIF) (Chatterjee & Hadi 2006). O VIF consiste na identificação e remoção de variáveis multicolineares, por meio do cálculo do quadrado do coeficiente múltipla resultante da regressão de uma variável em relação às outras. Há duas técnicas que são empregadas na seleção de variáveis dessa forma: VIFstep e VIFcor. O VIFstep remove as variáveis com valores de VIF elevados em processos sucessivos, até que restem apenas aquelas de valores aceitáveis. O VIFcor atua em uma matriz de correlação, dividindo as variáveis em duplas e excluindo aquelas com maior VIF (Naimi et al. 2014).

Não há consenso entre os algoritmos que devem ser utilizados na modelagem, pois isso dependerá dos objetivos do trabalho (Giannini et al. 2012). No entanto, alguns algoritmos se destacam entre os diferentes estudos de modelagem por sua versatilidade e facilidade de uso. O algoritmo MaxEnt (Phillips et al. 2006) é frequentemente citado como um dos mais utilizados, pois apresenta bons resultados com poucos dados de ocorrência e por não depender da existência de dados de ausência que são escassos nos bancos de dados (Wisz et al. 2008; Valavi et al. 2022; Miranda et al. 2024). Entretanto, muitos algoritmos requerem dados de pseudo-ausência que são distribuídos pela área de estudo durante a calibração do modelo (Mendes et al. 2020). O número de pseudo-ausências utilizadas varia entre os autores, podendo ser igual ao número de ocorrências da espécie (Velazco et al. 2017), enquanto outros utilizam valores maiores, chegando a 100 pontos de pseudo-ausência por cada ponto de ocorrência (Lobo & Tognelli 2011).

Antes da modelagem, é feita a avaliação dos modelos de teste. Esses modelos são gerados a partir de uma parcela dos dados da distribuição conhecida das espécies, que não foram utilizados, chamados de modelos de treino (Giannini et al. 2012). Essa análise de qualidade dos modelos é feita de forma estatísticas e possui diversas técnicas, entre elas a análise da curva característica de operação (ROC) (Fielding & Bell 1997) que define a qualidade preditiva do

modelo calculando o valor da área sob a curva (AUC) (Phillips et al. 2006). Os valores de AUC variam entre 0,5 e 1,0, onde 0,5 indica que o modelo diferencia as presenças e ausências aleatoriamente e 1,0 significa que o modelo diferencia corretamente a presença das ausências (Yang et al. 2013; Cruz-Cárdenas et al. 2014; Gaia et al. 2020; Hao et al. 2020).

Outra técnica utilizada na avaliação dos modelos é a estatística de habilidade verdadeira (TSS) (Allouche et al. 2006). Semelhante ao AUC, esse método mede a qualidade dos modelos por uma escala numérica que vai de -1 a +1; valores de TSS acima de 0,7 representam modelos com boa capacidade preditiva (Brasil et al. 2021; Valavi et al. 2022).

Após a avaliação, os modelos são gerados e agrupados em um modelo de conjunto, os quais combinam diversos modelos gerados por diferentes algoritmos (Hao et al. 2020). Devido ao seu poder combinado, os modelos ensemble são amplamente aceitos e utilizados para fornecer resultados mais precisos do que os modelos individuais (Giannini et al. 2012; Brasil et al. 2021; Thuiller 2024).

Família Apocynaceae e caracterização do gênero *Oxypetalum*

A família Apocynaceae Juss. inclui cerca de 5350 espécies e 400 gêneros com distribuição predominantemente pantropical, com menos incidência em regiões subtropicais e temperadas (Simões et al. 2016; Endress et al. 2018). No Brasil ocorrem 103 gêneros e 1012 espécies (Flora & Funga do Brasil 2020). Apocynaceae pode ser reconhecida pela presença de látex, corola gamopétala, gineceu bicarpelar, com carpelos total ou parcialmente sincárpicos, unidos na cabeça do estilete (Rapini et al. 2012).

Apocynaceae se destaca pela grande importância de suas espécies em diferentes setores econômicos, com destaque para o gênero *Aspidosperma* Mart. & Zucc. na obtenção de madeira de alta qualidade para a carpintaria (Castello et al. 2018), na química e farmacologia na obtenção de alcaloides indólicos (Oliveira et al. 2009), e outras são conhecidas por seu uso no paisagismo urbano, como os gêneros *Allamanda* L., *Asclepias* L., *Catharanthus* G.Don., *Mandevilla* Lindl. (Souza & Lorenzi 2019).

A classificação atual inclui Apocynaceae como família e cinco subfamílias associadas, sendo elas: Apocynoideae Burnett, Asclepiadoideae R.Br. ex. Burnett, Periplocoideae Endl., Rauvolfioideae Kostel e Secamonoideae Endl. (Endress & Bruyns 2000; Mendes & Chaves 2015; Fishbein et al. 2018). Periplocoideae e Secamonoideae são as únicas que não ocorrem no Brasil (Farinaccio & Simões 2016).

Asclepioideae é a maior subfamília de Apocynaceae, incluindo mais da metade de seus táxons. Estima-se que a subfamília inclui cerca de 181 gêneros e 3400 espécies (Fishbein et al. 2018;

Endress et al. 2019; Beckers et al. 2022). Asclepiadoideae têm origem africana (Bitencourt et al. 2021), tendo a América tropical como um de seus centros de diversidade, com cerca de 47 gêneros e 1150 espécies (Goyder 2006; Koschnitzke 2015). No Brasil ocorrem por volta de 38 gêneros e 492 espécies (Goes & Pereira 2009). As espécies de Asclepiadoideae apresentam diferentes formas de vida, incluindo trepadeiras, eretas, suculentas e epífitas (Endress et al. 2019; Beckers et al. 2022). A subfamília também possui algumas das flores mais elaboradas e complexas morfológicamente, sendo uma das características mais marcantes os grãos de pólen presentes em polínios (Farinaccio 2008; Koschnitzke 2015).

Oxypetalum R.Br. é o maior gênero em número de espécies da subtribo Oxypetalinae K. Schum. (Farinaccio 2008; Endress & Bruyns 2000). *Oxypetalum* é neotropical incluindo cerca de 140 espécies com distribuição mais ou menos restrita, ocorrendo desde a Argentina até o México e Caribe, com maior diversidade no centro norte da Argentina, Brasil e Paraguai (Farinaccio & Goyder 2016; Gonzáles & Keller 2020; Keller & Funez 2017; Keller et al. 2021; Keller 2022). O Brasil possui 91 espécies de *Oxypetalum*, sendo considerado seu principal centro de diversidade com a maioria das espécies ocorrendo no sul e sudeste do país (Farinaccio & Mello-Silva 2006; Farinaccio 2008; Farinaccio & Goyder 2016; Flora & Funga do Brasil 2020).

Oxypetalum apresenta diferentes hábitos, incluindo plantas volúveis, ervas e subarbustos eretos, com a maioria das espécies sendo trepadeiras (Keller et al. 2021; Keller 2022). As espécies do gênero ocorrem principalmente em regiões de savana, campos e bordas de mata (Farinaccio & Goyder 2016). Além da forma de vida variável, o gênero é conhecido pela grande variação morfológica, o que faz com que o reconhecimento de seus táxons seja feito com base na combinação de caracteres (Farinaccio 2008; Farinaccio & Goyder 2016; Martin et al. 2017).

Histórico bibliográfico e distribuição geográfica de *Oxypetalum*

A maioria dos estudos que incluíram espécies de *Oxypetalum* focaram na descrição de novas espécies ou levantamentos florísticos (e.g. Farinaccio & Mello-Silva 2004; Rapini et al. 2001; Marquete et al. 2007); estudos recentes de *Oxypetalum* também possuem essa mesma abordagem, focando em sua taxonomia e descrição de espécies (Keller 2015; Farinaccio & Goyder 2016; Martin et al. 2017; Gonzáles et al. 2018; Gonzáles & Keller 2020; Keller 2020; Keller et al. 2021; Keller 2022). Alguns outros trabalhos recentes também incluem análises químicas (Warashina & Shiota 2021; Warashina et al. 2023) e anatômicas (Vital & Nakamura 2018). O gênero ainda foi alvo de estudos filogenéticos mais amplos que incluíram poucas espécies e que buscavam resolver as relações entre as Oxypetalinae (Rapini et al. 2003; Liede-Schumann et al. 2005).

Farinaccio (2008) desenvolveu o estudo filogenético com foco nas espécies de *Oxypetalum*. Seus resultados mostraram que o gênero emerge como grupo irmão das demais Oxypetalinae, entretanto este não nomeava um clado, pois *Schistogyne* emergia entre as *Oxypetalum*. Assim, Rapini et al. (2011) propuseram a sinonimização de *Schistogyne* em *Oxypetalum*, tornando esse último monofilético.

Estudos com vieses biogeográficos foram desenvolvidos de forma mais ampla, com maior foco na subfamília Asclepiadoideae e nas relações filogenéticas entre seus táxons (e.g. Goyder 2006). Sob a luz da filogenia, Rapini et al. (2007) realizaram um levantamento da distribuição atual das Asclepiadoideae neotropicais. Os resultados mostraram que a subfamília Asclepiadoideae se originou há 40 milhões de anos, no continente africano. Estudos posteriores mostraram que Asclepiadoideae pode ser ainda mais antiga, tendo irradiado há 44,5 milhões de anos (Fishbein et al. 2018) ou ainda, há 49 milhões de anos (Del Rio et al. 2020). Em contraste, a família Apocynaceae irradiou muito mais cedo, há 85,6 milhões de anos (Fishbein et al. 2018).

A colonização do neotrópico se deu após a diversificação de Asclepiadoideae em quatro momentos diferentes (Rapini et al. 2003). As subtribos Metastelmatinae, Oxypetalinae, e Gonolobinae foram as primeiras a irradiar no Neotrópico, cerca de 32 milhões de anos atrás (Rapini et al. 2007).

As Oxypetalinae ocorrem principalmente no centro-sul da América do Sul, com poucas espécies ocorrendo no norte. Essa distribuição desproporcional da subtribo sugere períodos diferentes de diversificação, sendo o primeiro durante o Mioceno na região central da América do Sul. O gênero *Oxypetalum* irradiou em dois momentos distintos, sendo o primeiro cerca de 16 milhões de anos atrás e o segundo, 8 milhões de anos depois (Rapini et al. 2007).

Apesar do amplo número de estudos de *Oxypetalum*, a maioria tem um viés taxonômico e filogenético mais abrangente. Estudos biogeográficos que incluíram representantes de *Oxypetalum* o fizeram de forma mais abrangente, com maior ênfase nas Asclepiadoideae e em grande parte, com viés histórico, buscando entender a origem e diversificação das Asclepiadoideae. Por outro lado, estudos biogeográficos de *Oxypetalum* são inexistentes.

Em contraste com a filogenia bem resolvida, pouco se sabe a respeito da distribuição geográfica de *Oxypetalum* e os fatores que a influenciam. Tendo em vista as alterações climáticas, *Oxypetalum* é um grupo de especial importância, considerando a distribuição restrita de grande parte de suas espécies e o impacto que as mudanças climáticas acarretarão sobre as elas. Assim, acreditamos que esse estudo possa contribuir para elucidar os padrões de distribuição geográfica atuais, identificando as variáveis mais relevantes para a distribuição de espécies de *Oxypetalum*.

e como sua distribuição será afetada pelas mudanças climáticas em cenários futuros.

OBJETIVOS

1. Verificar a distribuição geográfica das espécies do clado ereta de *Oxypetalum*;
2. Identificar as variáveis ambientais que influenciam na distribuição do clado ereta;
4. Construir mapas de distribuição e adequabilidade do clado ereta de *Oxypetalum*;
5. Criar mapas preditivos de distribuição do clado ereta de *Oxypetalum*;
6. Verificar se o clado ereta apresentará remanescentes de vegetação com adequabilidade climática no futuro.

REFERÊNCIAS

- Alexandre, A.; Lorini, M. L.; Grelle, C. E. V.** 2013. Modelagem preditiva de distribuição de espécies ameaçadas de extinção: um panorama das pesquisas. *Oecologia Australis*, 17 (4): 483–508.
- 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.
- Alves, G. B. M., Mendonça, V. M., Martarello, A. P., Pessi, D. D., Vieira, A., & Loverde-Oliveira, S. M.** (2020). Análise ambiental do desmatamento em área de assentamento rural no Cerrado (Mato Grosso, Brasil). *Terra Plural*, 14, 1–13. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/tp/article/view/15189>.
- Amaral, S.; Costa, C. B.; Arasato, L. S.; Ximenes, A. C.; Rennó, C. D.** 2013. AMBDATA: variáveis ambientais para Modelos de Distribuição de Espécies (MDEs). *Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR*, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.
- Araújo, M. B.; Williams, P. H.** 2000. Selecting areas for species persistence using occurrence data. *Biological Conservation*, 96 (3): 331–345.
- Artaxo, P.** 2020. As três emergências que nossa sociedade enfrenta: saúde, biodiversidade e mudanças climáticas. *Estudos Avançados*, 34 (100): 53–66. DOI: 10.1590/s0103-4014.2020.34100.005.
- Beckers, V.; Rapini, A.; Smets, E. & Lens, F.** 2022. Comparative wood anatomy and origin of woodiness in subfamilies Secamonoideae and Asclepiadoideae (Apocynaceae). *Taxon*, 71 (6): 1230–1250. DOI: 10.1002/tax.12790.
- Bellis, J. M.; Jones, M. F.; Hansen, D. M.; Graves, J. P. & Smith, R. J.** 2021. Using species distribution models to prioritize areas for plant reintroductions. *Ecological Applications*, 31 (2): e02224. DOI: 10.1002/eap.2224.
- Bitencourt, C.; Rapini, A. & Giuliatti, A. L.** 2021. Origin and biogeographic diversification of the subfamily Asclepiadoideae (Apocynaceae) in the Neotropics. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 162: 107205. DOI: 10.1016/j.ympev.2021.107205.
- Brasil, A. M.; Silva, T. L.; Ribeiro, D. S.; Lima, F. C. P. & Martins, M. S.** 2021. Avaliação de modelos de distribuição potencial de espécies arbóreas no Cerrado brasileiro. *Revista Árvore*, 45: e4505. DOI: 10.1590/1806-908820210000005.
- Bueno, M. L.; Rezende, V. L.; Pontara, V.** 2017. Florestic distributional patterns in a diverse ecotonal area in South America. *Plant Ecology*, 218: 1171–1186.

- Butchart, S. H. M., Walpole, M., Collen, B., Van Strien, A., Scharlemann, J. P. W., Almond, R. E. A., Baillie, J. E. M., Bomhard, B., Brown, C., Bruno, J., Carpenter, K. E., Carr, G. M., Chanson, J., Chenery, A. M., Csirke, J., Davidson, N. C., Dentener, F., Foster, M., Galli, A., Galloway, J. N., Genovesi, P., Gregory, R. D., Hockings, M., Kapos, V., Lamarque, J. F., Leverington, F., Loh, J., Mcgeoch, M. A., Mcrae, L., Minasyan, A., Morrison, J. C., Pauly, D., Quader, S., Revenga, C., Sauer, J. R., Skolnik, B., Spears, B. M., Stanwell-Smith, D., Stuart, S. N., Symes, A., Tierney, M., Tyrrell, T. D., Vié, J. C. & Watson, R. (2010). Global biodiversity: indicators of recent declines. *Science*, 328(5982), 1164–1168. <https://doi.org/10.1126/science.1187512>.
- Campos, G. M.; Santos, G. O.; Alievi, L. A.; Cantão, V. C. G. 2024. Mudanças climáticas e seus efeitos sobre a água no solo no cultivo de soja e milho em sucessão no Cerrado. *Observatório de la Economía Latinoamericana*, 22 (5): 1–23. DOI: 10.55905/oelv22n5-152.
- Carneiro, R. G.; Chaves, I. R.; Oliveira, L. F. C.; Silva, E. F. F.; Lima, E. R.; Santos, A. L. 2013. Estudo da temperatura do solo em dois biomas florestais nos períodos chuvoso e seco. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 6 (4): 1009–1022. DOI: 10.26848/rbgf.v6i4.233092.
- Castello, A. C. D.; Pereira, A. S. S.; Messias, P. A.; Scudeles, A. L.; Moura, Y. A.; Koch, I. 2018. Two new species of *Aspidosperma* (Apocynaceae) from Northeast Brazil and a monograph of the species from Ceará State. *Systematic Botany*, 43 (4): 1030–1045.
- Chase, J. M.; Leibold, M. A. 2003. *Ecological niches: linking classical and contemporary approaches*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Chatterjee, S.; Hadi, A. S. 2006. *Regression analysis by example*. 4^a ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Costa, R. N.; Mello, R. 2021. Um panorama sobre a biologia da conservação e as ameaças à biodiversidade brasileira. *Sapiens: Revista de Divulgação Científica da UEMG*, v. 2, p. 50–69.
- Cruz-Cárdenas, G.; López-Mata, L.; Villaseñor, J. L. & Ortiz, E. 2014. Potential species distribution modeling and the use of principal component analysis as predictor variables. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85 (1): 189–199. DOI: 10.7550/rmb.36723.
- Cutler, D. R.; Edwards, T. C.; Beard, K. H.; Cutler, A.; Hess, K. T.; Gibson, J.; Lawler, J. J. 2007. Random forest for classification in ecology. *Ecology*, 88 (1): 2783–2792.
- Dambrowski, V.; Refosco, J. C.; Vitorino, M. D. 2023. Modelagem de nicho potencial para espécies exóticas invasoras *Tithonia diversifolia* e *Hovenia dulcis* em Santa Catarina. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, 16 (4): e7816. DOI: 10.17765/2176-9168.2023v16n4e7816.
- Del Rio, C.; Wang, T.-X.; Liu, J.; Liang, S.-Q.; Spicer, R. A.; Wu, F.-X.; Zhou, Z.-K.; Su, T. 2020. *Asclepiadospermum* gen. nov., the earliest fossil record of *Asclepiadoideae*

(Apocynaceae) from the early Eocene of central Qinghai-Tibetan Plateau, and its biogeographic implications. *American Journal of Botany*, 107 (1): 126–138. DOI: 10.1002/ajb2.1418.

Dobbelaere, T.; Muller, E. M.; Gramer, L. J.; Holstein, D. M.; Hanert, E. 2020. Coupled epidemio-hydrodynamic modeling to understand the spread of a deadly coral disease in Florida. *Frontiers in Marine Science*, 7: 591881. DOI: 10.3389/fmars.2020.591881.

Elith, J. 2002. Quantitative methods for modeling species habitat: comparative performance and an application to Australian plants. In: *Quantitative Methods for Conservation Biology*. Springer, New York, p. 39–58.

Elith, J.; Leathwick, J. R. 2009. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 40: 677–697.

Endress, M. E.; Bruyns, P. V. 2000. A revised classification of the Apocynaceae. *The Botanical Review*, 66 (1): 1–56.

Endress, M. E. et al. 2018. Apocynaceae. In: *Flowering plants eudicotiledôneas. The families and genera for vascular plants*. Springer, Families Genera, 15.

Engler, R.; Guisan, A.; Rechsteiner, L. 2004. An improved approach for predicting the distribution of rare and endangered species from occurrence and pseudo-absence data. *Journal of Applied Ecology*, 41: 263–274.

Farinaccio, M. A.; Mello-Silva, R. 2004. Asclepiadoideae (Apocynaceae) do Parque Nacional da Serra da Canastra, Minas Gerais, Brasil. *Boletim de Botânica da Universidade de São Paulo*, 22 (1): 53–92.

Farinaccio, M. A. 2008. Sistemática molecular de *Oxypetalum* R.Br. (Apocynaceae, Asclepiadoideae). Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

Farinaccio, M. A.; Goyder, D. J. 2016. A synopsis of *Oxypetalum* (Apocynaceae) in Bolivia, with the description of one new species and a key to species in Bolivia. *Phytotaxa*, 267 (1): 16–28. DOI: 10.11646/phytotaxa.267.1.2.

Farinaccio, M. A.; Simões, A. O. 2016. Check-list das Apocynaceae do estado do Mato Grosso do Sul, Brasil. *Iheringia, Série Botânica*, 73 (supl.): 131–146.

Fick, S. E. & Hijmans, R. J. 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Journal of climatology*, 37 (12): 4302–4315.

Fielding, A. H. & Bel, J. F. 1997. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation*, 24: 38–49.

Fishbein, M., Livshultz, T., Straub, S. C. K., Simões, A. O., Boutte, J., McDonnell, A. & Foote, A. 2018. Evolution on the backbone: Apocynaceae phylogenomics and new perspectives

on growth forms, flowers and fruits. *American Journal of Botany*, 105 (3): 495-513.

Flora e funga do Brasil. 2020. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB48>. Acesso em: 21 ago. 2024.

Flora e funga do Brasil. 2020. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB4741>. Acesso em: 21 ago. 2024.

Franklin, J. 2009. Species distribution modeling. In: **Franklin, J.** (ed.). *Mapping species distributions: spatial inference and prediction*. Cambridge University Press. p. 3–20.

Gaia, J. A. S.; Souza, B. I.; Lucena, R. F. P.; Souza, R. S.; Gaia, C. L. B. 2020. Modelagem e distribuição potencial de espécies arbóreas relevantes para a dinâmica sociocultural e ecológica do Parque Nacional de Sete Cidades, Piauí, Brasil. *Sociedade & Natureza*, v. 32, p. 832–846. DOI: 10.14393/SN-v32-2020-51103.

GBIF. 2024. GBIF Home Page. Disponível em: <https://www.gbif.org>. Acesso em: 07 jul. 2023.

Giannini, T. C., Siqueira, M. F., Acosta, A. L., Barreto, F. C. C., Saraiva, A. M. & Alves-dos-Santos, I. 2012. Desafios atuais da modelagem preditiva de distribuição de espécies. *Rodriguesia*, 63 (3): 733-749.

Goes, M. B. & Pereira, J. F. 2009. Asclepiadoideae (Apocynaceae) no Município de Santa Teresa, Espírito Santo, Brasil. *Rodriguesia*, 60 (3): 509-529.

González, A.; Fernández, M.; Ezcurra, C. 2018. *Oxypetalum marchesii* (Apocynaceae, Asclepiadoideae), an endemic new species from Uruguay. *Systematic Botany*, 43 (3): 812–817. DOI: 10.1600/036364418X697535.

González, A.; Keller, H. A. 2020. El género *Oxypetalum* (Apocynaceae) en Uruguay, nueva especie y clave de identificación. *Darwiniana*, Nueva Serie, 8 (1): e882. DOI: 10.14522/darwiniana.2020.81.882.

González-Fernández, A.; González-Salazar, C.; Sunny, A.; Ruíz-Gutiérrez, F.; Chávez, C. 2022. Determination of priority areas for amphibian conservation in Guerrero (Mexico), through systematic conservation planning tools. *Journal for Nature Conservation*, 68: 126235. DOI: 10.1016/j.jnc.2022.126235.

Goyder, D. J. 2006. An overview of Asclepiad biogeography. In: **Ghazanfar, S. A. & Beentje, H. J.** (eds). *Taxonomy and ecology of African plants, their conservation and sustainable use*. Royal Botanic Gardens, Kew, p. 205-214.

Graham, C. H., Ferrier, S., Huettman, F., Moritz, C. & Peterson, A. T. 2004. New developments in museum-based informatics and applications in biodiversity analysis. *Trends in Ecology and Evolution*, 19: 497-503.

Guisan, A. & Thuiller, W. 2005. Predicting species distribution: offering more than simple

habitat models. *Ecology Letters*, 8: 993-1009.

Guisan, A.; Tingley, R.; Baumgartner, J. B.; Naujokaitis-Lewis, I.; Sutcliffe, P. R.; Tulloch, A. I.; Potter, A.; Singleton, G.; Schwartz, M. W.; Poland, J.; Ferrier, S.; Roux, M.; Araújo, M. B.; Buckley, Y. M. (2013). Predicting species distributions for conservation decisions. *Ecology Letters*, 16, 1424–1435. DOI: 10.1111/ele.12189.

Hao, T.; Elith, J.; Lahoz-Monfort, J. J.; Guillera-Arroita, G. 2020. Testing whether ensemble modelling is advantageous for maximising predictive performance of species distribution models. *Ecography*, 43 (4): 549–558. DOI: 10.1111/ecog.04890.

Hirzel, A. H., Hausser, J., Chessel, D. & Perrin, N. 2002. Ecological-niche factor analysis: how to compute habitat-suitability maps without absence data? *Ecology*, 83 (7): 2027-2036.

Hutchinson, G. E. 1944. Limnological studies in Connecticut. Part 7. A critical examination of the supposed relationship between phytoplankton periodicity and chemical changes in lake waters. *Ecology*, 35: 3-26.

Hutchinson, G. E. 1957. Concluding remarks. *Cold Spring Harbour Symposium on Quantitative Biology*, 22: 415-427.

Jiménez-Valverde, A., Gómez, J. F., Lobo, J. M., Baselga, A. & Hortal, J. 2008. Challenging species distribution models: the case of *Maculinea nausithous* in the Iberian Peninsula. *Annales Zoologici Fennici*, 45: 200-210.

Keller, H. A. 2020. *Oxypetalum* (Apocynaceae) en la Argentina: una nueva especie, nuevos sinónimos y una clave de identificación. *Bonplandia*, 29 (1): 81–99. DOI: 10.30972/bon.2914111.

Kass, J. M.; Smith, A. B.; Warren, D. L.; Vignali, S.; Schmitt, S.; Aiello-Lammens, M. E.; Arlé, E.; Barbosa, A. M.; Broennimann, O.; Cobos, M. E.; Guéguen, M.; Guisan, A.; Merow, C.; Naimi, B.; Nobis, M. P.; Ondo, I.; Osorio-Olvera, L.; Owens, H. L.; Pinilla-Buitrago, G. E.; Sánchez-Tapia, A.; Thuiller, W.; Valavi, R.; Velazco, S. J. E.; Zizka, A.; Zurell, D. 2024. Achieving higher standards in species distribution modeling by leveraging the diversity of available software. *Ecography*, v. 47, e07346. DOI: 10.1111/ecog.07346.

Keller, H. A. 2015. *Oxypetalum radinsii* (Apocynaceae: Asclepiadoideae), una nueva especie endémica de Misiones, Argentina. *Bonplandia*, v. 24, n. 1, p. 51–56. DOI: 10.30972/bon.241209.

Keller, H. A.; Funez, L. A. 2017. Uma nova espécie de *Oxypetalum* (Apocynaceae: Asclepiadoideae) de Santa Catarina, Brasil. *Bonplandia*, v. 26, n. 2, p. 119–124.

Keller, H. A. (2020). *Oxypetalum* (Apocynaceae) en la Argentina: una nueva especie, nuevos sinónimos y una clave de identificación. *Bonplandia*, 29(1), 81–99.

<https://doi.org/10.30972/bon.2914111>.

- Keller, H. A.; Funez, L. A.; Liede-Schumann, S.** 2021. Novelties in *Oxypetalum* (Apocynaceae: Asclepiadoideae): a new species and revalidation of the name *O. megapotamicum*. *Rodriguésia*, v. 72, e014. DOI: 10.1590/2175-7860202172014.
- Keller, H. A.** 2022. Una nueva especie de *Oxypetalum* (Apocynaceae), colectada en Santa Catarina, Brasil, hace 45 años. *Bonplandia*, 31 (2): 143–147. DOI: 10.30972/bon.3126012.
- Koschnitzke, C.** 2015. Polinizadores e visitantes florais de três táxons de Asclepiadoideae (Apocynaceae) na restinga de Maricá, Rio de Janeiro, Brasil. *Natureza Online*, 13 (4): 165-176.
- Kunin, W. E. & Gaston, K. J.** 1993. The biology of rarity – Patterns, causes and consequences. *Trends in Ecology and Evolution*, 8: 298–301.
- Landau, E. C., Tavares, R. B. T., Hirsch, A. & Barros, C. A.** 2009. Tendências de variação de amplitude térmica no Brasil em função das mudanças climáticas. *ResearchGate*.
- Liede-Schumann, S., Rapini, A., Goyder, D. & Chase, M.** 2005. Phylogenetics of New World subtribes of Asclepiadeae (Apocynaceae, Asclepiadoideae): Metastelmatinae, Oxypetalinae and Gonolobinae. *Systematic Botany*, 30 (1): 184-195.
- Lobo, J. M.; Tognelli, M. F.** (2011). Exploring the effects of quantity and location of pseudo-absences and sampling biases on the performance of distribution models with limited point occurrence data. *Journal for Nature Conservation*, 19, 1–7.
- Machado, R. B.; Ramos Neto, M. B.; Pereira, P. G. P.; Caldas, E. F.; Gonçalves, D. A.; Santos, N. S.; Tabor, K.; Steininger, M.** 2004. Estimativas de perda da área do Cerrado brasileiro. Brasília, DF: Conservação Internacional.
- Magallón, S. & Sanderson, M. J.** 2001. Absolute diversification rates in angiosperm clades. *Evolution*, 55: 1762-1780.
- Malecha, A. & Vale, M. M.** 2024. As mudanças climáticas e a biodiversidade. *Ciência e Cultura*, 76 (30): 123-125.
- Marquete, N. F. S., Fontella-Pereira, J. & Valente, M. C.** 2007. Asclepiadoideae (Apocynaceae) from southeastern Brazil. I. The genus *Oxypetalum* from Rio de Janeiro State, Brazil. *Annals of Missouri Botanical Garden*, 94 (2): 435-462.
- Marengo, J. A.** 2001. Mudanças climáticas globais e regionais: Avaliação do clima atual do Brasil e projeções de cenários climáticos do futuro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 16 (1): 01 -18.
- Martin, C. M., Zanotti, C. A. & Ezcurra, C.** 2017. A new species of *Oxypetalum* (Apocynaceae, Asclepiadoideae) from Northern Argentina. *Systematic Botany*, 42 (3): 578-583.
- Mendes, R. M. S. & Chaves, B. D.** 2015. *Sistemática vegetal: noções básicas com enfoque em*

algumas famílias de angiospermas representativas no Brasil. Fortaleza: EdUece, 2ª ed.

Mendes, M. F.; Santos, L. A.; Mendes, M. F. 2024. Integratividade: contribuições sobre o uso de SIG's em modelagem de distribuição de espécies. *Biodiversidade (UFMT. Impresso)*, v. 23, p. 130–135. DOI: 10.20873/uft.cemaf.v23n1.2024.130.

Miller, J. 2010. Species distribution modeling. *Geography Compass*, 4 (6): 490-509.

Muniz, B. R. B.; Xavier, J. dos A.; Kanieski, M. R.; Campos, C. G. C.; Henkes, J. A. 2022. Impactos das mudanças climáticas nas florestas tropicais. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 11, n. 2, p. 65–82. DOI: 10.59306/rgsa.v11e2202265-82.

Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., Fonseca, G. A. B. & Kent, J. 2000. Hotspots de biodiversidade para prioridades de conservação. *Natureza*, 403: 853–858.

Naimi, B., Hamm, N. A. S., Groen, T. A., Skidmore, A. K. & Toxopeus, A. G. 2014. Uncertainty analysis for species distribution models. *Ecography*, 37 (2): 191-203.

Naimi, B. & Araújo, M. B. 2016. Sdm: a reproducible and extensible R platform for species distribution modelling. *Ecography*, 39 (4): 368–375.

Neves, D. R. M., Dexter, K. G., Pennington, R. T., Bueno, M. L. & Oliveira-Filho, A. T. 2015. Environmental and historical controls of floristic composition across the South American dry diagonal. *Journal of Biogeography*, 42: 1566–1576.

Oliveira, V. B., Freitas, M. S. M., Mathias, L., Braz-Filho, R. & Vieira, I. J. C. 2009. Atividade biológica e alcalóides indólicos do gênero *Aspidosperma* (Apocynaceae): uma revisão. *Bras. Pl. Med.*, 11 (1): 92-99.

Peterson, A. T. 2011. Ecological niche conservatism: a time-structured review of evidence. *Journal of Biogeography*, 38 (5): 817-827.

Peterson, A. T. & Soberón, J. 2012. Species distribution modeling and ecological niche modeling: getting the concepts right. *Natureza and Conservation*, 10: 102-107.

Phillips, S. J., Anderson, R. P. & Schapire, R. E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190 (3–4): 231-259.

Polasky, S. & Solow, A. R. 2001. The value of information in reserve site selection. *Biodiversity and Conservation*, 10: 1051-1058.

Primack, R. B.; Rodrigues, E. 2001. *Biologia da Conservação*. Londrina: Editora Planta.

Quiñones, U. M.; Valério, P. D.; Ramos, J. H.; Sánchez, A. M.; Magaña, J. J. G.; Granados, M. C. R. 2019. Similaridad del nicho ecológico de *Pinus montezumae* y *P. pseudostrobus* (Pinaceae) en México: implicaciones para la selección de áreas productoras de semillas y de conservación. *Acta Botanica Mexicana*, 126.

R Core Team. 2020. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation

for Statistical. Vienna, Austria. Disponível em: <https://www.R-project.org>. Acesso em 08 jan. 2023.

Rapini, A.; Mello-Silva, R.; Kawasaki, M. L. 2001. Asclepiadoideae (Apocynaceae) da Cadeia do Espinhaço de Minas Gerais, Brasil. *Boletim de Botânica da Universidade de São Paulo*, 19: 55–169.

Rapini, A.; Chase, M.; Goyder, D.; Griffiths, J. 2003. Asclepiadeae classification: evaluating the phylogenetic relationship of New World Asclepiadoideae (Apocynaceae). *Taxon*, 52: 33–50.

Rapini, A.; Van den Berg, C.; Liede-Schumann, S. 2007. Diversification of Asclepiadoideae (Apocynaceae) in the New World. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 94 (2): 407–422.

Rapini, A.; Pereira, J. F.; Goyder, D. J. 2011. Towards a stable generic circumscription in Oxypetalinae (Apocynaceae). *Phylotaxa*, 26: 9–16.

Rapini, A. 2012. Taxonomy “under construction”: advances in the systematics of Apocynaceae, with emphasis on the Brazilian Asclepiadoideae. *Rodriguesia*, 63 (1): 75–88.

Rodrigues, E. 2002. Biodiversidade brasileira: uma abordagem ecológica e socioeconômica. *Revista Brasileira de Biologia*, v. 62, n. 3, p. 345–352. DOI: 10.1590/S0034-71082002000300001.

Santana, F. S.; Siqueira, M. F.; Saraiva, A. M.; Corrêa, P. L. P. (2008). A reference business process for ecological niche modeling. *Ecological Informatics*, 3, 75–86.

Simões, A. O.; Kinoshita, L. S.; Koch, I.; Silva, M. J.; Endress, M. E. 2016. Sistemática e evolução de caracteres de *Vinceae* (Apocynaceae, Rauvolfioideae). *Táxon*, 65: 99–122.

Simon, L. M.; Oliveira, G.; Barreto, B. S.; Nabout, J. C.; Diniz Filho, J. A. F. 2013. Effect of global climate changes on geographical distribution patterns of economically important plant species in Cerrado. *Árvore*, 37 (2): 267–274.

Souza, V. C.; Lorenzi, H. 2019. *Botânica sistemática: guia ilustrativo para identificação das famílias de fanerógamas nativas e exóticas no Brasil, baseado em APG IV*. 4. ed. Nova Odessa: Jardim Botânico Plantarum.

Souza, D. A. T. de; Lima, A. A. de; Wrege, M. S.; Aguiar, A. V. de; Bezerra, C. de S.; Meneses, C. H. S. G.; Lopes, R.; Ramos, S. L. F.; Paranatinga, I. L. D.; Lopes, M. T. G. 2024. Impacts of climate change on the natural distribution of species of lowland high and low in the Amazon. *Revista Árvore*, v. 48, e4808. DOI: 10.53661/1806-9088202448263751.

Strubbe, D.; Beauchard, O.; Matthysen, E. 2015. Niche conservatism among non-native vertebrates in Europe and North America. *Ecography*, 38: 321–329.

Suicmez, B.; Avci, M. 2023. Distribution patterns of *Quercus ilex* from the last interglacial

period to the future by ecological niche modeling. *Ecology and Evolution*, v. 13, n. 10, e10606. DOI: 10.1002/ece3.10606.

Syphard, A. D.; Franklin, J. 2009. Differences in spatial predictions among species distribution modeling methods vary with species traits and environmental predictors. *Ecography*, v. 32, n. 6, p. 907–918. DOI: 10.1111/j.1600-0587.2009.05883.x.

Thuiller, W. 2024. Ecological niche modelling. *Current Biology*, 34 (6): R225–R229. DOI: 10.1016/j.cub.2024.02.018.

Valavi, R.; Guillera-Aroita, G.; Lahoz-Monfort, J. J.; Elith, J. 2022. Predictive performance of presence-only species distribution models: a benchmark study with reproducible code. *Ecological Monographs*, 92 (1): e01486. DOI: 10.1002/ecm.1486.

Velazco, S. J. E.; Galvão, F.; Villalobos, F.; De Marco Júnior, P. 2017. Using worldwide edaphic data to model plant species niches: an assessment at a continental extent. *PLOS ONE*, 12 (10): e0186025. DOI: 10.1371/journal.pone.0186025.

Vital, F. A. Z.; Nakamura, A. T. 2018. Androeium development of *Oxypetalum appendiculatum* Mart. (Apocynaceae): a taxonomic approach. *Scientific Electronic Archives*, v. 11, n. 5, p. 130–139. DOI: 10.36560/1152018391.

Wan, J. Z.; Wang, C. J.; Yu, F. H.; Huang, F. 2016. Using species distribution modeling to identify conservation priorities for endangered plant species under climate change. *Ecological Indicators*, v. 69, p. 1–9. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.04.017.

Warashina, T.; Shiota, O. 2021. Tetracyclic triterpenoids, steroids and lignanes from the aerial parts of *Oxypetalum caeruleum*. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, v. 69, n. 2, p. 226–231. DOI: 10.1248/cpb.c20-00789.

Warashina, T.; Shiota, O.; Ohara, K. 2023. 12,20-Epoxypregnane glycosides from the roots of *Oxypetalum caeruleum*. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, v. 71, n. 9, p. 734–740. DOI: 10.1248/cpb.c23-00388.

Warren, H. P.; Ugarte-Urra, I.; Doschek, G. A.; Brooks, D. H.; Williams, D. R. 2008. Observations of active region loops with the EUV Imaging Spectrometer on Hinode. *The Astrophysical Journal*, 686 (2): L131–L134.

Warren, D. L.; Glor, R. E. & Turelli, M. 2010. ENMTools: a tool-box for comparative studies of environmental niche models. *Ecography*, 33 (3): 607–611.

Wikström, N.; Savolainen, V. & Chase, M. W. 2001. Evolution of the angiosperms: Calibrating the family tree. *Proc. Roy. Soc. Biol. Sci., Ser. B*, 268: 2211–2220.

Wisz, M. S.; Hijmans, R. J.; Li, J.; Peterson, A. T.; Graham, C. H. & Guisan, A. 2008. Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Diversity and*

Distributions, 14 (5): 763–773.

Wolf, M. M. 2021. Impacto de mudanças climáticas sobre espécies vegetais endêmicas dos campos do Rio da Prata. 114 f. Dissertação (Mestrado em Agrobiologia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

Wright, S. J. 2010. The future of tropical forests. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 1195, p. 1–27. DOI: 10.1111/j.1749-6632.2010.05455.x.

Wyatt, J. L. & Silman, M. R. 2004. Distance-dependence in two Amazonian palms: effects of spatial and temporal variation in seed predator communities. *Oecologia*, 140: 26–35.

Yang, X. Q.; Kushwaha, S. P. S.; Saran, S.; Xu, J.; Roy, P. S. 2013. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills. *Ecological Engineering*, v. 51, p. 83–87. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2012.12.004.

ARTIGO 1

Artigo a ser submetido na revista Systematic Botany
<https://bioone.org/journals/systematic-botany>

Modelagem e adequabilidade climática do clado ereta de *Oxypetalum*
(Asclepiadoideae, Apocynaceae)

Artigo Original

Autores: Carlos Alexandre dos Santos Teixeira¹

Marcelo Leandro Bueno²

Maria Ana Farinaccio¹

¹Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Avenida Costa e Silva, s/n, Pioneiros, 79070-900, Campo Grande, MS, Brasil.

²Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul, Unidade Universitária de Mundo Novo, Laboratório de Macroecologia e Evolução - LAMEV. Rodovia BR-163, 235, Universitário, 79980-000 Mundo Novo, MS, Brasil.

Título resumido: Modelagem e adequabilidade climática de *Oxypetalum*

Abstract—*Oxypetalum* is a Neotropical genus of the Apocynaceae family with a well-resolved phylogeny but limited biogeographic studies. Based on a previously published phylogeny, we selected a clade comprising nine erect species of *Oxypetalum* with the aim of analyzing their current and projected climatic suitability and geographic distribution in response to climate change, using predictive modeling. Geographic data were obtained from digital platforms and curated to remove dubious records, duplicates, and centroids. The study area was defined as the total area surrounding the occurrence points. The data were organized into a matrix for the construction of present and future models. Subsequently, these models were combined with vegetation remnant maps to identify areas that will remain accessible to the species in the future. Our results show that the clade is primarily distributed in the Cerrado, extending into Bolivia, central Argentina, and Uruguay. However, the greatest current climatic suitability is observed in southern Brazil, reaching southern Paraguay, eastern Argentina, and Uruguay. In the future, the entire Cerrado region becomes climatically unsuitable for the erect clade. Suitable areas become restricted to southern Brazil, including most of Santa Catarina, eastern Paraná, and Rio Grande do Sul. When combining climatic suitability maps with vegetation remnants, we find that accessible areas are limited to high-altitude regions in eastern Paraná and southern Santa Catarina. Stable areas remain mostly in Rio Grande do Sul. We conclude that, despite the erect clade's preference for warmer and drier environments, the increase in extreme heat and drought events caused by climate change forces the clade to seek more humid areas in the future in search of climatic stability.

Keywords—Ecological Niche, Geographic Distribution, Vegetation Remnants.

Resumo—*Oxypetalum* é um gênero neotropical da família Apocynaceae que possui uma filogenia bem resolvida, porém apresenta poucos estudos biogeográficos. A partir de uma filogenia previamente publicada, selecionamos um clado que apresenta nove espécies eretas de *Oxypetalum*, com o objetivo de analisar sua distribuição e adequabilidade climática no presente

e em projeções futuras, frente às mudanças climáticas, por meio da modelagem preditiva. Os dados geográficos foram obtidos de plataformas digitais e acurados de modo a eliminar pontos duvidosos, duplicatas e centroides. A área de estudo foi delimitada como área total ao redor dos pontos de ocorrência. Os dados foram organizados em uma matriz para a criação dos modelos do presente e do futuro. Posteriormente, os modelos foram combinados com mapas de remanescentes de vegetação para identificar áreas acessíveis às espécies no futuro. Nossos resultados mostraram que o clado ocorre principalmente no Cerrado, chegando até a Bolívia, centro da Argentina e Uruguai. Porém, a maior adequabilidade climática observada para o presente está na região sul do Brasil, alcançando o sul do Paraguai, leste da Argentina e do Uruguai. No futuro, toda a região do Cerrado se torna climaticamente inadequada para o clado ereta. Áreas adequadas são limitadas ao sul do Brasil, incluindo grande parte de Santa Catarina, leste do Paraná e Rio Grande do Sul. Ao combinar os mapas de adequabilidade climática com os remanescentes de vegetação, percebemos que as áreas acessíveis são restritas às regiões de altitude no leste do Paraná e sul de Santa Catarina. Áreas estáveis permanecem principalmente no Rio Grande do Sul. Concluimos que, apesar da preferência do clado ereta por ambientes mais quentes e secos, o aumento de eventos extremos de calor e seca, ocasionado pelas mudanças climáticas, força o clado a buscar áreas mais úmidas no futuro, em busca de estabilidade climática.

Keywords—Distribuição Geográfica, Nicho Ecológico, Remanescente de Vegetação.

Debates sobre os impactos das mudanças climáticas sobre a biodiversidade ganharam cada vez mais destaque nas últimas décadas, frente à frequência crescente de eventos climáticos extremos. O aumento da temperatura é apenas um dos eventos que ameaçam os ecossistemas e seus organismos, juntamente com a degradação de habitat pelo desmatamento e exploração exacerbada dos recursos naturais (Butchart et al. 2010; Costa & Mello 2021). Entre os anos de 1996 e 2005, o Brasil foi líder no desmatamento de florestas tropicais, removendo cerca de

19.500 km² de mata nativa para agricultura e pecuária (Muniz et al. 2022). Como consequência, há um desequilíbrio no ciclo hidrológico, resultando em longos períodos de calor e seca extremos, alternados por grandes volumes de chuva em curtos intervalos de tempo, o que contribui para alterações no clima continental (Artaxo 2020; Campos et al. 2024). Dessa forma, é fundamental que entendamos como os organismos reagem às mudanças climáticas, para que possamos estabelecer métodos de proteger da biodiversidade (Wolf 2021).

Oxypetalum pertence à família Apocynaceae, subfamília Asclepiadoideae, e é endêmico da região neotropical. Compreende cerca de 140 espécies, sendo o maior gênero da subtribo Oxypetalinae K. Schum. (Farinaccio 2008; Endress & Bruyns 2000). O gênero ocorre desde a Argentina até o México e Caribe, com maior diversidade no centro-norte da Argentina, Brasil e Paraguai, com algumas espécies possuindo distribuição restrita (Farinaccio & Goyder 2016; Gonzáles & Keller 2020; Keller & Funez 2017; Keller et al. 2021; Keller 2022). No Brasil ocorrem 91 espécies (Flora & Funga do Brasil), sendo considerado um centro de diversidade para *Oxypetalum* (Farinaccio & Mello-Silva 2006; Farinaccio 2008; Farinaccio & Goyder 2016).

A maioria das espécies de *Oxypetalum* são trepadeiras, porém o gênero também apresenta espécies eretas, herbáceas ou subarborescentes (Keller et al. 2021; Keller 2022). Sua distribuição se dá principalmente em regiões savânicas, incluindo campos e bordas de mata (Farinaccio & Goyder 2016). A maioria dos estudos que incluíram espécies de *Oxypetalum* focaram na descrição de novas espécies ou levantamentos florísticos (e.g., Farinaccio & Mello-Silva 2004; Rapini et al. 2001; Marquete et al. 2007); estudos recentes de *Oxypetalum* também possuem esse mesmo viés descritivo (Keller 2015; Farinaccio & Goyder 2016; Martin et al. 2017; Gonzáles et al. 2018; Gonzáles & Keller 2020; Keller 2020; Keller et al. 2021; Keller 2022). Outros trabalhos recentes incluem análises químicas (Warashina & Shirota 2021; Warashina et al. 2023) e anatômicas (Vital & Nakamura 2018). O gênero ainda foi alvo de estudos

filogenéticos mais amplos que incluíram poucas espécies e que buscavam resolver as relações entre as Oxypetalinae (Rapini et al. 2003; Liede-Schumann et al. 2005).

Oxypetalum possui uma filogenia bem resolvida após os estudos de Farinaccio (2008) e a sinonimização de *Schistogyne* em *Oxypetalum*, proposta por Rapini et al. (2011), que consolidou o monofiletismo do gênero. Estudos biogeográficos de *Oxypetalum* são inexistentes, de modo que há poucas referências ao gênero em pesquisas com viés biogeográfico e ecológico. A maioria dos trabalhos existentes é mais ampla, com foco na subfamília Asclepiadoideae (e.g., Goyder 2006; Rapini et al. 2007; Fishbein et al. 2018; Del Rio et al. 2020). Estudos ecológicos e sobre a distribuição de espécies têm se tornado cada vez mais frequentes na literatura, principalmente devido à maior disponibilidade de dados georreferenciados em plataformas digitais, além do crescente interesse nas mudanças climáticas e seus impactos sobre a biodiversidade (Amaral et al. 2013). Eventos climáticos extremos, como o aumento da temperatura e o desequilíbrio do ciclo pluviométrico — que se alterna entre períodos prolongados de calor e seca e chuvas torrenciais — têm se tornado cada vez mais frequentes e podem impactar significativamente a distribuição das espécies em cenários futuros (Landau et al. 2009; Alves et al. 2020; Artaxo 2020; Campos et al. 2024).

A modelagem de Distribuição de Espécies (MDE) surge como uma forte aliada para estudos de biodiversidade, pois possibilita a correlação da distribuição das espécies com os fatores ambientais tidos como principais influenciadores de sua distribuição (Wyatt & Silman 2004; Miller et al. 2010). A Modelagem de Distribuição de Espécies consiste em uma análise das variáveis ambientais associadas aos registros de ocorrência de uma ou mais espécies, resultando em uma representação das condições ambientais favoráveis à sobrevivência das espécies (Cassini 2011; Giannini et al. 2012).

Devido à sua versatilidade, a modelagem pode ser usada em diferentes estudos com diferentes objetivos, tais como: conservação e reintrodução de espécies ameaçadas (Wan et al. 2016; Bellis et al.

2021); potencial de espécies invasoras (Dambrowski et al. 2023) e disseminação de doenças (Dobbelaere et al. 2020); impacto das mudanças climáticas na distribuição de espécies (Souza et al. 2024); distribuição das espécies no passado (Suicmez & Avci 2023); determinação de áreas prioritárias para conservação (González-Fernández et al. 2022), entre outros.

Considerando a escassez de estudos com enfoque ecológico e geográfico sobre o gênero *Oxypetalum*, e a existência de uma filogenia bem resolvida para o grupo, neste estudo exploramos a distribuição atual e futura de um clado bem suportado de *Oxypetalum* por meio da modelagem de distribuição de espécies. Dessa forma, obtivemos uma perspectiva sobre como esse clado neotropical poderá reagir frente às mudanças climáticas.

Material & Metodos

Organização e limpeza dos dados geográficos

Com base nos estudos filogenéticos de *Oxypetalum* e da subtribo Oxypetalinae realizados por Farinaccio (2008), a partir de DNA cloroplastidial e nuclear, selecionamos um clado da árvore de consenso estrito. O clado em questão é composto por nove espécies e é bem suportado pelo hábito de crescimento ereto de todas as espécies, bem como pelo tipo de ambiente em que ocorrem, tipicamente campestre. As espécies são: *Oxypetalum aequaliflorum* E. Fourn.; *O. arnottianum* H. Buek ex E. Fourn.; *O. capitatum* Mart.; *O. chodatianum* Malme; *O. coeruleum* (D. Don ex Sweet) Decne.; *O. crispum* Wight ex Hook. & Arn.; *O. fontellae* S. A. Cáceres; *O. marginatum* Malme e *O. martii* E. Fourn. (Figura 1).

Os dados de ocorrência, tais como data, localidade e coordenadas geográficas, foram obtidos de bancos de dados digitais (GBIF 2024; SpeciesLink 2024). No processo de limpeza dos dados, inicialmente removemos todas as ocorrências sem coordenadas geográficas. Das ocorrências restantes, selecionamos apenas aquelas datadas a partir do ano 2000. Ocorrências anteriores a esse período e sem data foram desconsideradas. Posteriormente, eliminamos materiais duplicados, deixando apenas uma ocorrência para cada coordenada geográfica. Registros no mesmo local com datas diferentes também foram considerados duplicatas. Centroides

geográficos também foram removidos. Os dados de ocorrência utilizados no processo de modelagem deste estudo serão armazenados no repositório Zenodo e disponibilizados apenas no momento da publicação. Os links de acesso das plataformas digitais de onde esses dados foram obtidos estão listadas na Tabela 1 do Anexo 1.

Registros duvidosos foram excluídos quando não houve possibilidade de confirmação de sua identidade pela má qualidade do material, por estarem incompletos ou, ainda, pela falta de informações que permitissem a identificação do táxon e do local de coleta. A primeira etapa de limpeza de dados foi feita manualmente. A identificação dos táxons foi confirmada pela especialista no gênero, de modo a garantir a qualidade dos dados obtidos. A coleta dos registros de ocorrência foi encerrada no dia 13 de janeiro de 2025.

Para remover as duplicatas do banco de dados do levantamento inicial, utilizamos o pacote **dplyr** (Wickham et al. 2023) no software **R** versão 4.3.3 (R Core Team 2020). Utilizamos o pacote **spThin** (Aiello-Lammens et al. 2015) para realizar uma filtragem espacial dos dados, removendo registros de ocorrência que estivessem a uma distância menor do que 5 km. Essa etapa reduz a autocorrelação espacial e ajuda a garantir que os pontos de ocorrência utilizados na modelagem sejam mais espacialmente independentes, o que melhora a robustez estatística e a acurácia preditiva dos modelos. Os pontos de ocorrência restantes foram utilizados na etapa da modelagem.

Dados das Variáveis Bioclimáticas

Definimos a América do Sul como área de estudo inicial, uma vez que o gênero *Oxypetalum* é endêmico do continente sul-americano. Devido à distribuição mais restrita das espécies selecionadas, para evitar viés de previsão nos modelos, usamos o pacote **sf** (Pebesma 2018) para criar um buffer em torno dos pontos de ocorrência das espécies. A área do buffer foi definida num raio de 100 km de cada ponto de ocorrência, de modo a contemplar áreas potencialmente acessíveis para as espécies. Os buffers de cada ponto foram unidos, integrando toda a área ao

redor dos pontos de ocorrência (Figura 1). A área de estudo, de acordo com a análise do buffer, compreende a região central da América do Sul, incluindo sete países: Argentina, Bolívia, Brasil, Chile, Paraguai, Peru e Uruguai. A distribuição das espécies do clado ereto abrange cinco desses países, sendo exceção o Chile e o Peru.

Para a determinação dos modelos de distribuição geográfica das espécies, utilizamos as 19 variáveis bioclimáticas, que indicam aspectos de temperatura, precipitação, sazonalidade, além da variável de altitude, disponíveis na base de dados do **WorldClim** versão 2.1, com uma resolução espacial de aproximadamente 4,5 km² (Fick & Hijmans 2017), considerando os limites da área de estudo. Realizamos a seleção das variáveis usando o cálculo dos Fatores de Inflação de Variância, com o método do **VIFstep** (Chatterjee & Hadi 2006).

Análise de dados – Modelos de Distribuição de Espécies (MDE)

Considerando que o clado ereto é fortemente sustentado (98 de bootstrap), que todas as espécies compartilham o hábito ereto e ocorrem predominantemente em ambientes campestres, optamos por realizar a modelagem em nível de clado, em vez de modelar individualmente cada espécie. Essa decisão se deve ao fato de que, após a limpeza dos dados, observou-se um número reduzido de ocorrências para a maioria das espécies, o que dificultaria a modelagem individual com qualidade e robustez. Para modelar a distribuição potencial do clado ereto, utilizamos todos os algoritmos do pacote **SDM** (Naimi & Araújo 2016).

Para avaliar a qualidade dos modelos gerados, calibramos os algoritmos com dados de presença combinados com a mesma quantidade de pontos de pseudo-ausência distribuídos por toda a área de estudo. Dividimos os dados em dois subconjuntos: um modelo de treino com 75% dos dados e outro de teste com os 25% restantes, utilizando 20 replicações.

Para validar os modelos, realizamos a análise da curva característica de operação (ROC) (Fielding & Bell 1997), que caracteriza a performance preditiva do modelo por meio da **Area Under Curve (AUC)** (Phillips et al. 2006). Seleccionamos apenas os modelos com valor de

AUC igual ou superior a 0,9. Também utilizamos o **True Skill Statistic (TSS)** (Allouche et al. 2006) para verificar a acurácia e desempenho dos modelos, mantendo somente aqueles com TSS igual ou maior que 0,8.

Para uma representação final do modelo do clado ereto, construímos modelos ensemble, que combinam diversas réplicas geradas por diferentes algoritmos. Os modelos ensemble foram acompanhados por uma escala tonal que varia do verde-escuro ao vermelho, na qual o verde representa áreas de baixa adequabilidade ambiental e o vermelho indica alta adequabilidade. Para avaliar a performance do modelo na previsão das áreas adequadas às espécies, utilizamos o índice de Boyce, disponível no pacote *ecospat* (Di Cola et al. 2017), que varia entre -1 e +1; quanto mais próximo de 1, melhor a capacidade do modelo de discriminar entre as áreas de presença e ausência.

Os modelos futuros foram gerados utilizando dois **General Circulation Models (GCM)** — FIO-ESM-2-0 e HadGEM3-GC31-LL — ambos com resolução de aproximadamente 4,5 km², selecionados por meio do pacote **chooseGCM** (Esser et al. 2025). Foram analisados dois cenários de mudança climática: um otimista (**SSP2-4.5**), que projeta um aumento anual de 0,5% no CO₂ e uma variação de temperatura de até 2 °C, e um pessimista (**SSP5-8.5**), que prevê um aumento potencial de 1% no CO₂ e uma variação média de temperatura de ≥ 4 °C. Essas projeções abrangem os períodos de 2041–2060 e 2081–2100.

Posteriormente, os modelos individuais de cada período e cenário foram combinados, resultando em quatro modelos finais — dois para cada período, cada um representando um cenário distinto. Os mapas binários do presente e do futuro foram gerados utilizando um limite de corte de 75%, com o objetivo de identificar as áreas de maior adequabilidade. Em seguida, esses mapas binários foram sobrepostos para gerar os mapas futuros de retração e expansão. Esses mapas representam as áreas ocupadas e perdidas pelo clado modelado, indicando retração em vermelho, ausência em cinza ou branco, estabilidade em azul e expansão em verde. Após as análises no **R**, os modelos gerados foram utilizados para a elaboração dos mapas de adequabilidade com o auxílio do programa **ArcMap** versão 10.8.

Mapas de uso e ocupação

Mapas de uso e ocupação do **MapBiomias** (Souza et al. 2020) são representações geográficas que indicam o tipo de uso e ocupação da área de estudo determinada, podendo ser um país, estado, cidade ou outra área qualquer. Dentro da área de estudo, esses mapas apontam áreas que possuem vegetação florestal, aberta e suas subdivisões, rios, oceanos, áreas destinadas à agricultura, pecuária e urbanizadas.

Os mapas de uso e cobertura foram obtidos a partir da plataforma **Google Earth Engine** (Gorelick et al. 2017) para os países que contemplam a área de estudo: Argentina, Bolívia, Brasil, Chile, Paraguai, Peru e Uruguai. Em seguida, esses mapas foram plotados no **ArcGIS** e convertidos para o formato **shapefile**. Posteriormente, foram destacadas nos mapas as regiões compatíveis com o tipo de ambiente onde ocorrem as espécies do clado ereto de *Oxypetalum*. Essas regiões incluem áreas de afloramentos rochosos, florestas abertas, florestas esparsas, florestas secas, formações savânicas e campestres, além de outras formações naturais não florestais.

Após a definição das áreas potenciais de ocupação para o clado, os mapas dos países foram clipados com o buffer da área de estudo, descartando todas as regiões fora da área potencialmente acessível às espécies. Por fim, os mapas futuros de retração e expansão foram sobrepostos ao novo mapa de uso e ocupação da área de estudo, com o objetivo de indicar as áreas reais de adequabilidade e ocorrência para o clado ereta.

Resultados

Base de dados

Foram obtidos, ao todo, 3.444 registros de ocorrência referentes às nove espécies do clado ereto. *Oxypetalum capitatum* é a espécie com maior número de ocorrências, totalizando 1.390 registros; por outro lado, *O. fontellae* é a espécie com menor número de ocorrências, com apenas 19 registros (Tabela 1). Após o processo de limpeza e verificação da acurácia dos dados,

restaram 168 pontos de ocorrência, os quais foram utilizados para a criação dos modelos. Informações adicionais sobre o levantamento dos pontos de ocorrência estão detalhadas na Tabela 1.

Distribuição do clado ereta

O Brasil é o país com maior abundância e riqueza de espécies, abrigando oito das nove espécies estudadas. *Oxypetalum fontellae* ocorre exclusivamente na Argentina, na região de Corrientes. *Oxypetalum chodatianum* apresenta registros na Argentina, Brasil e Paraguai; no entanto, após a padronização dos dados, permaneceu apenas um único registro da espécie para o Paraguai. *Oxypetalum marginatum* ocorre no Brasil e Paraguai, mas os dados padronizados indicam apenas um registro para o Brasil, no estado de São Paulo. *Oxypetalum martii* ocorre na Bolívia, Brasil e Paraguai; no Brasil, essa espécie possui distribuição bastante esparsa, com registros nos estados da Bahia, Goiás, Mato Grosso, Minas Gerais e Paraná. Após a padronização, restou apenas um registro localizado no Distrito Federal.

Oxypetalum aequaliflorum ocorre exclusivamente no Brasil, nos estados de Goiás, Mato Grosso do Sul e São Paulo. *Oxypetalum coeruleum* está presente apenas no Uruguai e no estado do Rio Grande do Sul, no Brasil. *Oxypetalum capitatum* é a espécie mais amplamente distribuída do clado ereto, com ocorrência na Argentina, Bolívia, Brasil e Paraguai, sendo mais abundante na região do bioma Cerrado brasileiro. *Oxypetalum arnottianum* ocorre na Argentina, Bolívia, Brasil e Uruguai, com maior concentração de registros no centro da Argentina e no sul do Brasil. *Oxypetalum crispum* ocorre nos mesmos países, além do Paraguai, sendo mais abundante no leste da Argentina e no estado do Rio Grande do Sul.

Modelagem

A seleção das variáveis indicadoras utilizando o método VIFstep identificou oito variáveis relevantes para a distribuição das espécies de *Oxypetalum* selecionadas na área de estudo, sendo três relacionadas à temperatura, quatro à precipitação e uma à altitude. Cada variável representa

a capacidade de previsão do modelo, expressa em porcentagem de importância relativa: temperatura média do trimestre mais quente (6,2%); precipitação do trimestre mais frio (6,2%); precipitação do trimestre mais quente (6,5%); sazonalidade da temperatura (8,7%); precipitação anual (8,7%); sazonalidade da precipitação (12,9%); altitude (13,4%); amplitude anual da temperatura (25,2%).

O modelo desenvolvido neste estudo indicou maior adequabilidade ambiental para as espécies na região Sul do Brasil, destacando-se o estado do Rio Grande do Sul, além de porções do Distrito Federal, uma faixa estreita ao norte da Bolívia, e porções do centro-leste da Argentina, notadamente nas províncias de Corrientes e Misiones, conectando-se ao sul do Paraguai. Áreas de adequabilidade intermediária, representadas em amarelo (Fig. 1), estendem-se por grande parte do território brasileiro e por regiões da Bolívia.

A binarização dos mapas de adequabilidade, utilizando como limite de corte o percentil de 75%, revelou áreas altamente favoráveis restritas a duas regiões no centro e leste da Argentina conectadas ao sul do Paraguai, estendendo-se até o Uruguai. Na Bolívia, observam-se pequenas manchas no norte do país. No Brasil, as áreas de alta adequabilidade incluem grande parte do Rio Grande do Sul, com extensão para Paraná e Santa Catarina, além de manchas esparsas em São Paulo, Goiás, Mato Grosso do Sul e no Distrito Federal (Anexo II – Figs. 1–5).

Para avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre a distribuição potencial das espécies, foram gerados quatro modelos de adequabilidade para cenários futuros: dois para o período de 2041–2060 e dois para 2081–2100, considerando cenários otimistas (SSP2-4.5) e pessimistas (SSP5-8.5). Em todos os cenários, observou-se significativa retração do **Clado ereta**, sendo que as áreas de expansão e estabilidade concentram-se majoritariamente nos três estados da região Sul do Brasil e em pequena porção da Argentina. A expansão também foi registrada em áreas isoladas no Uruguai. O cenário pessimista para o período de 2041–2060 apresentou as maiores áreas de expansão e de estabilidade, enquanto o cenário pessimista para 2081–2100 apresentou a maior retração (Fig. 2A, C, G, F).

A combinação dos modelos de adequabilidade com mapas de uso e cobertura dos remanescentes da vegetação permitiu uma análise mais realista da persistência das espécies. Para isso, foram excluídas áreas urbanizadas, agrícolas, de pecuária e de vegetação não selecionada, mantendo apenas áreas com cobertura vegetal natural compatível com a ocorrência das espécies (Fig. 2B, D, F, H). Nessa representação, as áreas de retração não sofrem grandes alterações em relação ao modelo climático puro, mantendo-se como a maior fração da área representada. Por outro lado, as áreas estáveis são mais reduzidas, restritas ao Rio Grande do Sul e a pequenos núcleos no Paraná e Santa Catarina. As áreas de expansão concentram-se em regiões de altitude isoladas no Paraná, Santa Catarina e no leste do Rio Grande do Sul (Tabela 2).

Discussão

Os resultados obtidos indicam que, embora a maior riqueza de espécies do clado ereta ocorra no centro do Brasil, as áreas de maior adequabilidade climática estão concentradas no sul do Brasil, Paraguai e centro-leste da Argentina. As projeções futuras apontam para uma redução significativa dessas áreas, com progressivo deslocamento para latitudes meridionais. A combinação dos modelos climáticos com dados de remanescentes vegetacionais revelou um cenário ainda mais restritivo, com maior concentração de áreas adequadas nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

Resultados semelhantes foram observados por Silva et al. (2018), que analisaram o nicho climático de *Ilex paraguariensis*, espécie amplamente distribuída no Brasil. Embora sua distribuição vá do Sul ao Nordeste, as áreas de maior adequabilidade concentram-se nas regiões subtropicais e úmidas do Sul e Sudeste, notadamente em zonas de altitude elevada.

Nossos modelos identificaram a amplitude anual da temperatura como a variável climática mais influente na distribuição do clado ereta, que ocorre tanto em ambientes quentes, como o Cerrado, quanto em regiões temperadas do Sul. Ainda que a maioria das espécies analisadas possua distribuição restrita, algumas como *Oxypetalum arnottianum*, *O. capitatum* e *O. crispum*

apresentam ocorrência ampla, sendo registradas em ambas as regiões.

O deslocamento projetado na distribuição do clado ereta está associado ao aumento contínuo da temperatura média local e global. Marengo (2001) estimou uma elevação de até 4,6 °C na temperatura média global até o final do século, acompanhada de intensificação da concentração de dióxido de carbono, alteração no regime pluviométrico e aumento dos períodos de seca. O autor prevê maior umidade para a região Sul do Brasil, com destaque para o Rio Grande do Sul. Eventos climáticos extremos recentes, como enchentes e estiagens prolongadas, já refletem tais projeções, conforme reforçado por Muniz et al. (2022).

No contexto do Cerrado, onde se concentra a maioria das espécies analisadas, Malecha & Vale (2024) apontam as mudanças climáticas, degradação da vegetação e aumento das queimadas como ameaças críticas à biodiversidade. Espécies tropicais tendem a habitar regiões próximas a seus limites térmicos, sendo especialmente vulneráveis a elevações mesmo moderadas na temperatura — suficientes para comprometer processos fisiológicos essenciais e provocar extinções locais ou deslocamentos para áreas mais amenas.

Taucare-Ríos et al. (2023) demonstraram que os organismos buscam por condições térmicas compatíveis com suas funções vitais, corroborando os padrões observados neste estudo. Simon et al. (2013) projetaram forte redução na distribuição de espécies vegetais do Cerrado até 2080, com deslocamento para áreas periféricas, especialmente o Sudeste. Landau et al. (2009) observaram variações espaciais na amplitude térmica, sendo mais acentuada na Amazônia e menos pronunciada no Sudeste e Atlântico Sul. Regiões com menor amplitude térmica tendem a oferecer maior estabilidade climática e, conseqüentemente, favorecer a diversidade.

Essas evidências reforçam os achados do presente estudo, que indicam tendência de deslocamento do clado ereta para áreas mais úmidas e climaticamente estáveis no Sul do continente. Tal deslocamento é atribuído à elevação da temperatura e ao aumento da frequência de estiagens, que dificultam a permanência das espécies em áreas atualmente ocupadas, especialmente no núcleo do Cerrado.

No caso das espécies meridionais, como *O. coeruleum*, cuja ocorrência está concentrada no Pampa, há ameaça associada à elevação dos índices pluviométricos (Malecha & Vale, 2024). Wolf (2021) analisou os efeitos climáticos futuros sobre uma espécie de palmeira no Pampa e, embora tenha projetado aumento de distribuição, destacou a incerteza quanto à viabilidade populacional. Mesmo com aparente expansão, suas análises apontam para fragmentação da distribuição no Uruguai e centro do Rio Grande do Sul, onde ocorrem as principais populações de *O. coeruleum*.

Importa destacar que os modelos aqui desenvolvidos referem-se ao clado ereta como um grupo e não às espécies individualmente. Assim, ainda que os modelos projetem deslocamento do clado para o Sul do Brasil, isso não implica na sobrevivência de todas as nove espécies analisadas às condições climáticas previstas. Apenas três — *O. arnottianum*, *O. capitatum* e *O. crispum* — ocorrem atualmente nas regiões consideradas estáveis ou em expansão futura, ainda que de forma esparsa.

Oxypetalum coeruleum figura como a quarta espécie menos ameaçada, uma vez que áreas estáveis ainda persistirão ao norte e leste do Rio Grande do Sul, locais onde já há registros de ocorrência. Em contraposição, as demais espécies enfrentam riscos severos devido à perda de habitat climático adequado e à ausência de remanescentes vegetacionais. *O. fontellae*, endêmica da Argentina, ocorre em região de adequabilidade intermediária que tende a desaparecer nos cenários futuros. Já *O. chodatianum*, *O. marginatum* e *O. martti* ocorrem no Cerrado, onde a adequabilidade atual é intermediária e tende a ser perdida. Para *O. martti*, embora atualmente registrada em áreas de alta adequabilidade, essas são projetadas para desaparecer. *O. arnottianum* possui três registros no Cerrado e um no estado do Paraná — este último situado em região com expansão climática prevista, porém distante dos remanescentes vegetacionais adequados no estado.

Dessa maneira, embora o clado ereta apresente afinidade por ambientes climáticos estáveis, a

rapidez das alterações de temperatura, padrão de precipitação e prolongamento das estiagens pode dificultar o deslocamento das espécies às novas regiões adequadas. Tal limitação é atribuída tanto à velocidade das mudanças quanto à escassez de remanescentes vegetais adequados e acessíveis para ocupação.

Conclusão

Os resultados obtidos neste estudo indicam que o clado ereta, característico de ambientes quentes e secos, tende a deslocar-se, futuramente, para regiões mais úmidas do continente sul-americano. Essa mudança pode ser interpretada como uma resposta adaptativa à busca por ambientes climaticamente mais estáveis. A elevação da temperatura média, aliada à intensificação de períodos de seca e à redução da precipitação, desponta como o principal fator de pressão, tornando os ambientes atualmente ocupados progressivamente mais áridos e menos propícios à sobrevivência das espécies do clado.

A integração entre os modelos de adequabilidade climática e os dados de remanescentes vegetacionais permitiu uma avaliação mais precisa da acessibilidade real às áreas potencialmente adequadas. Embora os modelos climáticos indiquem áreas relativamente extensas de adequabilidade para o futuro, a cobertura vegetal natural remanescente nessas regiões é reduzida e fragmentada. O viés de altitude do clado ereta se intensifica nos cenários futuros, concentrando-se sobretudo em áreas elevadas do leste do Paraná e da Serra Catarinense. Das nove espécies que compõem o clado, apenas três (*Oxypetalum arnottianum*, *O. capitatum* e *O. crispum*) ocorrem atualmente dentro dos limites climáticos projetados como adequados para o futuro. Uma quarta espécie, *O. coeruleum*, localizada mais ao sul, mantém uma população isolada em área considerada estável. As cinco espécies remanescentes — *O. fontellae*, *O. chodatianum*, *O. marginatum*, *O. martii* e *O. arnottianum* (registros no Cerrado) — ocupam atualmente áreas de adequabilidade intermediária, as quais tendem à retração nos modelos futuros. Ademais, a ausência de remanescentes de vegetação natural nas proximidades

dessas localidades reduz significativamente a possibilidade de migração e colonização de novas áreas.

Compreende-se, portanto, que essas cinco espécies apresentam elevada vulnerabilidade frente às mudanças climáticas e à perda de habitat, configurando-se como espécies-chave para a formulação de estratégias e ações prioritárias de conservação.

Conclui-se que políticas públicas e estratégias conservacionistas devem ser direcionadas à proteção e restauração dos remanescentes de vegetação nas áreas de maior adequabilidade climática futura, com ênfase nas regiões de altitude elevada do leste do Paraná e da Serra Catarinense. A implementação de programas de monitoramento, manejo adaptativo e promoção de corredores ecológicos poderá contribuir significativamente para mitigar os impactos decorrentes das alterações climáticas. Além disso, ações integradas entre pesquisadores, gestores ambientais e comunidades locais serão essenciais para garantir a conservação da biodiversidade regional — incluindo o clado ereta — frente às rápidas e intensas transformações ambientais.

Referências

- Aiello-Lammens, M. E., R. A. Boria, A. Radosavljevic, B. Vilela, and R. P. Anderson. 2015. spThin: an R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. *Ecography* **38**: 541–545.
- Allouche, O., A. Tsoar, and R. Kadmon. 2006. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology* **43**: 1223–1232.
- Alves, G. B. M., V. M. Mendonça, A. P. Martarello, D. D. Pessi, A. Vieira, and S. M. Loverde-Oliveira. 2020. Análise ambiental do desmatamento em área de assentamento rural no Cerrado (Mato Grosso, Brasil). *Terra Plural* **14**: 1–13. Available at: <https://revistas.uepg.br/index.php/tp/article/view/15189>.

- Amaral, S., C. B. Costa, L. S. Arasato, A. C. Ximenes, and C. D. Rennó. 2013. AMBDATA: Variáveis ambientais para Modelos de Distribuição de Espécies (MDEs). *Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil*.
- Araújo, M. B. and P. H. Williams. 2000. Selecting areas for species persistence using occurrence data. *Biological Conservation* **96**: 331–345.
- Artaxo, P. 2020. As três emergências que nossa sociedade enfrenta: saúde, biodiversidade e mudanças climáticas. *Estudos Avançados* **34**: 53–66. <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2020.34100.005>.
- Ashraf, M. and P. J. C. Harris. 2013. Photosynthesis under stressful environments: an overview. *Photosynthetica* **51**: 163–190.
- Bellis, J. M., M. F. Jones, D. M. Hansen, J. P. Graves, and R. J. Smith. 2021. Using species distribution models to prioritize areas for plant reintroductions. *Ecological Applications* **31**: e02224. <https://doi.org/10.1002/eap.2224>.
- Butchart, S. H. M., M. Walpole, B. Collen, A. Van Strien, J. P. W. Scharlemann, R. E. A. Almond, J. E. M. Baillie, B. Bomhard, C. Brown, J. Bruno, K. E. Carpenter, G. M. Carr, J. Chanson, A. M. Chenery, J. Csirke, N. C. Davidson, F. Dentener, M. Foster, A. Galli, J. N. Galloway, P. Genovesi, R. D. Gregory, M. Hockings, V. Kapos, J. F. Lamarque, F. Leverington, J. Loh, M. A. Mcgeoch, L. Mcrae, A. Minasyan, J. C. Morrison, D. Pauly, S. Quader, C. Revenga, J. R. Sauer, B. Skolnik, B. M. Spears, D. Stanwell-Smith, S. N. Stuart, A. Symes, M. Tierney, T. D. Tyrrell, J. C. Vié, and R. Watson. 2010. Global biodiversity: indicators of recent declines. *Science* **328**: 1164–1168. <https://doi.org/10.1126/science.1187512>.
- Campos, G. M., G. O. Santos, L. A. Alievi, and V. C. G. Cantão. 2024. Mudanças climáticas e seus efeitos sobre a água no solo no cultivo de soja e milho em sucessão no Cerrado. *Observatório de la Economía Latinoamericana* **22**: 1–23. <https://doi.org/10.55905/oelv22n5-152>.

- Canhos, D. A. L., E. A. B. Almeida, A. L. Assad, V. P. Canhos, J. Maia, N. Lepsch-Cunha, J. I. R. Porto, M. P. A. Cohen, D. Giovannini, A. P. Silva, C. Medeiros, D. Moraes, L. M. Silva, M. Santos, M. Silva, R. Silva, S. Silva, T. Silva, V. Silva, W. Silva, Y. Silva, Z. Silva, A. B. Silva, C. D. Silva, E. F. Silva, G. H. Silva, I. J. Silva, K. L. Silva, M. N. Silva, O. P. Silva, Q. R. Silva, S. T. Silva, U. V. Silva, W. X. Silva, Y. Z. Silva, A. A. Silva, B. B. Silva, C. C. Silva, D. D. Silva, E. E. Silva, F. F. Silva, G. G. Silva, H. H. Silva, I. I. Silva, J. J. Silva, K. K. Silva, L. L. Silva, M. M. Silva, N. N. Silva, O. O. Silva, P. P. Silva, Q. Q. Silva, R. R. Silva, S. S. Silva, T. T. Silva, U. U. Silva, V. V. Silva, W. W. Silva, X. X. Silva, Y. Y. Silva, Z. Z. Silva, A. B. Silva, C. D. Silva, E. F. Silva, G. H. Silva, I. J. Silva, K. L. Silva, M. N. Silva, O. P. Silva, Q. R. Silva, S. T. Silva, U. V. Silva, W. X. Silva, Y. Z. Silva, A. A. Silva, B. B. Silva, C. C. Silva, D. D. Silva, E. E. Silva, F. F. Silva, G. G. Silva, H. H. Silva, I. I. Silva, J. J. Silva, K. K. Silva, L. L. Silva, M. M. Silva, N. N. Silva, O. O. Silva, P. P. Silva, Q. Q. Silva, R. R. Silva, S. S. Silva, T. T. Silva, U. U. Silva, V. V. Silva, W. W. Silva, X. X. Silva, Y. Y. Silva, and Z. Z. Silva. 2022. speciesLink: dados valiosos e ferramentas inovadoras para avaliações digitais da biodiversidade. *Biota Neotropica* **22**: e20221394. <https://doi.org/10.1590/1676-0611-BN-2022-1394>.
- Carneiro, R. G., M. A. L. Moura, V. P. R. Silva, R. S. S. Júnior, A. M. D. Andrade, and A. B. Santos. 2013. Estudo da temperatura do solo em dois biomas florestais nos períodos, chuvoso e seco. *Revista Brasileira de Geografia Física* **6**: 1009–1022.
- Cassini, M. H. 2011. Ecological principles of species distribution models: the habitat matching rule. *Journal of Biogeography* **38**: 2057–2065.
- Chatterjee, S. and A. S. Hadi. 2006. *Regression Analysis by Exemple*. 4th edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Costa, R. N. and R. Mello. 2021. Um panorama sobre a biologia da conservação e as ameaças à biodiversidade brasileira. *Sapiens: Revista de Divulgação Científica da UEMG* **2**: 50–69.

- Dambrowski, V., J. C. Refosco, and M. D. Vitorino. 2023. Modelagem de nicho potencial para espécies exóticas invasoras *Tithonia diversifolia* e *Hovenia dulcis* em Santa Catarina. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente* **16**: e7816. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2023v16n4e7816>.
- Del Rio, C., T.-X. Wang, J. Liu, S.-Q. Liang, R. A. Spicer, F.-X. Wu, Z.-K. Zhou, and T. Su. 2020. *Asclepiadospermum* gen. nov., the earliest fossil record of Asclepiadoideae (Apocynaceae) from the early Eocene of central Qinghai-Tibetan Plateau, and its biogeographic implications. *American Journal of Botany* **107**: 126–138. <https://doi.org/10.1002/ajb2.1418>.
- Di Cola, V., O. Broennimann, B. Petitpierre, F. T. Breiner, M. D'Amen, C. Randin, R. Engler, J. Pottier, D. Pio, A. Dubuis, L. Pellissier, R. G. Mateo, W. Hordijk, N. Salamin, and A. Guisan. 2017. ecospat: an R package to support spatial analyses and modeling of species niches and distributions. *Ecography* **40**: 774–787. <https://doi.org/10.1111/ecog.02671>.
- Dobbelaere, T., E. M. Muller, L. J. Gramer, D. M. Holstein, and E. Hanert. 2020. Coupled epidemio-hydrodynamic modeling to understand the spread of a deadly coral disease in Florida. *Frontiers in Marine Science* **7**: 591881. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.591881>.
- Endress, M. E. and P. V. Bruyns. 2000. A revised classification of the Apocynaceae. *The Botanical Review* **66**: 1–56.
- Esser, L. F., D. Bailly, R. Ré, and M. R. Lima. 2025. chooseGCM: selecting general circulation models for species distribution modeling. *Global Change Biology* **31**: 1234–1245. <https://doi.org/10.1111/gcb.70008>.
- Farinaccio, M. A. and R. Mello-Silva. 2006. *Oxypetalum gyrophyllum* and *O. oblanceolatum*, new species of Asclepiadoideae (Apocynaceae) from Brazil, and a key for the *O. insigne* group. *Novon* **16**: 235–239.
- Farinaccio, M. A. 2008. *Sistemática molecular de Oxypetalum R.Br. (Apocynaceae, Asclepiadoideae)*. Ph.D. dissertation. Universidade de São Paulo, São Paulo.

- Farinaccio, M. A. and D. J. Goyder. 2016. A synopsis of *Oxypetalum* (Apocynaceae) in Bolivia, with the description of one new species and a key to species in Bolivia. *Phytotaxa* **267**: 16–28. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.267.1.2>.
- Farinaccio, M. A. and R. Mello-Silva. 2004. Asclepiadoideae (Apocynaceae) do Parque Nacional da Serra da Canastra, Minas Gerais, Brasil. *Boletim de Botânica da Universidade de São Paulo* **22**: 53–92.
- Feller, U. and I. I. Vaseva. 2014. Extreme climatic events: impacts of drought and high temperature on physiological processes in agronomically important plants. *Frontiers in Environmental Science* **2**.
- Fick, S. E. and R. J. Hijmans. 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Journal of Climatology* **37**: 4302–4315.
- Fielding, A. H. and J. F. Bel. 1997. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation* **24**: 38–49.
- Fishbein, M., T. Livshultz, S. C. K. Straub, A. O. Simões, J. Boutte, A. McDonnell, and A. Foote. 2018. Evolution on the backbone: Apocynaceae phylogenomics and new perspectives on growth forms, flowers and fruits. *American Journal of Botany* **105**: 495–513.
- Flora e Funga do Brasil. 2020. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Available at: <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB4741> (accessed 21 August 2024).
- GBIF. 2024. GBIF home page. Available at: <https://www.gbif.org> (accessed 7 July 2023).
- Giannini, T. C., M. F. Siqueira, A. L. Acosta, F. C. C. Barreto, A. M. Saraiva, and I. Alves-dos-Santos. 2012. Desafios atuais da modelagem preditiva de distribuição de espécies. *Rodriguesia* **63**: 733–749.
- González, A. and H. A. Keller. 2020. El género *Oxypetalum* (Apocynaceae) en Uruguay, nueva especie y clave de identificación. *Darwiniana, Nueva Serie* **8**: e882. <https://doi.org/10.14522/darwiniana.2020.81.882>.

- González-Fernández, A., C. González-Salazar, A. Sunny, F. Ruíz-Gutiérrez, and C. Chávez. 2022. Determination of priority areas for amphibian conservation in Guerrero (Mexico), through systematic conservation planning tools. *Journal for Nature Conservation* **68**: 126235. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2022.126235>.
- Gorelick, N., M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, and R. Moore. 2017. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment* **202**: 18–27.
- Goyder, D. J. 2006. An overview of Asclepiad biogeography. Pp. 205–214 in *Taxonomy and Ecology of African Plants, Their Conservation and Sustainable Use*, eds. S. A. Ghazanfar and H. J. Beentje. Royal Botanic Gardens, Kew.
- Graham, C. H., S. Ferrier, F. Huettman, C. Moritz, and A. T. Peterson. 2004. New developments in museum-based informatics and applications in biodiversity analysis. *Trends in Ecology and Evolution* **19**: 497–503.
- Haldimann, P. and U. Feller. 2005. O crescimento em temperatura moderadamente elevada altera a resposta fisiológica do aparelho fotossintético ao estresse térmico em folhas de ervilha (*Pisum sativum* L.). *Plant, Cell and Environment* **28**: 302–317.
- Hirzel, A. H., J. Hausser, D. Chessel, and N. Perrin. 2002. Ecological-niche factor analysis: how to compute habitat-suitability maps without absence data? *Ecology* **83**: 2027–2036.
- Keller, A. H., L. A. Funez, and S. Liede-Schumann. 2021. Novelties in *Oxypetalum* (Apocynaceae: Asclepiadoideae): a new species and revalidation of the name *O. megapotamicum*. *Rodriguésia* **72**.
- Keller, H. A. 2015. *Oxypetalum radinsii* (Apocynaceae: Asclepiadoideae), una nueva especie endémica de Misiones, Argentina. *Bonplandia* 24: 51–56. <https://doi.org/10.30972/bon.241209>.
- Keller, H. A. 2020. *Oxypetalum* (Apocynaceae) en la Argentina: una nueva especie, nuevos sinónimos y una clave de identificación. *Bonplandia* 29: 81–99.

<https://doi.org/10.30972/bon.2914111>.

Keller, H. A. 2022. Una nueva especie de *Oxypetalum* (Apocynaceae), colectada en Santa Catarina, Brasil, hace 45 años. *Bonplandia* 31: 143–147. <https://doi.org/10.30972/bon.3126012>.

Keller, H. A. and L. A. Funez. 2017. Uma nova espécie de *Oxypetalum* (Apocynaceae: Asclepiadoideae) de Santa Catarina, Brasil. *Bonplandia* 26: 119–124.

Kunin, W. E. and K. J. Gaston. 1993. The biology of rarity – patterns, causes and consequences. *Trends in Ecology and Evolution* 8: 298–301.

Landau, E. C., R. B. T. Tavares, A. Hirsch, and C. A. Barros. 2009. Tendências de variação de amplitude térmica no Brasil em função das mudanças climáticas. ResearchGate.

Liede-Schumann, S., A. Rapini, D. Goyder, and M. Chase. 2005. Phylogenetics of New World subtribes of Asclepiadeae (Apocynaceae, Asclepiadoideae): Metastelmatinae, Oxypetalinae and Gonolobinae. *Systematic Botany* 30: 184–195.

Martin, C. M., C. A. Zanotti, and C. Ezcurra. 2017. A new species of *Oxypetalum* (Apocynaceae, Asclepiadoideae) from northern Argentina. *Systematic Botany* 42: 578–583.

Martinelli, G., L. Moraes, L. Moulton, L. Santos Filho, R. Negrão, R. Avancini, R. Amaro, and T. Messina. 2014. Avaliações de risco de extinção das plantas raras do Cerrado: resultados, desafios e perspectivas. Pp. [sem intervalo definido] in *Livro Vermelho da Flora do Brasil – Plantas Raras do Cerrado*, eds. G. Martinelli, T. Messina, and L. Santos Filho. Rio de Janeiro: Andrea Jakobsson; Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro; CNCFlora.

Miller, J. 2010. Species distribution modeling. *Geography Compass* 4: 490–509.

Naimi, B. and M. B. Araújo. 2016. Sdm: a reproducible and extensible R platform for species distribution modelling. *Ecography* 39: 368–375.

Pebesma, E. 2018. sf: simple features for R. <https://cran.r-project.org/package=sf>.

Phillips, S. J., R. P. Anderson, and R. E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190: 231–259.

- Polasky, S. and A. R. Solow. 2001. The value of information in reserve site selection. *Biodiversity and Conservation* **10**: 1051–1058.
- R Core Team. 2020. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Available at: <https://www.R-project.org> (accessed 8 January 2023).
- Rapini, A., M. Chase, D. Goyder, and J. Griffiths. 2003. Asclepiadeae classification: evaluating the phylogenetic relationship of New World Asclepiadoideae (Apocynaceae). *Taxon* **52**: 33–50.
- Rapini, A., J. F. Pereira, and D. J. Goyder. 2011. Towards a stable generic circumscription in Oxypetalinae (Apocynaceae). *Phylotaxa* **26**: 9–16.
- Rapini, A., C. van den Berg, and S. Liede-Schumann. 2007. Diversification of Asclepiadoideae (Apocynaceae) in the New World. *Annals of the Missouri Botanical Garden* **94**: 407–422.
- Rezende, V. L., M. L. Bueno, P. V. Eisenlohr, and A. T. Oliveira-Filho. 2018. Patterns of tree species variation across southern South America are shaped by environmental factors and historical processes. *Evolution and Systematics* **34**: 10–16.
- Silva, M. A. F., P. Higuchi, and A. C. Silva. 2018. Impacto de mudanças climáticas sobre a distribuição geográfica potencial de *Ilex paraguariensis*. *Rodriguésia* **69**: 2069–2079.
- Simon, L. M., G. Oliveira, B. S. Barreto, J. C. Nabout, and J. A. F. Diniz Filho. 2013. Effect of global climate changes on geographical distribution patterns of economically important plant species in Cerrado. *Árvore* **37**: 267–274.
- Song, Y., Q. Chen, D. Ci, X. Shao, and D. Zhang. 2014. Effects of high temperature on photosynthesis and related gene expression in poplar. *BMC Plant Biology* **14**: 111. <https://doi.org/10.1186/1471-2229-14-111>.
- Souza, C. M., Jr., J. Z. Shimbo, M. R. Rosa, L. L. Parente, A. Alencar, B. F. T. Rudorff, H. Hasenack, M. Matsumoto, L. G. Ferreira, P. W. M. Souza-Filho, S. W. Oliveira, W. F. Rocha,

- A. V. Fonseca, C. B. Marques, C. G. Diniz, D. Costa, D. Monteiro, E. R. Rosa, E. Vélez-Martin, E. J. Weber, F. E. B. Lenti, F. F. Paternost, F. G. C. Pareyn, J. V. Siqueira, J. L. Viera, L. C. Ferreira Neto, M. M. Saraiva, M. H. Sales, M. P. G. Salgado, R. Vasconcelos, S. Galano, V. V. Mesquita, and T. Azevedo. 2020. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine. *Remote Sensing* **12**(17): 2735.
- Souza, D. A. T. de, A. A. de Lima, M. S. Wrege, A. V. de Aguiar, C. de S. Bezerra, C. H. S. G. Meneses, R. Lopes, S. L. F. Ramos, I. L. D. Paranatinga, and M. T. G. Lopes. 2024. Impacts of climate change on the natural distribution of species of lowland high and low in the Amazon. *Revista Árvore* **48**: e4808. <https://doi.org/10.53661/1806-9088202448263751>.
- Suicmez, B., and M. Avci. 2023. Distribution patterns of *Quercus ilex* from the last interglacial period to the future by ecological niche modeling. *Ecology and Evolution* **13**(10): e10606. <https://doi.org/10.1002/ece3.10606>.
- Taucare-Ríos, A., W. Chia-Daponte, and C. Gaete-Callao. 2023. Evaluating thermal niche overlap of a predator–prey system: Do spiders choose suboptimal temperatures in pursuit of prey? *Physiological Entomology* **49**: 49–57.
- Vital, F. A. Z., and A. T. Nakamura. 2018. Androecium development of *Oxypetalum appendiculatum* Mart. (Apocynaceae): a taxonomic approach. *Scientific Electronic Archives* **11**(5): 130–139. <https://doi.org/10.36560/1152018391>.
- Wan, J. Z., C. J. Wang, F. H. Yu, and F. Huang. 2016. Using species distribution modeling to identify conservation priorities for endangered plant species under climate change. *Ecological Indicators* **69**: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.04.017>.
- Warashina, T., and O. Shiota. 2021. Tetracyclic triterpenoids, steroids and lignanes from the aerial parts of *Oxypetalum caeruleum*. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin* **69**(2): 226–231. <https://doi.org/10.1248/cpb.c20-00789>.

- Warashina, T., O. Shirota, and K. Ohara. 2023. 12,20-Epoxy pregnane glycosides from the roots of *Oxypetalum caeruleum*. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin* **71**(9): 734–740. <https://doi.org/10.1248/cpb.c23-00388>.
- Wickham, H., R. François, L. Henry, K. Müller, and D. Vaughan. 2025. *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*. R package version 1.1.4.9000. <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>
- Wolf, M. M. 2021. Impacto de mudanças climáticas sobre espécies vegetais endêmicas dos campos do Rio da Prata. 114 f. M.Sc. thesis – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- Wyatt, J. L., and M. R. Silman. 2004. Distance-dependence in two Amazonian palms: effects of spatial and temporal variation in seed predator communities. *Oecologia* **140**: 26–35.

TABELA 1. Número de ocorrências das espécies de *Oxypetalum*. Ocorrências registradas: total de coletas realizadas para cada espécie; ocorrências excluídas: registros desconsiderados por falta informação, coordenadas geográficas ausentes, centroides e duplicatas; ocorrências consideradas: registros utilizados nas análises estatísticas.

Espécies	Ocorrências registradas	Ocorrências excluídas	Ocorrências consideradas
<i>Oxypetalum aequaliflorum</i>	127	123	4
<i>Oxypetalum arnottianum</i>	581	530	51
<i>Oxypetalum capitatum</i>	1.390	1326	64
<i>Oxypetalum chodatianum</i>	142	141	1
<i>Oxypetalum coeruleum</i>	505	488	17
<i>Oxypetalum crispum</i>	463	435	28
<i>Oxypetalum fontellae</i>	19	18	1
<i>Oxypetalum marginatum</i>	72	71	1
<i>Oxypetalum martii</i>	145	144	1
TOTAL	3.444	3.276	168

TABELA 2. Área total de retração, ausência, estabilidade de expansão dos modelos preditivos.

Anos/Cenários		Retração	Ausência	Estabilidade	Expansão
2041- 2060	SSP2-4.5	94.653,52 km ²	1.916,15 km ²	8.221,57 km ²	15.600,7 km ²
	SSP5-8.5	94.471,97 km ²	1.708,2 km ²	8.400,2 km ²	15.939,3 km ²
2081- 2100	SSP2-4.5	94.805,01 km ²	2.042,2 km ²	8.078,1 km ²	15.425,2 km ²
	SSP5-8.5	94.892,34 km ²	2.262,6 km ²	8.040,2 km ²	15.315,15 km ²

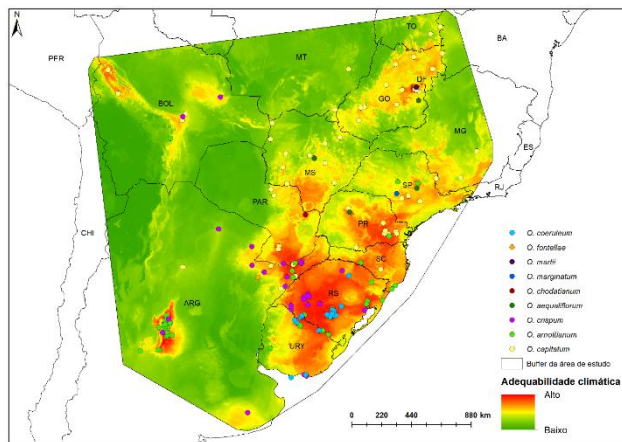


FIG 1. Adequabilidade climática do presente e distribuição geográfica das espécies do clado ereta do gênero *Oxypetalum* para a área de estudo na América do Sul.

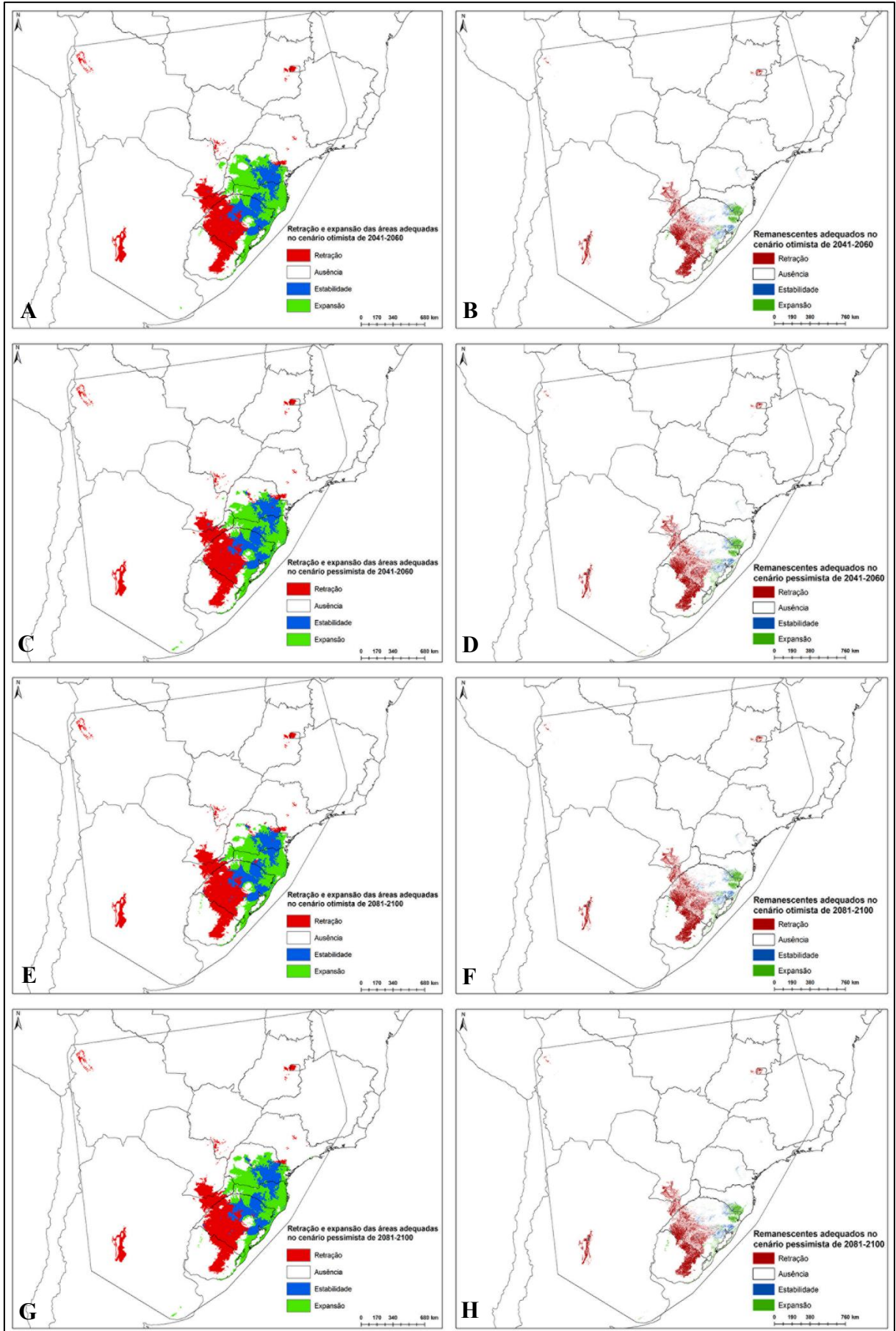


FIG 2. Retração e expansão das áreas adequadas para o clado ereta nos cenários futuros considerando o clima e os remanescentes de vegetação. A – expansão e retração das áreas climáticas adequadas no cenário otimista do período entre 2041 e 2060; B – expansão e retração das áreas climáticas adequadas considerando os remanescentes no cenário otimista do período entre 2041 e 2060; C – expansão e retração das áreas climáticas adequadas no cenário pessimista do período entre 2041 e 2060; D – expansão e retração das áreas climáticas adequadas considerando os remanescentes no cenário pessimista do período entre 2041 e 2060; E - expansão e retração das áreas climáticas adequadas no cenário otimista do período entre 2081 e 2100; F - expansão e retração das áreas climáticas adequadas considerando os remanescentes no cenário otimista do período entre 2081 e 2100; G - expansão e retração das áreas climáticas adequadas no cenário pessimista do período entre 2081 e 2100; H - expansão e retração das áreas climáticas adequadas considerando os remanescentes no cenário pessimista do período entre 2081 e 2100.

MATERIAL SUPLEMENTAR – ANEXO I

Tabela S1. Endereço eletrônico das espécies estudadas obtidas do banco de dados digital da plataforma GBIF.

Espécie	Endereço eletrônico
<i>Oxypetalum aequaliflorum</i>	https://www.gbif.org/species/3573604
<i>Oxypetalum arnottianum</i>	https://www.gbif.org/species/7311897
<i>Oxypetalum capitatum</i>	https://www.gbif.org/species/7486690
<i>Oxypetalum chodatianum</i>	https://www.gbif.org/species/3572952
<i>Oxypetalum coeruleum</i>	https://www.gbif.org/species/3572841
<i>Oxypetalum crispum</i>	https://www.gbif.org/species/3572687
<i>Oxypetalum fontellae</i>	https://www.gbif.org/species/3572360
<i>Oxypetalum marginatum</i>	https://www.gbif.org/species/3571522
<i>Oxypetalum martii</i>	https://www.gbif.org/species/3571501

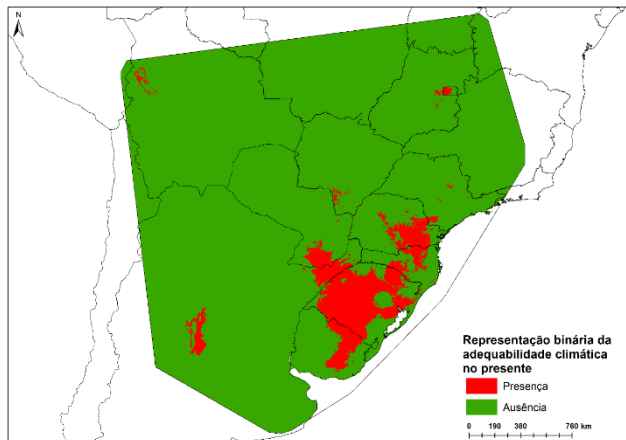
MATERIAL SUPLEMENTAR – ANEXO II

FIG S1. mapa binário da adequabilidade climática do clado ereta no cenário atual.

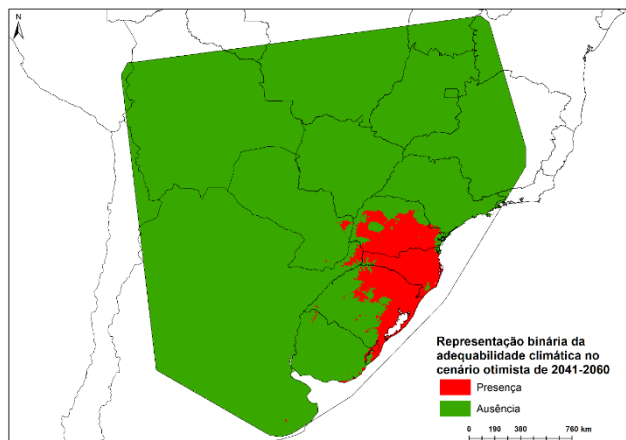


FIG S2. mapa binário da adequabilidade climática do clado ereta no cenário otimista do período entre 2041 e 2060.

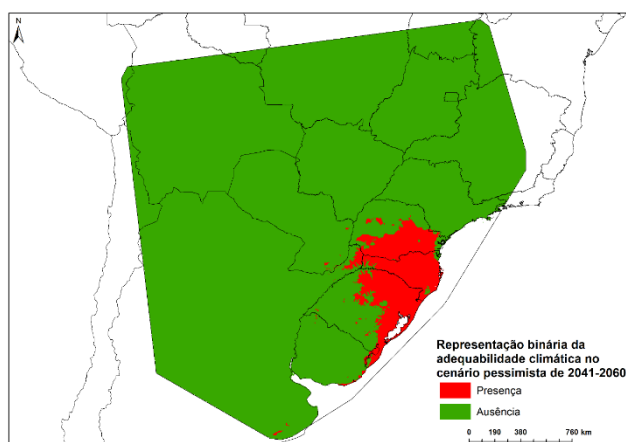


FIG S3. mapa binário da adequabilidade climática do clado ereta no cenário pessimista do período entre 2041 e 2060.

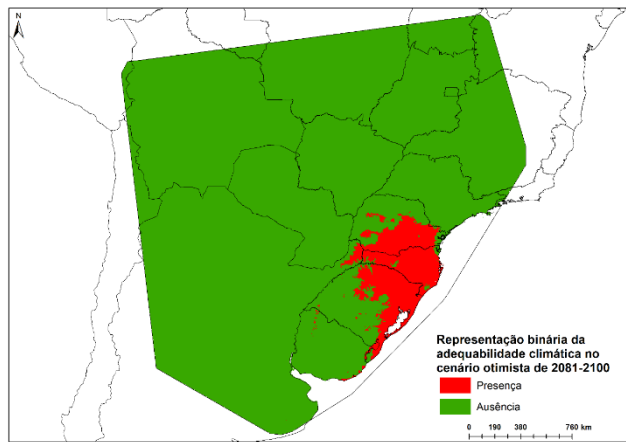


FIG S4. mapa binário da adequabilidade climática do clado ereta no cenário otimista do período entre 2081 e 2100.

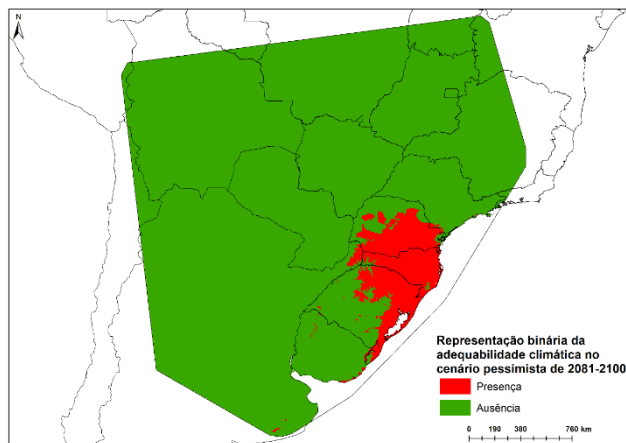


FIG S5. mapa binário da adequabilidade climática do clado ereta no cenário pessimista do período entre 2081 e 2100.