
Modelagem Ecológica descritiva e preditiva da *eremanthus erythropappus* : Estratégias para Gestão e Mitigação de Impactos Ambientais e Desastres

Thyago Anthony Soares Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4607-2953>
Universidade Estadual de Feira de Santana, Brasil
E-mail: thyagoanthonysoares@yahoo.com.br

Alisson Henrique Silva dos Santos

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5110-614X>
Universidade Federal de Alagoas, Brasil
E-mail: alisson.santos@ceca.ufal.br

RESUMO

Este estudo utilizou modelagem ecológica com o software Maxent para prever a distribuição da espécie *Eremanthus erythropappus* (Candeia) e identificar áreas de alta adequabilidade ambiental. Foram analisadas 20 variáveis ambientais e 419 amostras, resultando em uma precisão de 98,2%. A modelagem revelou áreas de alta adequabilidade principalmente no sudeste do Brasil, com presença em Minas Gerais, São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo, e extensões menores em Goiás, Brasília, Bahia, Bolívia e Paraguai. A Candeia possui um potencial invasivo significativo, podendo formar povoamentos monoespecíficos que afetam negativamente a biodiversidade e a agricultura, ao mesmo tempo possui importância biológica/ecológica grande para o cerrado, e alto potencial econômico. A modelagem é essencial para a gestão e manejo da espécie, permitindo a antecipação e mitigação de desastres ecológicos, biológicos e agrícolas, além de auxiliar na restauração de ecossistemas degradados.

Palavras-chave: Modelagem Ecológica, Distribuição de Espécies, Manejo de Espécies

ABSTRACT

This study used ecological modeling with Maxent software to predict the distribution of the species *Eremanthus erythropappus* (Candeia) and identify areas of high environmental suitability. Twenty environmental variables and 419 samples were analyzed, resulting in 98.2% accuracy. The modeling revealed areas of high suitability mainly in southeastern Brazil, including Minas Gerais, São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo, and smaller extensions in Goiás, Brasília, Bahia, Bolivia, and Paraguay. Candeia has significant invasive potential, forming monospecific stands that negatively impact biodiversity and agriculture, while also holding substantial biological/ecological importance for the cerrado and high economic potential. Modeling is essential for the management and control of the species, enabling the anticipation and mitigation of ecological, biological, and agricultural disasters, and aiding in the restoration of degraded ecosystems.

Keywords: Ecological Modeling, Species Distribution, Species Management

INTRODUÇÃO

A América do Sul possui uma enorme variedade e riqueza quando se trata de formações vegetais, conseqüentemente maior abundância em relação às angiospermas, o que pode ser explicado pela grande extensão territorial e por apresentar variações nas condições climáticas, geológicas e de relevo. Mesmo assim, apesar da importância da flora e dos inúmeros estudos já realizados, ainda não há um total conhecimento das espécies presentes no continente, bem como em toda a sua biodiversidade e tão pouco nos ecossistemas presentes.

Parte-se aqui da ideia de “nicho ecológico” que é usado para criar e fomentar padrões de riqueza e distribuição de uma espécie e, conjuntamente com outros fatores, como o fator ecológico, o fator evolutivo e o fator histórico, interferem sobre os padrões de espacialização das espécies. O conceito de nicho ecológico pode ser aplicado para diversos fins, como: conservação de espécies raras ou ameaçadas, identificação dos impactos das mudanças climáticas, reintrodução de espécies, identificação de áreas com potencial para espécies invasoras (Ferraro, 2017).

A análise espacial para a distribuição de espécies de plantas pode vir a ser determinada pelo espaço multidimensional do nicho ecológico que esta ocupa, incluindo fatores como o clima, fertilidade do solo, distúrbios e interações bióticas. Esses fatores atuam como filtros, determinando a variação regional de espécies dentro das comunidades locais (Silva et al., 2014).

Os mapas de distribuição potencial de espécies podem vir a auxiliar na identificação de prováveis locais de ocorrência de espécies, sobretudo as espécies de múltiplos usos, como a *Eremanthus erythropappus* (DC.) Macleish, popularmente conhecida como candeia. Esta espécie é classificada na família Asteraceae, pertencente ao grupo ecológico das pioneiras e é considerada precursora na invasão de campos (Carvalho, 1994).

A Candeia possui um poder invasivo significativo, especialmente em áreas de campos abertos e florestas perturbadas. Sua rápida colonização pode levar à formação de povoamentos quase puros, alterando a composição vegetal nativa e comprometendo a biodiversidade local. Este comportamento invasivo pode resultar em desastres ecológicos, como a perda de habitats para espécies nativas e a alteração de ecossistemas inteiros. Além disso, a presença dominante da Candeia pode afetar negativamente a

produtividade agrícola, ao competir por recursos com culturas economicamente importantes.

Esta espécie se desenvolve rapidamente, pois é uma espécie heliófila e a entrada de luz a beneficia. É uma árvore cuja altura varia de 2 a 10 m, e o seu diâmetro pode atingir 35 cm. O tronco desta árvore possui uma casca grossa e cheia de fendas no fuste e, nos galhos mais novos, a casca torna-se menos rústica. As folhas têm uma característica marcante, que é a dupla coloração: na parte superior são verdes e glabras, e na parte inferior possuem um tom branco, tomentoso e são aveludadas (Corrêa, 1931). As folhas são simples, opostas, com pilosidade cinérea (Chaves e Ramalho, 1996). As flores são hermafroditas e se apresentam em inflorescências de cor púrpura nas extremidades dos ramos (Araújo, 1944). As características das folhas e das inflorescências facilitam a identificação da espécie mesmo à distância.

O fruto é do tipo aquênio, com superfície cilíndrica e com dez arestas, de cor pardo-escura, com aproximadamente 2 mm de comprimento. Cada fruto contém uma só semente. Uma característica interessante dessa espécie é seu desenvolvimento em sítios com solos pouco férteis, rasos e, predominantemente, em áreas de campos de altitude, com esta variando entre 1.000 e 1.700 m. Enfim, a candeia se desenvolve em locais onde seria difícil a implantação de culturas agrícolas ou mesmo a implantação de alguma outra espécie florestal.

A madeira é branca ou acinzentada com grã mais escura, seu peso específico é de 0,912, apresenta resistência ao esmagamento, carga perpendicular 339 e carga paralela 472 kg/cm² (Corrêa, 1931). É uma espécie florestal de múltiplos usos, sendo utilizada como moirão de cerca pela sua durabilidade, e também por seu óleo essencial cujo princípio ativo é o alfabisabolol, que exhibe propriedades antiflogísticas, antibacterianas, antimicóticas, dermatológicas e espasmódicas (Teixeira et al., 1996). Por causa destas propriedades, o alfabisabolol é utilizado na fabricação de medicamentos e cosméticos, sendo que o quilo do óleo bruto e do óleo refinado é comercializado a US\$ 18,00 e US\$ 60,00/kg, respectivamente.

Esta espécie, pertencente à família Asteraceae e ao grupo ecológico das pioneiras, desempenha um papel significativo nos ecossistemas onde está presente. A candeia é uma espécie que se desenvolve rapidamente em campos abertos e áreas perturbadas dentro de florestas, mostrando sua capacidade de colonizar e estabilizar solos em condições adversas, como solos pouco férteis e de altitude. Essa característica torna a modelagem

de sua distribuição vital para entender melhor como ela contribui para a recuperação de ecossistemas degradados.

Além de seu valor ecológico, a candeia possui importância econômica significativa. A madeira da candeia é altamente valorizada por sua durabilidade e resistência. Mais importante ainda é o óleo essencial extraído da candeia, que contém propriedades medicinais e cosméticas valiosas. A demanda por esse óleo no mercado, tanto em sua forma bruta quanto refinada, destaca a necessidade de uma gestão eficaz e sustentável dos recursos naturais para atender a essa demanda enquanto preserva a biodiversidade.

Modelar a distribuição da candeia também é essencial para a conservação e o manejo sustentável. Ao prever a distribuição potencial da espécie, é possível identificar áreas adequadas para o cultivo e a exploração sustentável, evitando a sobre-exploração e a degradação dos habitats naturais. A modelagem ajuda a planejar projetos de restauração ecológica, identificar áreas prioritárias para a conservação e entender melhor a adaptabilidade da espécie a diferentes condições ambientais.

Neste contexto, diversos estudos têm utilizado o Maxent (Maximum Entropy Modeling) para caracterizar, prever e manejar a distribuição de plantas visando a conservação. Por exemplo, Phillips et al. (2006) demonstraram a eficácia do Maxent ao modelar a distribuição de várias espécies vegetais nos Estados Unidos, destacando a capacidade do algoritmo em lidar com dados de presença apenas e diversas variáveis ambientais. Outro estudo de Elith et al. (2011) utilizou o Maxent para prever a distribuição de espécies invasoras de plantas na Austrália, contribuindo para estratégias de manejo e controle de invasões biológicas.

Na América do Sul, Ortega-Huerta e Peterson (2008) aplicaram o Maxent para modelar a distribuição de espécies de plantas no México, fornecendo informações cruciais para a conservação de habitats fragmentados. Da mesma forma, Costa et al. (2010) usaram o Maxent para estudar a distribuição de espécies endêmicas da floresta Atlântica brasileira, revelando áreas prioritárias para conservação.

Estudos específicos em ecossistemas áridos e semiáridos também têm mostrado a utilidade do Maxent. Hijmans et al. (2005) utilizaram o modelo para prever a distribuição de espécies de cactos no deserto de Sonora, o que ajudou a identificar áreas vulneráveis às mudanças climáticas. Da mesma forma, Pearson et al. (2007) aplicaram o Maxent para

analisar a distribuição de espécies de gramíneas no cerrado brasileiro, fornecendo dados valiosos para programas de restauração ecológica.

Além desses exemplos, inúmeras outras pesquisas têm utilizado o Maxent para prever mudanças na distribuição de espécies de plantas devido a cenários de mudanças climáticas. Thuiller et al. (2005) modelaram a distribuição de espécies de plantas europeias sob diferentes cenários de aquecimento global, enquanto Wiens et al. (2009) aplicaram o Maxent para prever a resposta de espécies de plantas às mudanças climáticas na América do Norte.

Portanto, este trabalho teve por objetivo gerar modelos da distribuição potencial atual de *Eremanthus erythropappus* para a América do Sul, a fim de fornecer informações que servirão como estratégia para o uso sustentável, conservação, restauração e domesticação.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de Estudo:

A América do Sul ocupa uma área de 17 819 100 quilômetros quadrados, localiza-se a 60° 00' 00" de longitude oeste do Meridiano de Greenwich e a 20° 00' 00" de latitude sul da Linha do Equador e com fusos horários -6, -5, -4, -3 e -2 horas em relação a hora mundial GMT. Quatro quintos do continente ficam abaixo da Linha do Equador. No planeta Terra, o continente faz parte do continente pan-americano. É banhado pelo mar do Caribe, oceano Atlântico e oceano Pacífico (Figura 1).

Área de estudo abrange todo o continente sul americano, compreendendo uma área de total 17 850 568 km², abrangendo 12% da superfície terrestre e 6% da população mundial. Une-se à América Central a norte pelo istmo do Panamá e se separa da Antártida ao sul pelo estreito de Drake. Tem uma extensão de 7 500 km desde o mar do Caribe até ao cabo Horn, ponto extremo sul do continente.

Os outros pontos extremos da América do Sul são: ao norte a Punta Gallinas, na Colômbia, ao leste a Ponta do Seixas, no Brasil, e a oeste a Punta Pariñas, no Peru. Seus limites naturais são: ao norte com o mar do Caribe; a leste, nordeste e sudeste com o oceano Atlântico; e a oeste com o oceano Pacífico (Atlas Mundial, 1999). O Brasil representa atualmente a metade da população e produto econômico desta região (Schenoni, 2015).

Figura 1 – América do Sul



Fonte: Autor

No continente, existem tipos bem diversos de ambiente. A oeste fica a extensa cadeia montanhosa dos Andes, que atinge até 6 700 m de altitude em alguns pontos. O norte é quase completamente tomado pela densa e úmida Floresta Amazônica. Na região central do continente predominam áreas alagadas que incluem o Pantanal brasileiro e Chaco boliviano. Mais para o sul há planícies e cerrados. Na costa leste, a floresta costeira original cedeu lugar à ocupação industrial e agrícola (Atlas Mundial, 1999).

Os mais importantes sistemas hidrográficos da América do Sul — o do Amazonas (o mais vasto), do Orinoco e do Paraná-rio da Prata — têm a maior parte de suas bacias de drenagem na planície. Os três sistemas, em conjunto, drenam uma área de cerca de 9 583 000 km². A maior parte dos lagos da América do Sul localiza-se nos Andes ou ao longo de seu sopé. Entre os lagos andinos, destacam-se o Titicaca e o Poopó. A mais importante formação lacustre do norte é o lago de Maracaibo, na Venezuela, e na costa oriental salienta-se a lagoa dos Patos, no Brasil (Atlas Mundial, 1999).

Nas latitudes temperadas, os invernos são mais amenos e os verões mais quentes do que na América do Norte. Pelo fato de sua parte mais extensa do continente localizar-se na zona equatorial, a região possui mais áreas de planícies equatoriais do que qualquer outra região (Atlas Mundial, 1999). As temperaturas médias anuais na bacia Amazônica oscilam em torno de 27 °C, com baixa amplitudes térmicas e altos índices pluviométricos.

Entre o lago de Maracaibo e a foz do Orinoco, predomina um clima equatorial, que engloba também partes do território brasileiro (Atlas Mundial, 1999).

O centro-leste do planalto brasileiro possui clima tropical úmido e quente. As partes norte e leste do pampa argentino possuem clima subtropical húmido com invernos secos e verões húmidos, enquanto as faixas oeste e leste tem clima subtropical. Nos pontos mais elevados da região andina, os climas são mais frios. Nos planaltos andinos, predomina o clima quente, embora amenizado pela altitude, enquanto na faixa costeira, registra-se um clima equatorial.

Deste ponto até o norte do litoral chileno aparecem, sucessivamente, clima mediterrâneo oceânico, temperado e, já na Terra do Fogo, clima frio. (Atlas Mundial, 1999). A cobertura vegetal é complexa, especialmente nos planaltos e nas áreas em que ocorrem diferenças de precipitação pluviométrica. As florestas tropicais úmidas são bastante extensas, cobrindo a bacia Amazônica (Atlas Mundial, 1999). Uma zona semicircular de florestas temperadas de araucária reveste parte do planalto Meridional Brasileiro, enquanto a floresta fria estende-se sobre os Andes centro-meridionais chilenos, e florestas tropicais descontínuas compreendem a região do Chaco (Atlas Mundial, 1999).

Existem vastas áreas de campos e savanas. No Nordeste brasileiro, sob um clima semiárido, aparece a caatinga e, correspondendo ao clima tropical, estendem-se os cerrados do Brasil central. Os páramos, vegetação estépica de altitude, cobrem amplas porções dos planaltos interandinos do Equador e do Peru setentrional, enquanto os pampas apresentam a mesma vegetação. E a vegetação desértica das punas, predomina em larga faixa do litoral do Pacífico, no Peru centro-meridional, norte do Chile e nordeste da Argentina (Atlas Mundial, 1999).

Espécie modelada e Dados de Ocorrência:

A espécie a ser trabalhada é a candeia (*Eremanthus erythropappus*) como já mencionado esta planta, pertence à família Asteraceae, esta espécie apresenta baixa exigência nutricional, desenvolvendo em solos com baixa fertilidade natural e em altitude que varia entre 900 e 1800m, se desenvolvendo em locais onde seria difícil a implantação de culturas agrícolas ou mesmo a implantação de alguma outra espécie florestal (Amaral et al., 2014). Sua madeira é de grande estima e valor financeiro sobretudo para indústria de fármacos.

Os registros de ocorrência de espécies foram extraídos, do gbif.org com 419 registros de *Eremanthus erythropappus*. Estes dados são referentes as amostras devidamente identificadas por especialistas ou via herbário virtual.

Variáveis ambientais:

Foram utilizadas 20 variáveis ambientais, sendo 19 bioclimáticas (extraídas do site Worldclim (2022), que disponibiliza dados climáticos), uma variável topográfica oriunda do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), (Quadro 1). As variáveis ambientais apresentam resolução de 30' e foram extraídas para o território da América do Sul.

Tabela 1 - Variáveis

Código	Variável
BIO1	Temperatura Média Anual
BIO2	Intervalo Diurno Médio (Média do mês (temperatura máxima - temperatura mín.))
BIO3	Isotermalidade (BIO2/BIO7) (×100)
BIO4	Sazonalidade da Temperatura (desvio padrão ×100)
BIO5	Temperatura máxima do mês mais quente
BIO6	Temperatura mínima do mês mais frio
BIO7	Faixa Anual de Temperatura (BIO5-BIO6)
BIO8	Temperatura média do trimestre mais úmido
BIO9	Temperatura média do trimestre mais seco
BIO10	Temperatura Média do Trimestre Mais Quente
BIO11	Temperatura média do trimestre mais frio
BIO12	Precipitação Anual
BIO13	Precipitação do mês mais úmido
BIO14	Precipitação do Mês Mais Seco
BIO15	Sazonalidade de Precipitação (Coeficiente de Variação)
BIO16	Precipitação do trimestre mais úmido
BIO17	Precipitação do trimestre mais seco
BIO18	Precipitação do Quarto Mais Quente
BIO19	Precipitação do trimestre mais frio
alt	Altitude

Fonte: World Clim / SRTM

Foram eliminadas do modelo, as variáveis de menor relevância, restando três das 20 variáveis ambientais. Este procedimento foi realizado para evitar ou minimizar overparametrization de variáveis redundantes. Assim, as variáveis ambientais mantidas foram: bio 4 , bio 9, e bio 19 Ao final desse processo, foi obtido um mapa regional mostrando a distribuição geográfica potencial da espécie modelada.

Modelagem

Para gerar o modelo de distribuição de espécie utilizou-se o programa Maximum Entropy Species Distribution Modelling (Maxent) na versão 3.4, desenvolvido por Phillips et al. (2006). O algoritmo Maxent estima a probabilidade de ocorrência da espécie por meio da distribuição de probabilidade da máxima entropia e apresenta a probabilidade de ocorrência em uma escala contínua de 0 a 1, permitindo analisar as diferenças entre as áreas de distribuição da espécie (Metz, 1986).

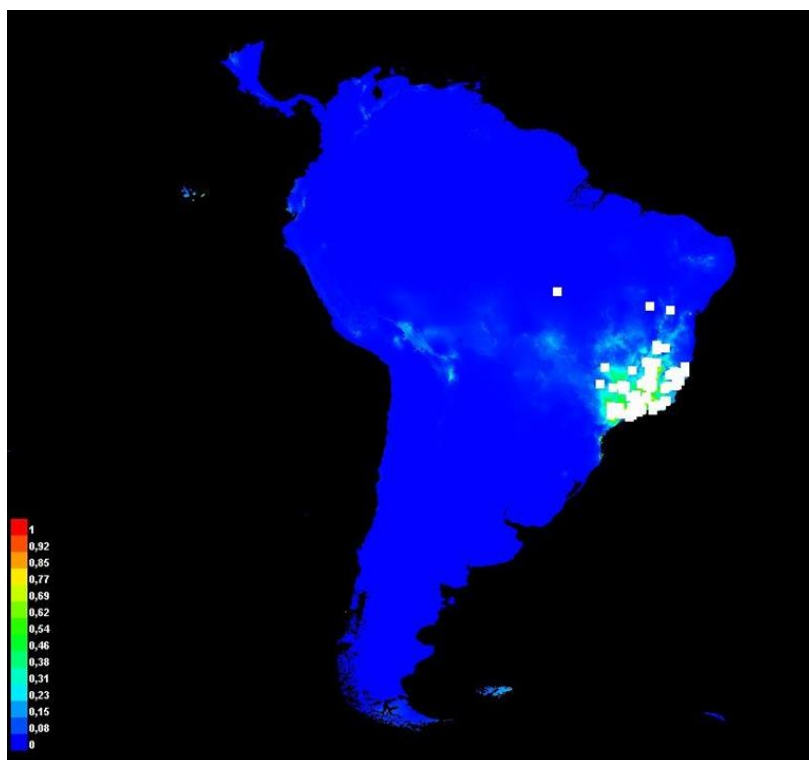
O mesmo algoritmo foi testado e comparado com outros modelos onde se concluiu que os resultados são mais robustos, devido ao maior acerto nas predições e destaca-se ainda o fato de necessitar apenas de dados de presença para modelar toda a área de estudo, juntamente com as informações ambientais (Philips et al., 2006).

O cálculo do índice AUC e o teste estatístico Jackknife foram calculados pelas ferramentas de pós-análise disponíveis no programa Maxent. Este índice é amplamente utilizado para estimar a precisão preditiva de modelos distributivos derivados a partir de dados de presença de espécies. Ou seja, mede a capacidade de um modelo em selecionar locais de ocorrência de uma espécie versus aqueles onde a mesma encontra-se ausente (Bunger et al. 2016; Bueno et al. 2017).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para obter as respostas que se objetivava no trabalho fez o uso de 20 variáveis, e do conjunto 419 amostras, como supracitado, para criar um modelo de dispersão atual da espécie, a partir da localização e das variáveis, foi possível uma representação do modelo Maxent para *Eremanthus_erythropappus*. No qual, as cores mais quentes mostram áreas com melhores condições previstas. Os pontos brancos mostram os locais de presença usados para treinamento (Figura 2).

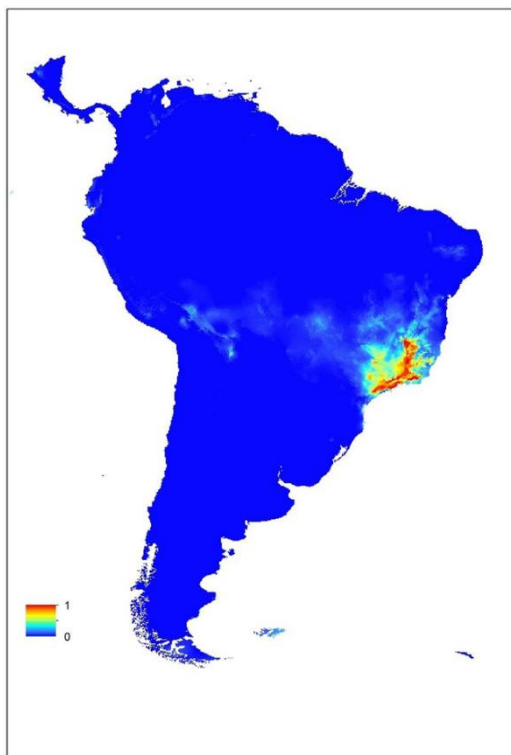
Figura 2 - Modelo de dispersão *EREMANTHUS ERYTHROPAPPUS* com pontos de treinamento



Fonte: Autor

Criou-se assim um modelo de dispersão onde as cores quentes revelam as áreas com melhores condições bioclimáticas para a presença da Candeia. A espécie *Eremanthus erythropappus* apresentou áreas amplas de adequabilidade ambiental no território sulamericano, porém áreas quase que restritas ao Brasil, mais precisamente e com mais força em Minas Gerais, São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo, com presença também em Goiás e Brasília e com pequenas porções na Bahia, e em menor grau de dispersão em Pernambuco, em áreas da Bolívia e Paraguai, totalizando uma área de 134,67 km², sendo possível afirmar que ocupam áreas altas, com grande sazonalidade de precipitação e temperatura (figura 3).

Figura 3 - Modelo de Disperção da EREMANTHUS ERYTHROPAPPUS para a América do Sul.



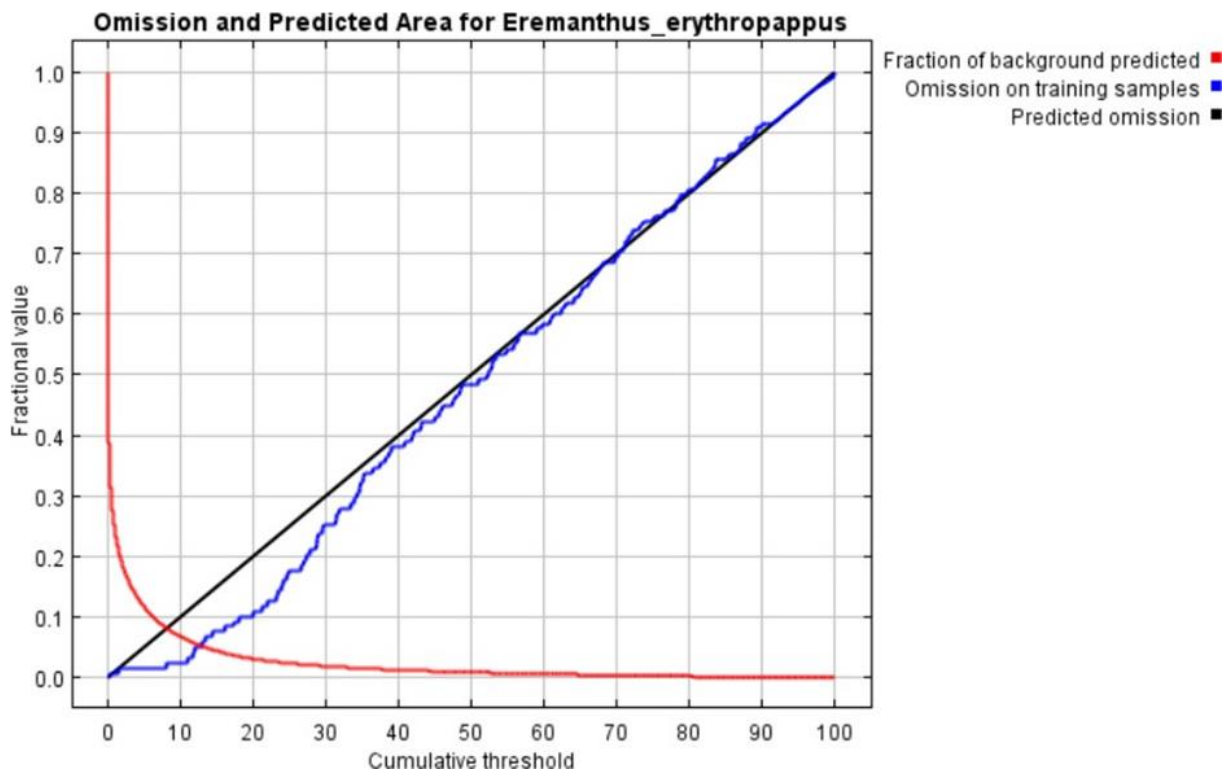
Fonte: Autor

Para o processo de validação do modelo de dispersão, foi feito uma análise de comissão e omissão, A figura 4, mostra a taxa de omissão e a área prevista em função do limite cumulativo. A taxa de omissão é calculada nos registros de presença de treinamento e (se forem usados dados de teste) nos registros de teste. A taxa de omissão deve estar próxima da omissão prevista, devido à definição do limite cumulativo.

Nada mais é que uma análise inicial de exatidão que é a medida mais simples e relaciona os elementos da diagonal com o total de pontos amostrados, no caso das linhas, os valores indicam o número de amostras que, pertencendo a uma determinada categoria, não foram incluídos nela. São os Erros de Omissão, de igual forma os valores nas diagonais das colunas expressam o erros de comissão, isto é, o que não se incluem em uma determinada categoria, pertencente realmente a outra.

Os erros de omissão e comissão enfocam o mesmo problema. A omissão se refere a uma definição imperfeita da categoria e a comissão se refere a uma delimitação excessiva da categoria. Neste caso, traz um valor de comissão superior a 70%, sendo usado neste trabalho valores de omissão de 30%.

Figura 4 - Erros de Omissão e Comissão



Fonte: Autor

O modelo foi validado através do índice de Receiver Operating Characteristic (ROC), uma ferramenta poderosa para medir e especificar problemas no desempenho de dados, variáveis, e análises. Esta análise por meio de um método gráfico simples e robusto, permite estudar a variação da sensibilidade e especificidade, para diferentes valores de variáveis.

Como supracitado, a validação será realizada principalmente por meio da análise ROC, através da geração das curvas de taxa de predição e taxa de sucesso. As curvas ROC são gráficos bidimensionais que são úteis para organizar classificadores e visualizar seu desempenho (Fawcett 2006).

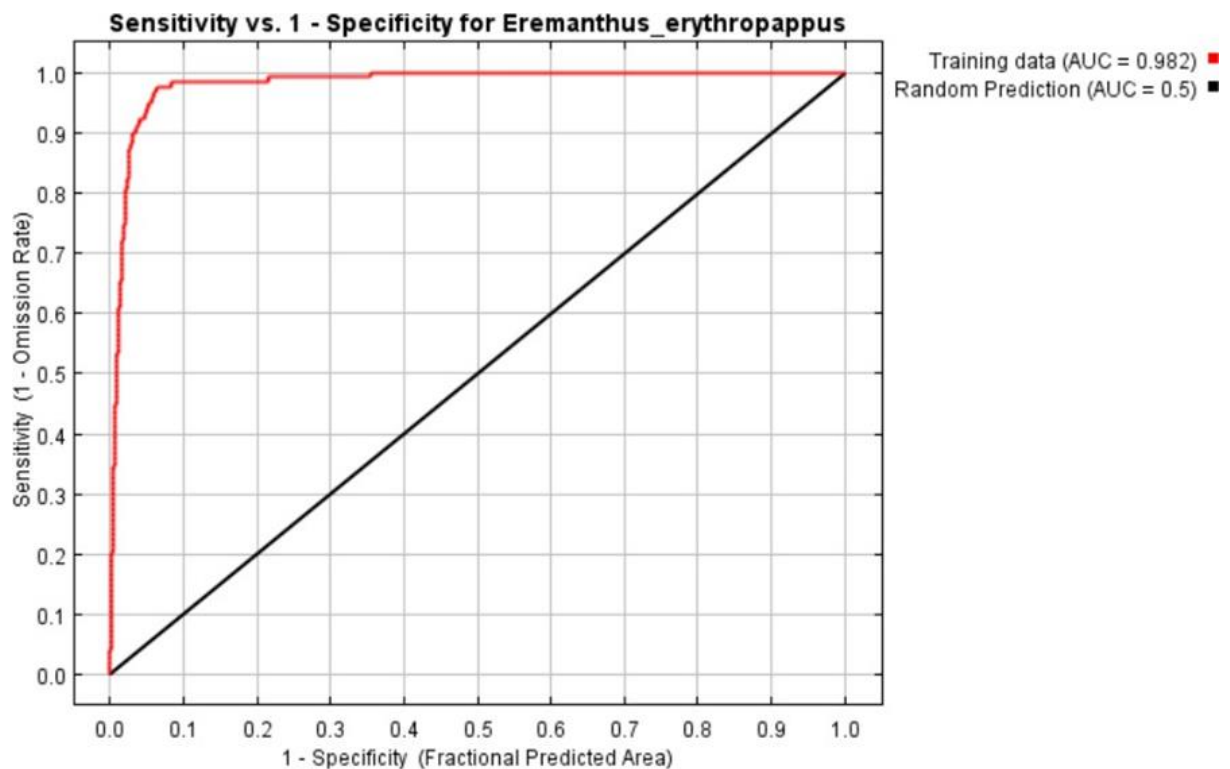
A curva de taxa de previsão é criada usando as áreas de análise em conjunto com os dados bioclimáticos dentro de um conjunto de dados amostrais de validação (30% do total de pixels de todo o inventário florístico) que não foi empregado para a geração do mapa de dispersão. Basicamente consiste em traçar as porcentagens cumulativas das áreas de Candeias dos dados de validação na barra y e as porcentagens cumulativas das áreas de suscetibilidade a presença de candeias dispostas do maior para o menor valor na barra x. A curva de taxa de sucesso foi criada da mesma forma, mas usando as áreas de candeia do conjunto de dados de treinamento. Como o método da taxa de sucesso utilizou os

pixels de treinamento que já foram usados para construir o mapa de suscetibilidade, a taxa de sucesso não é adequada para avaliar a capacidade de previsão dos modelos.

Em segundo lugar, a área sob as curvas ROC, as áreas abaixo da curva (AUC), das curvas de taxa de sucesso e de previsão será calculada. O valor AUC é normalmente usado para avaliar a precisão do método de suscetibilidade ao longo de uma medida geral de preditividade e varia de 0,5 - representado pela linha diagonal, significando um modelo aleatório impreciso - até 1,0, representando um modelo ideal de ajuste perfeito (Fawcett 2006).

Neste caso, a curva ROC para os dados do registros de presença de treinamento foi definida usando a área prevista, em vez de comissão verdadeira. Isso implicou em uma AUC de 0,982, ou seja com um padrão de exatidão de 98,2% (Figura 5).

Figura 5 - Curva AUC do Modelo de Dispersão Atual



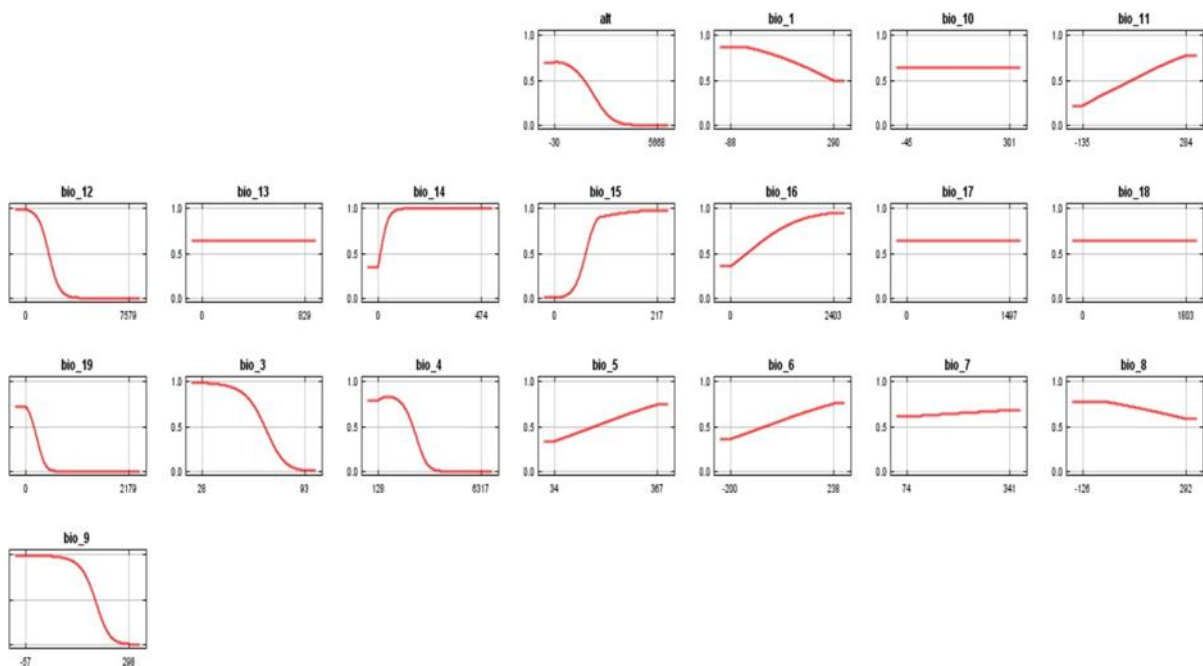
Fonte: Autor

Posteriormente, ao modelo de dispersão da espécie, foi feita uma análise das variáveis ambientais, o quanto cada variável impacta na construção do modelo, o quanto cada variável afeta e contribui para a análise da dispersão. Senso assim foram geradas curvas de respostas, para cada variável analisada.

Essas curvas mostram como cada variável ambiental afeta a previsão Maxent. As curvas mostram como a previsão logística muda à medida que cada variável ambiental é variada, mantendo todas as outras variáveis ambientais em seu valor amostral médio.

Sendo possível observar que as curvas podem ser difíceis de interpretar se houver variáveis fortemente correlacionadas, pois o modelo pode depender das correlações de maneiras que não são evidentes nas curvas. Em outras palavras, as curvas mostram o efeito marginal de mudar exatamente uma variável, enquanto o modelo pode tirar vantagem de conjuntos de variáveis mudando juntas (Figura 6).

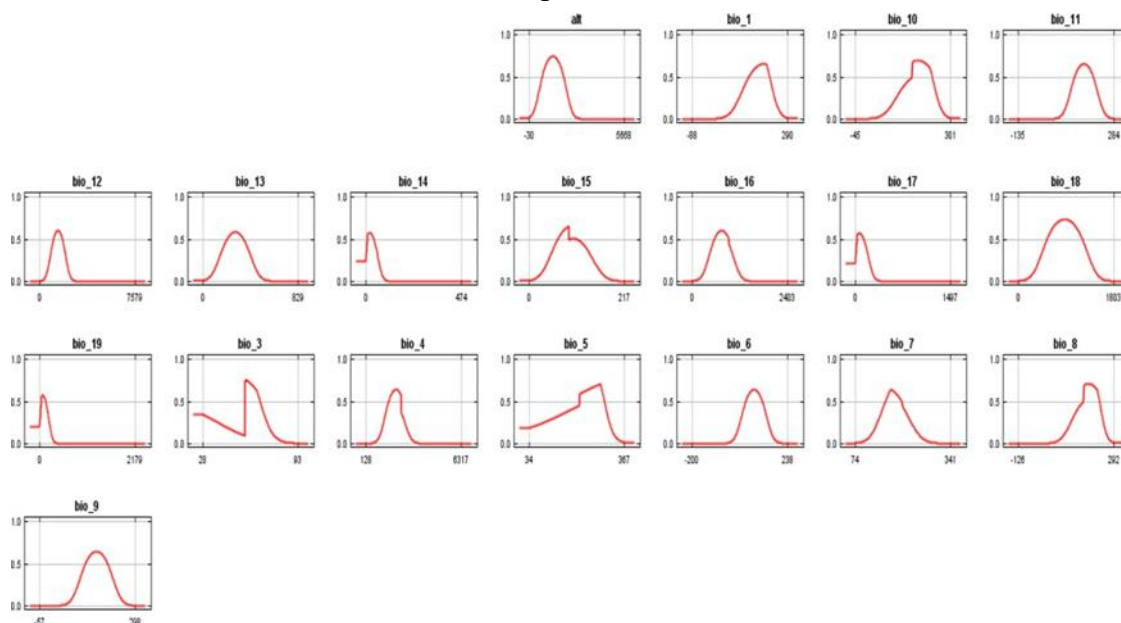
Figura 6 - Curvas de Respostas das variáveis do Modelo de dispersão



Fonte: Autor

Em contraste com as curvas de resposta marginal acima, cada uma das curvas a seguir na figura 7, representa um modelo diferente, ou seja, um modelo Maxent criado usando apenas a variável correspondente. Esses gráficos refletem a dependência da adequação prevista tanto na variável selecionada quanto nas dependências induzidas por correlações entre a variável selecionada e outras variáveis. Eles podem ser mais fáceis de interpretar se houver fortes correlações entre as variáveis.

Figura 7 - Curvas de tendência da variáveis de dispersão do Modelo de dispersão



Fonte: Autor

Diante dos resultados foram possíveis estabelecer as contribuições das variáveis, a tabela 2, fornece estimativas de contribuições relativas das variáveis ambientais para o modelo Maxent. Para determinar a primeira estimativa, em cada iteração do algoritmo de treinamento, o aumento do ganho regularizado é somado à contribuição da variável correspondente, ou subtraído dela se a mudança no valor absoluto de lambda for negativa.

Tabela 2 - Contribuições das Variáveis do Modelo de Dispersão

Variável	Contribuição percentual	Importância da permutação
bio_18	19,6	0
bio_4	18,3	21,8
bio_15	15,9	9,6
alt	8,1	2,9
bio_19	7,3	20,8
bio_5	4,8	0,1
bio_7	3,8	0
bio_3	1,4	5,7
bio_13	1,4	0
bio_9	1,1	15,4

Variável	Contribuição percentual	Importância da permutação
bio_16	1	0,3
bio_11	0,6	0,5
bio_12	0,4	7.4
bio_10	0,4	0
bio_14	0,3	6.6
bio_1	0,3	0,1
bio_6	0,1	0,2
bio_8	0,1	0,1
bio_17	0	0

Fonte: Autor

Para a segunda estimativa, para cada variável ambiental por sua vez, os valores dessa variável na presença de treinamento e dados de fundo são permutados aleatoriamente. O modelo é reavaliado nos dados permutados, e a queda resultante na AUC de treinamento é mostrada na tabela, normalizada em porcentagens.

Para um melhor ajuste foi usado também a variável jackknife, onde as contribuições das variáveis foram interpretadas com cautela quando as variáveis preditoras foram correlacionadas.

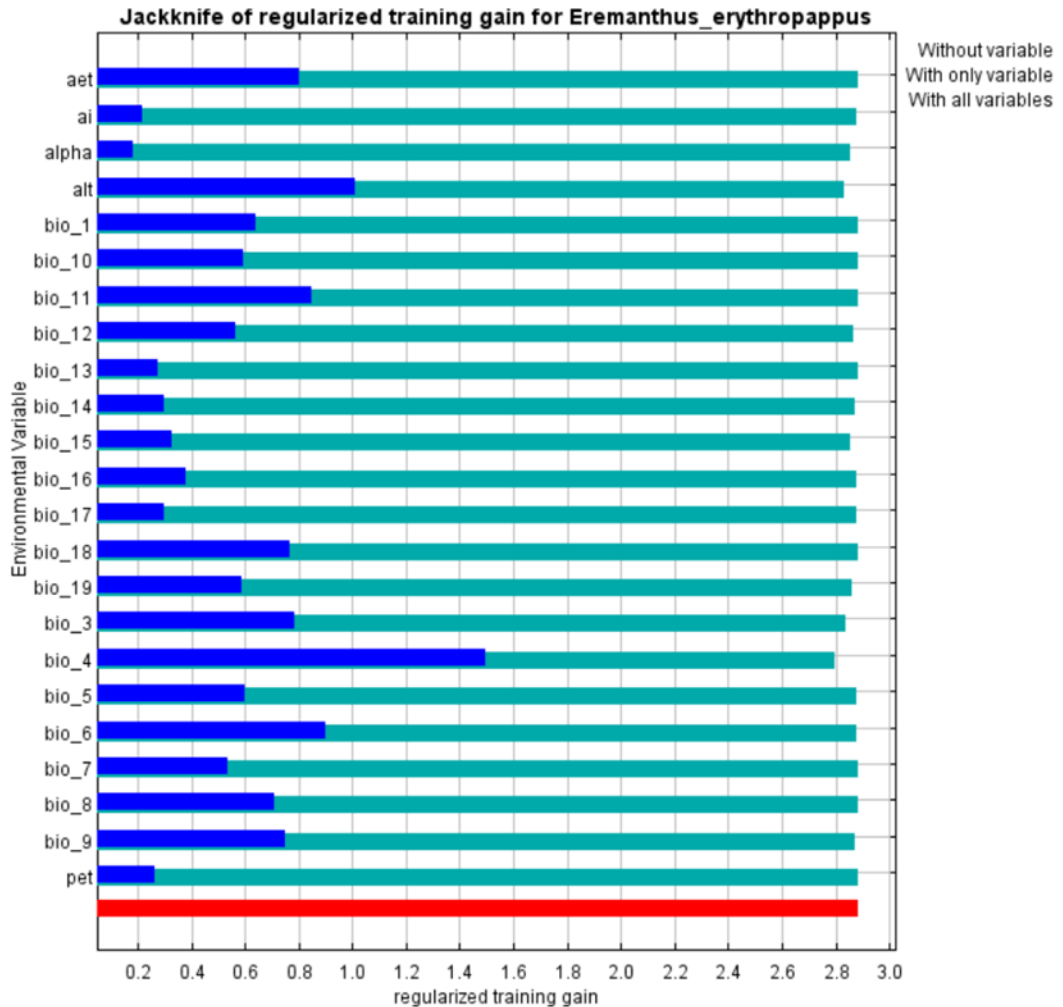
A figura 8, mostra os resultados do teste jackknife de importância das variáveis. A variável ambiental com maior ganho quando usada isoladamente é bio_4, que, portanto, parece ter a informação mais útil por si só. A variável ambiental que mais diminui o ganho quando omitida é também a bio_4, que, portanto, parece ter mais informações que não estão presentes nas outras variáveis.

Com as análises estabelecidas, foi possível selecionar as que mais tiveram impactos na análise, e assim serem usadas para estabelecer um modelo preditivo de áreas promissoras para dispersão da Candeia.

Para serem utilizadas no novo modelo foram selecionadas e variáveis, a Sazonalidade da Temperatura (Bio 4), a Precipitação do trimestre mais frio (Bio 19) e a Temperatura média do trimestre mais seco (Bio 9), como apresentado na tabela 2. A Bio 4, referente a sazonalidade da Temperatura, é a que mais diminui o ganho quando é omitida. Isto parece, portanto, que essa possui a maioria das informações presentes em relação às outras variáveis, sendo relevante para explicar a distribuição das espécies.

Assim, com estas 3 variáveis foi criado o modelo de predição de áreas com melhores condições bioclimáticas para a espécie em estudo.

Figura 8 - Análise Jackknife



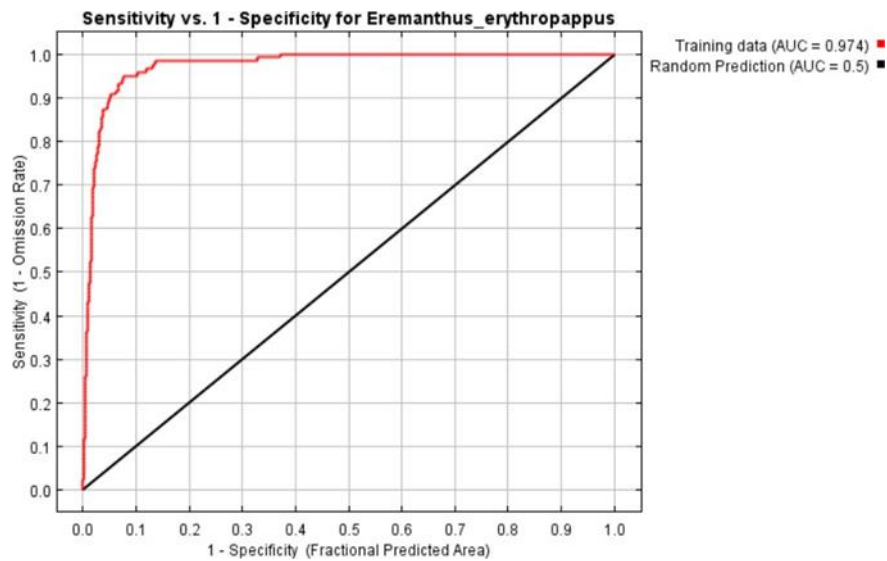
Fonte: Autor

Validação Final do Modelo

A qualidade do modelo para a distribuição potencial da *Eremanthus erythropappus*, de acordo com o índice de acurácia AUC (0,974), para o território da América do Sul foi compatível com os registros de ocorrência da espécie e a distribuição obtida, indicando que o modelo mostrou um bom desempenho na distinção de ocorrência de espécie relacionada com variáveis ambientais selecionadas (Metz, 1986). (Figura 9)

O período analisado demonstrou um bom desempenho do modelo, uma vez que os valores de AUC indicam a qualidade do modelo e podem ser classificados como excelente (1,0 – 0,9), bom (0,9 - 0,8), médio (0,8 - 0,7), ruim (0,7 - 0,6) e muito ruim (0,6 - 0,5) (Metz, 1986).

Figura 9 – Curva AUC do Modelo de Dispersão Potencial



Fonte: Autor

Valores de AUC mais próximos de 1 representa os locais de probabilidade de máxima entropia e são as áreas com nicho ecológico mais provável para a ocorrência da espécie de acordo com as variáveis utilizadas no modelo (Phillips et al., 2006). Coelho et al. (2016).

O que pode diminuir a chance de erro na tentativa de introduzir a espécie no ambiente ou buscar novas populações. Portanto, a avaliação pelo AUC foi excelente, visto que o desempenho do modelo pela AUC pode ser útil quando se comparam modelos de uma única espécie em um domínio geográfico semelhante (Moura et al., 2017).

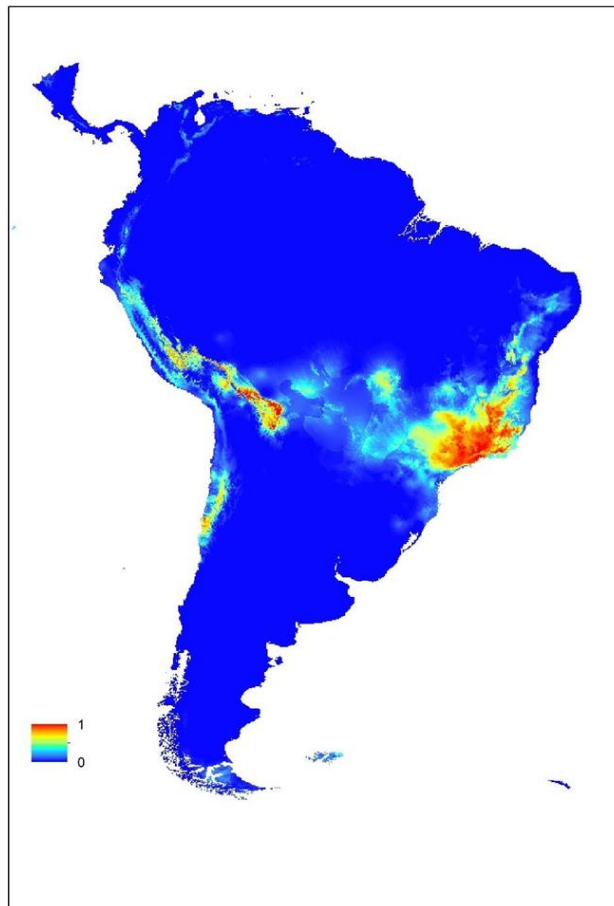
Mapas de predição das espécies

A partir dos resultados da modelagem projetou-se a ocorrência da espécie *Eremanthus erythropappus* no continente sulamericano para o período atual (Figura 10). Quanto mais alta a ocorrência, maior a adequabilidade ambiental da espécie. trabalhando com a modelagem de nicho ecológico e conservação de *Richeria grandis* verificaram variáveis ambientais mais limitantes e ambientes com condições propícias para ocorrência da espécie, determinando portanto os fatores climáticos importantes para a ocorrência, bem como seus limites de tolerância.

Além disso, a modelagem preditiva apresentou maior intensidade de adequação na mesma região onde se localizam os dados de ocorrência da espécie. Foi possível

determinar áreas como ja dito, no sudeste brasileiro, confirmada pelo modelo anterior, bem como áreas no norte de Pernambuco, na Chapada Diamantina na Bahia, bem como na área do cerrado no centro-oeste brasileiro, além das áreas pantaneiras de chacos paraguaios e bolivianos, o modelo ainda indicou como área potencial algumas áreas Andinas, presente mais foretmente no Peru e Chile, com um corredor um pouco mais fraco, com menos intensidade, se estendendo pelas montanhas do Equador, Colombia e Venezuela, havendo ainda alguns hotspot nas ilhas de Galápagos e das Malvinas. Fortalecendo a ideia inicial de áreas altas com grande sazonalidade de precipitação e temperatura.

Figura 10 - Modelo Potencial de Distribuição EREMANTHUS ERYTHROPAPPUS



Fonte: Autor

Avaliação dos modelos e a importância das variáveis ambientais

A literatura atual, tem usado modelos para entender a dispersão de espécies, para propor corredores ecológicos bem como, encontrar lugares como características geográficas para inserção de espécies, ou criação de domínios. Por exemplo, utilizando também a ferramenta de modelagem da distribuição geográfica, Pontes e Alves (2011)

buscando tratar da distribuição geográfica das espécies de Araceae ocorrentes em fragmentos de Mata Atlântica ao norte de Pernambuco, relacionando sua ocorrência aos seus respectivos hábitos e condições macro-ambientais, verificaram eficácia no uso da modelagem, uma vez que observaram o predomínio de espécies com distribuição disjunta sobre as de distribuição contínua e que o hábito hemiepifítico predominou em regiões úmidas e quentes, enquanto as geófitas ocorreram ainda em climas secos e/ou frios, e ainda que os “brejos de altitudes” nordestinos demonstraram ser áreas importantes para estudos biogeográficos com a família.

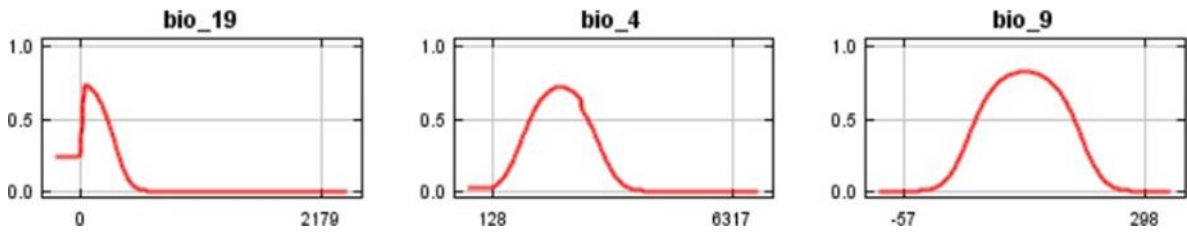
Souza (2011), considerando a importância do conhecimento sobre a distribuição de espécies vegetais em matas ciliares da Chapada Diamantina e a importância de modelos preditivos no estudo de questões ecológicas e biogeográficas, realizou a modelagem da distribuição geográfica potencial de 10 espécies vegetais arbóreas indicadoras de matas ciliares desta região, no estado da Bahia, e verificando que os resultados encontrados reforçam a importância dos modelos preditivos no estudo da distribuição de espécies, sugerindo que a modelagem de nicho ecológico pode fornecer importantes contribuições para a análise de padrões biogeográficos relacionados à distribuição da flora relictual de matas ciliares, ressaltando que modelos apresentados no estudo possam subsidiar futuras pesquisas ecológicas e fitogeográficas no estado da Bahia, contribuindo no planejamento de ações e estratégias para a conservação da flora regional. Os pontos de presença foram sobrepostos às áreas de ocorrência previstas para avaliar o desempenho dos modelos

Os resultados processados e analisado aqui, cancelados pela literatura, sugerem que o programa Maxent apresentou um alto poder preditivo, considerando os dados utilizados no presente estudo. Porém contraria alguns estudos que relatam que os valores de AUC tendem a ser menores para espécies que possuem uma distribuição mais ampla (Yang et al., 2013).

Devido a particularidade deste teste estatístico, os valores tendem a ser maiores para as espécies com variações ambientais mais limitadas, o que geralmente não significa que os modelos são melhores (Phillips; Dudik, 2008). Dentre as variáveis ambientais utilizadas na modelagem da distribuição potencial deste estudo, Bio 4 foi a variável que mais influenciou a modelagem da candeia, sendo encontrada particularmente nos Campos de Altitude (Oliveirafilho; Fluminhan-Filho, 1999). Outras variáveis que mais influenciaram o modelo foram: a Bio 9, a Bio 19, respectivamente.

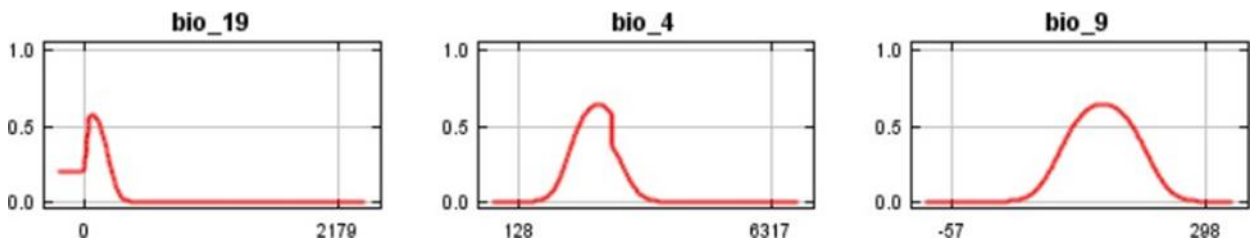
A Bio 4, apresentou uma importância de cerca de 43% dentro do modelo potencial, as demais com 28% (Tabela 3) . Como é Possível analisar, através das curvas de respostas (figura 11), das curvas de tendências (figura 12), e da análise jackknife (figura 13).

Figura 11 - Curvas de Respostas das varáveis do Modelo Potencial



Fonte: Autor

Figura 12 - Curvas de tendência das varáveis do Modelo Potencial



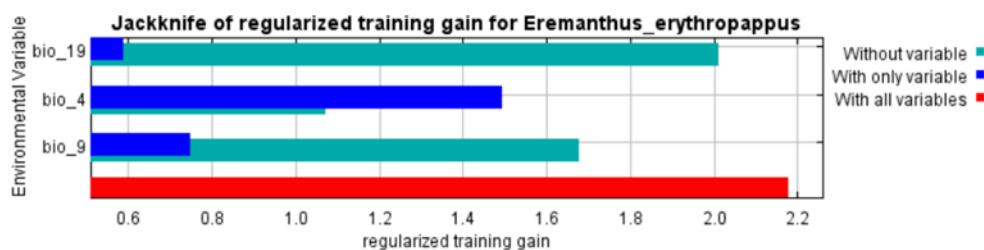
Fonte: Autor

Tabela 3 - Contribuições das Variáveis do Modelo Potencial

Variável	Contribuição percentual	Importância da permutação	Variável
bio_4	61,3	43,7	bio_4
bio_9	26,9	28	bio_9
bio_19	11,7	28,3	bio_19

Fonte: Autor

Figura 13- Análise Jackknife das variáveis do Modelo Potencial



Fonte: Autor

Ao analisar os resultados a modelagem ecológica da distribuição da Candeia revelou as áreas de alta adequabilidade ambiental para a sua espécie, com robustez e alto índice de certeza, isso reforça a importância das ferramentas de modelagem ecológica na

identificação de habitats potenciais e na antecipação de mudanças na distribuição das espécies devido a variações ambientais e climáticas. Esta abordagem é essencial para entender e prever a distribuição de espécies, permitindo uma gestão e manejo ecológico mais eficazes.

A Candeia, apesar de sua importância ecológica e econômica, apresenta um poder invasivo significativo, que acaba alterando a composição vegetal nativa e comprometendo a biodiversidade local. Essa invasão pode causar desastres ecológicos, ao deslocar espécies nativas e modificar ecossistemas inteiros. Além disso, a sua dominância pode impactar negativamente a agricultura, competindo por recursos essenciais e reduzindo a produtividade de culturas economicamente relevantes. A utilização da modelagem para prever a distribuição de espécies é fundamental para a implementação de estratégias de manejo eficazes, identificando as áreas de alta adequabilidade ambiental permite uma gestão ambiental preventiva para controlar a expansão da espécie, mitigando seus impactos negativos, podendo identificar também áreas potenciais para a reintrodução de espécies nativas e a criação de corredores ecológicos, é possível promover a recuperação de habitats degradados e a manutenção da biodiversidade .

CONCLUSÕES

O presente estudo utilizou o modelo Maxent para mapear a distribuição atual de *Eremanthus erythropappus* na América do Sul, empregando 20 variáveis ambientais e um conjunto de 419 amostras. Os resultados indicam que a candeia apresenta áreas amplas de adequabilidade ambiental, principalmente no Brasil, com destaque para os estados de Minas Gerais, São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo. A espécie também é encontrada em áreas menores na Bolívia e Paraguai, evidenciando uma preferência por ambientes de altitude com alta sazonalidade de precipitação e temperatura.

O modelo de dispersão gerado demonstrou áreas com melhores condições bioclimáticas para a espécie, e a validação através da curva ROC revelou uma excelente acurácia do modelo, com um valor AUC de 0,982. Isso confirma que o modelo é robusto e eficiente na previsão das áreas potenciais de ocorrência da candeia.

A análise das variáveis ambientais mostrou que a sazonalidade da temperatura (Bio 4), a precipitação do trimestre mais frio (Bio 19) e a temperatura média do trimestre mais seco (Bio 9) foram as mais influentes na modelagem. A variável Bio 4, em particular, teve o maior impacto na adequabilidade ambiental, refletindo a importância das condições climáticas específicas para a distribuição da espécie.

Além de fornecer uma representação visual detalhada das áreas de adequabilidade ambiental, o estudo oferece informações valiosas para estratégias de manejo e conservação. A modelagem preditiva da distribuição da candeia pode auxiliar na identificação de áreas prioritárias para a conservação, manejo sustentável e restauração de ecossistemas, além de apoiar a exploração econômica da espécie de forma equilibrada.

A modelagem de distribuição de espécies é uma ferramenta crucial em ecologia, biogeografia e conservação, utilizada para prever a distribuição potencial de espécies no espaço e no tempo.

O sucesso da modelagem também ressalta a importância de continuar a utilização de ferramentas como o Maxent na compreensão da distribuição de espécies vegetais. O uso do Maxent na modelagem de distribuição de espécies de plantas oferece uma abordagem poderosa e eficiente para entender e prever a distribuição de espécies.

Isso é fundamental para estratégias de conservação, manejo de habitats e estudos ecológicos em geral. Com a crescente disponibilidade de dados de ocorrência e ambientais, as ferramentas como Maxent continuarão a ser essenciais na ecologia e biogeografia modernas.

O estudo contribui para a base de dados ecológicos e biogeográficos, fornecendo uma base sólida para futuras pesquisas e ações de conservação que visam proteger a biodiversidade e promover o uso sustentável dos recursos naturais na América do Sul.

REFERÊNCIAS

Amaral, C.S.; Silva, E. B.; Pereira, I.M.; Nardis, B.O.; Gonçalves, N.H.; Amaral, W.G. Crescimento da candeia pela adubação mineral e orgânica em rejeito da mineração de quartzito. *Floresta*, v.44, n.3, p.421-430, 2014.

Araújo, L.C. *Vanillosmopsis erythropappa* (DC) Sch.Bip: sua exploração florestal. Rio de Janeiro: Escola Nacional de Agronomia, 1944. 58p.

Atlas Mundial. São Paulo: Melhoramentos. 1999. ISBN 85-06-02889-2

Bueno, M. L.; Pontana, V.; Neves, D. M.; Ratter, J. A.; Oliveira-Filho, A. T. Effects of Quaternary climatic fluctuations on the distribution of Neotropical savanna tree species. *Ecography*, v. 40, n. 403-414, 2017.

Bunger, M. O.; Mazine, F. F.; Forest, F.; Bueno, M. L.; Stehmann, J. R.; Lucas, E. J. The evolutionary history of *Eugenia* sect. *Phyllocalyx* (Myrtaceae) corroborates historically stable areas in the southern Atlantic forests. *Annals of Botany*, v. 118, n. 1209-1223, 2016.

- Carvalho, P.E.R. Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidade e uso da madeira. Brasília: EMBRAPA-CNPQ, 1994. 640p.
- Chaves, M.M.F.; Ramalho, R.S. Estudos morfológicos em sementes, plântulas e mudas de duas espécies arbóreas pioneiras da família Asteraceae (*Vanillosmopsis erythropappa* Schult. Bip. e *Vernonia discolor* (Spreng-Kess). *Revista Árvore*, Viçosa: MG, v.20, n.1, p.1-7, jan./mar.1996.
- Coelho, G.L.N.; Carvalho, L.M.T.; Gomide, L.R. Modelagem preditiva de distribuição de espécies pioneiras no Estado de Minas Gerais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.51, n.3, p.207-214, 2016.
- Correa, M.P. Dicionário de plantas úteis do Brasil. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, 1931. v.1, p.431-433.
- Elith, J., Kearney, M., & Phillips, S. "The art of modelling range-shifting species". *Methods in Ecology and Evolution*, 1(4), 330-342, 2011.
- Fawcett, T. An introduction to ROC analysis. *Pattern Recogn. Lett.* 2006, 27, 861–874.
- Ferraro, J.L.S. Análise de conteúdo sobre o conceito de nicho ecológico: o que dizem os livros didáticos? *Revista de Ensino de Ciências e Matemática*, v.8, n.5, 35-50, 2017.
- Gomide, L.R.; Acerbi, F.W. JR.; Scolforo, J.R.S.; Mello, J.M.; Oliveira, A.D.; Carvalho, L.M.T.; Calegario, N.; Ferraz-Filho, A.C. Sustainable forest management of native vegetation remnants in Brazil. In: Martin-Garcia J, Javier Diez J, editors. *Sustainable forest management: case studies*. Rijeka: InTech; 2012.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. "Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas". *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965-1978, 2005.
- Metz, C.E. ROC methodology in radiologic imaging. *Investigational Radiology*. v. 21, p. 720-733, sep. 1986.
- Moura, C.C.; Costa, T.R.; Oliveira, P.A.; Bueno, M.L.; Machado, E.L.M. Modelo preditivo do potencial de distribuição geográfica da espécie *Richeria grandis* vahl. no estado de Minas Gerais e sua relação com as flutuações climáticas do Quaternário. *Enciclopédia Biosfera*, v.14, n.25, p.911-923, 2017.
- Oliveira-Filho, A.T.; Fluminhan-Filho, M. Ecologia da vegetação do Parque Florestal Quedas do Rio Bonito. *Cerne* v.5, n.2, p.51-64. 1999.
- Ortega-Huerta, M. A., & Peterson, A. T. "Modeling ecological niches and predicting geographic distributions: a test of six presence-only methods". *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 79, 205-216, 2008.
- Phillips, S. J.; Anderson, R. P.; Schapire, R. E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, v. 190, n. 3-4, p. 231–259, 2006.

- Phillips, S. J.; Dudik, M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, v. 31, p.161-175, 2008.
- Pearson, R. G., Raxworthy, C. J., Nakamura, M., & Townsend Peterson, A. "Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar". *Journal of Biogeography*, 34(1), 102-117, 2007.
- Pontes, T. A.; Alves, M.. Padrões de distribuição geográfica das espécies de Araceae ocorrentes em fragmentos de floresta atlântica em Pernambuco, Brasil. *Revista Brasileira de Biociências*. Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 444-454, out./dez. 2011.
- Santos, N.O.; Mariane, B.; Lago, J.H.G.; Sartorelli, P.; Rosa, W.; Soares, M.G.; Silva, A.M.; Lorenzi, H.; Vallin, M.A.; Pascon, R.C. Assessing the chemical composition and antimicrobial activity of essential oils from Brazilian plants—*Eremanthus erythropappus* (Asteraceae), *Plectrants barbatus*, and *P. ENCICLOPÉDIA BIOSFERA*, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.15 n.28; p. 2018 686 *amboinicus* (Lamiaceae). *Molecules*, v.20, p. 8440-8452; 2015.
- Schenoni, L. L. «The Brazilian Rise and the Elusive South American Balance». Rochester, 2015 in NY: Social Science Research Network.
- Silva, D. P. et al. Using ecological niche models and niche analyses to understand speciation patterns: The Case of Sister Neotropical Orchid Bees. *PLoS ONE*, v. 9, n. 11, p. 1-17, 2014.
- Souza, H.J. Modelando a distribuição geográfica potencial de espécies vegetais arbóreas indicadoras de matas ciliares da chapada diamantina, Bahia, Brasil. *Candombá – Revista Virtual*, v. 7, n. 1, p. 65-75, jan-dez 2011.
- Teixeira, M.C.B.; Nunes, Y.R.F.; Maia, K.M.P.; Ribeiro, R.N. Influência da luz na germinação de sementes de candeia (*Vanillosmopsis erythropappa* Shuh. Bip.). In: *ENCONTRO REGIONAL DE BOTÂNICA*, 28., 1996, Belo Horizonte. Anais ... Belo Horizonte: SBB. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 1996. p.35-41.
- Thuiller, W., Lavorel, S., Araújo, M. B., Sykes, M. T., & Prentice, I. C. "Climate change threats to plant diversity in Europe". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(23), 8245-8250, 2005.
- Yang, X. Q.; Kushwaha, S. P. S.; Saran, S.; Xu, J. C.; Roy, P. S. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills. *Ecological Engineering*, v. 51, p.83-87, 2013.
- Wiens, J. J., Graham, C. H., & Moen, D. S. "Phylogenetic niche conservatism: Integrating evolution, ecology, and conservation biology". *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40, 519-539, 2009.