



Áreas de Distribuição de Cucurbitáceas em Território Brasileiro em Cenários de Mudança Climática

Cucurbits Distribution Areas in Brazilian Territory in Climate Change Scenarios

Áreas de Distribución de Cucurbitáceas en Territorio Brasileño en Escenarios de Cambio Climático

Lohan de Souza Soares¹
Caroline de Souza Bezerra²
Jennifer Souza Tomaz³
Maria Teresa Gomes Lopes⁴
Maria José Marques⁵
Ricardo Lopes⁶
Carlos Henrique Salvino Gadelha Meneses⁷
Samuel Freitas de Souza⁸
Santiago Linorio Ferreyra Ramos⁹
Therezinha de Jesus Pinto Fraxe¹⁰

¹ Graduado em Agronomia. Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Manaus, Amazonas, Brasil.
E-mail: soaresilohan@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0009-0001-1134-7574>

² Doutora em Agronomia Tropical. Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Manaus, Amazonas, Brasil.
E-mail: caroline.bezerra@ufam.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0380-4181>

³ Doutora em Agronomia Tropical. Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Manaus, Amazonas, Brasil.
E-mail: jennifer.tomaz@ufam.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6612-2172>

⁴ Doutora em Agronomia (Genética e Melhoramento de Plantas). Universidade Federal do Amazonas (UFAM).
Manaus, Amazonas, Brasil. E-mail: mtglopes@ufam.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1988-7126>

⁵ Doutora em Agronomia Tropical. Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Manaus, Amazonas, Brasil.
E-mail: marquesfjm@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9399-8727>

⁶ Doutor em Agronomia (Genética e Melhoramento de Plantas). Embrapa Amazônia Ocidental. Manaus,
Amazonas, Brasil. E-mail: ricardo.lopes@embrapa.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5559-9685>

⁷ Doutor em Biotecnologia Vegetal e Bioprocessos. Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências
Biológicas e da Saúde. Campina Grande, Paraíba, Brasil. E-mail: carlos.meneses@servidor.uepb.edu.br
Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8394-1305>

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

⁹ Doutor em Agronomia (Genética e Melhoramento de Plantas). Universidade Federal do Amazonas (UFAM).
Manaus, Amazonas, Brasil. E-mail: slfr@ufam.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0364-316X>

¹⁰ Doutora em Sociologia. Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Manaus, Amazonas, Brasil.
E-mail: tecafraxe@uol.com.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9974-2140>





Resumo

Considerando a crescente vulnerabilidade das espécies cultivadas às mudanças climáticas globais, as abóboras *Cucurbita moschata* e *Cucurbita maxima*, da família Cucurbitaceae, destacam-se por sua relevância agronômica, nutricional e sociocultural no Brasil, sendo amplamente cultivadas por agricultores familiares e essenciais à segurança alimentar e à conservação da agrobiodiversidade. O objetivo do trabalho foi modelar a distribuição potencial dessas espécies em território brasileiro sob cenários climáticos atuais e futuros, visando subsidiar estratégias de conservação e cultivos sustentáveis. Para tanto, procede-se à modelagem de nicho ecológico (ENM) com base em 84 registros georreferenciados e 33 variáveis ambientais, 19 bioclimáticas e 14 edáficas, reduzidas por Análise de Componentes Principais (PCA), retendo eixos que explicaram mais de 95% da variância ambiental. Desse modo, observa-se que *C. maxima* apresentou ampla adequabilidade ambiental e maior resiliência às mudanças climáticas, com plantios em áreas que coincide com os diversos domínios fitogeográficos, como áreas da Amazônia, Mata Atlântica e Pampa, enquanto *C. moschata* revelou distribuição mais restrita e sensibilidade elevada às variações de temperatura e precipitação, com significativa redução de áreas adequadas, especialmente em áreas do Cerrado, Pantanal e Caatinga. As projeções até 2.100 indicam perdas expressivas de habitats adequados, caso as emissões de gases de efeito estufa permaneçam elevadas, o que permite concluir que a conservação in situ e ex situ, o fortalecimento de bancos de germoplasma e o incentivo a programas participativos de melhoramento são ações necessárias para promover a resiliência agroecológica e a segurança alimentar.

Palavras-chave: Abóbora. Mudança Climática. Modelagem de Nicho Ecológico. Conservação Vegetal.

Abstract

Considering the growing vulnerability of cultivated species to global climate change, the pumpkins *Cucurbita moschata* and *Cucurbita maxima*, from the family Cucurbitaceae, stand out for their agronomic, nutritional, and sociocultural relevance in Brazil, being widely cultivated by family farmers and essential to food security and conservation of agrobiodiversity. The objective of this work was to model the potential distribution of these species in Brazilian territory under current and future climate scenarios, aiming to subsidize conservation strategies and sustainable crops. Therefore, ecological niche modeling (ENM) is performed based on 84 georeferenced records and 33 environmental variables, 19 bioclimatic





and 14 edaphic, reduced by Principal Component Analysis (PCA), removing axes that explained more than 95% of the environmental variance. Thus, it is observed that *C. maxima* presented wide environmental adequacy and greater resilience to climate change, with plantations in areas that coincide with the various phytogeographical domains, such as areas of the Amazon, Atlantic Forest, and Pampa, while *C. moschata* revealed a more restricted distribution and high sensitivity to temperature and precipitation variations, with a significant reduction of suitable areas, especially in Cerrado, Pantanal, and Caatinga areas. Projections up to 2,100 indicate significant losses of suitable habitats if greenhouse gas emissions remain high, which allows us to conclude that in situ and ex situ conservation, strengthening germplasm banks, and encouraging participatory breeding programs are necessary actions to promote agroecological resilience and food security.

Keywords: Pumpkin. Climate Change. Ecological Niche Modeling. Plant Conservation.

Resumen

Considerando la creciente vulnerabilidad de las especies cultivadas al cambio climático global, las calabazas *Cucurbita moschata* y *Cucurbita maxima*, de la familia Cucurbitaceae, destacan por su relevancia agronómica, nutricional y sociocultural en Brasil, siendo ampliamente cultivadas por agricultores familiares y esenciales para la seguridad alimentaria y la conservación de la agrobiodiversidad. El objetivo del trabajo fue modelar la distribución potencial de estas especies en territorio brasileño bajo escenarios climáticos actuales y futuros, con el fin de subsidiar estrategias de conservación y cultivos sostenibles. Para ello, se procede al modelado de nicho ecológico (ENM) sobre la base de 84 registros georreferenciados y 33 variables ambientales, 19 bioclimáticas y 14 edáficas, reducidas por Análisis de Componentes Principales (PCA), reteniendo ejes que explicaron más del 95% de la varianza ambiental. De esta manera, se observa que *C. máxima* presentó amplia adecuación ambiental y mayor resiliencia al cambio climático, con plantaciones en áreas que coinciden con los diversos dominios fitogeográficos, como áreas de la Amazonia, Mata Atlántica y Pampa, mientras que *C. moschata* reveló una distribución más restringida y alta sensibilidad a las variaciones de temperatura y precipitación, con significativa reducción de áreas adecuadas, especialmente en áreas del Cerrado, Pantanal y Caatinga. Las proyecciones hasta 2.100 indican pérdidas significativas de hábitats adecuados si las emisiones de gases de efecto invernadero permanecen altas, lo que permite concluir que la conservación in situ y ex situ, El fortalecimiento de los bancos de germoplasma y el fomento de programas participativos de





mejoramiento son acciones necesarias para promover la resiliencia agroecológica y la seguridad alimentaria.

Palabras clave: Calabaza. Cambio Climático. Modelado de Nicho Ecológico. Conservación Vegetal.

Introdução

A mudança climática é um dos principais desafios contemporâneos, afetando diretamente a produção agrícola e a segurança alimentar. O aumento das temperaturas, associado ao desequilíbrio nos regimes de chuva e à intensificação de eventos extremos, tem ampliado a frequência de estresses abióticos nos sistemas produtivos (Bibi & Rahman, 2023). Esses processos reduzem a produtividade das culturas e aumentam a instabilidade dos sistemas alimentares (Cherubin *et al.*, 2024).

No Brasil, país com mais de um terço do território dedicado à agropecuária, os impactos climáticos representam uma ameaça crescente à sustentabilidade produtiva (Santos *et al.*, 2024). Secas, enchentes e ondas de calor têm comprometido cultivos estratégicos, como mandioca, arroz, trigo, cacau e hortaliças sensíveis ao estresse hídrico e térmico, incluindo batata, tomate e abóbora (Bibi & Rahman, 2023; Fiorini *et al.*, 2024). Esses eventos afetam a fertilidade do solo, elevam a salinidade em zonas costeiras e alteram ciclos fenológicos, agravando a vulnerabilidade de sistemas dependentes de chuva e influenciados por El Niño e La Niña (Fattori *et al.*, 2022). Entre as culturas sensíveis às variações ambientais, destacam-se as espécies do gênero *Cucurbita*. Temperatura e umidade influenciam seu desenvolvimento, produtividade e qualidade pós-colheita (Lima *et al.*, 2022; Seka *et al.*, 2023). O aumento da temperatura combinado ao déficit hídrico reduz a fase vegetativa, antecipa a floração e diminui o rendimento de *C. pepo* em condições simuladas de aquecimento (Gambel & Holway, 2024).

Cucurbita moschata Duchesne apresenta elevada adaptabilidade e valor nutricional, com frutos ricos em carotenoides, minerais e compostos bioativos, além de sementes com altos teores de ácidos graxos insaturados e vitamina E (Vanessa *et al.*, 2023; Silva *et al.*, 2025). No Brasil, sua produção chega a 417,8 mil toneladas em 78,7 mil hectares, reforçando sua importância para programas de melhoramento e biofortificação (Silva *et al.*, 2025). Já *C. maxima* é amplamente utilizada na alimentação e na indústria, embora o processamento gere





18%–21% de resíduos, principalmente cascas e sementes. Estas últimas apresentam potencial nutracêutico e farmacêutico por seu alto teor de proteínas, vitaminas, minerais e peptídeos bioativos (Lin *et al.*, 2023).

Diante da intensificação das mudanças climáticas, a modelagem de nicho ecológico (ENM) torna-se ferramenta essencial para orientar zoneamento agrícola, conservação de germoplasma e planejamento de áreas prioritárias de cultivo. A ENM permite estimar a distribuição potencial de espécies com base em variáveis climáticas e edáficas e projetar cenários futuros, identificando áreas estáveis, refúgios climáticos e zonas de risco (Carrillo-García *et al.*, 2023). Suas principais vantagens incluem desempenho robusto com dados de presença, regularização para evitar sobreajuste e métricas padronizadas de validação, favorecendo integração com estratégias de segurança alimentar (Ortiz Cano *et al.*, 2023). Estudos recentes aplicaram esta metodologia para orientar conservação e uso sob alteração de uso da terra agrícola (Almeida *et al.*, 2024; Magalhães *et al.*, 2025). Dessa forma, os dados gerados a partir da modelagem ambiental são essenciais para orientar estratégias de conservação, evitar a erosão genética e contribuir para a segurança alimentar nacional, bem como para o desenvolvimento de programas de melhoramento genético.

Neste sentido, esse trabalho teve como objetivo predizer a distribuição potencial das espécies *Cucurbita moschata* Duchesne e *Cucurbita maxima* Duchesne ex Lam. com base na modelagem de nicho ecológico, de modo a subsidiar a tomada de decisão voltada à conservação de seus recursos genéticos.

Metodologia

As informações geográficas de ocorrência de *Cucurbita moschata* e *C. maxima* foram obtidas em 2025 no Laboratório de Genética e Melhoramento Vegetal (LABGEMVEG/UFAM), reunindo dados de plataformas abertas como SpeciesLink (CRIA, 2025), GBIF (2025) e Reflora, além de coordenadas extraídas de estudos científicos e registros provenientes de coleções da UFAM e do INPA. A integração dessas fontes ampliou a cobertura espacial e a representatividade das espécies. O período de 1970 a 2025 foi selecionado para garantir diversidade temporal e reduzir inconsistências decorrentes de registros mais antigos.

O processamento dos dados foi realizado no R, com o pacote *tidyverse*, removendo duplicatas, coordenadas incorretas e registros sem georreferenciamento (Wickham &





Wickham, 2017; R Core Team, 2025). Para mitigar o viés de amostragem espacial, aplicou-se *spThin*, utilizando 5 km como distância mínima entre ocorrências (Aiello-Lammens *et al.*, 2015). O conjunto filtrado foi então utilizado para gerar camadas de distribuição nos domínios fitogeográficos brasileiros e servir de base para a modelagem da distribuição potencial.

A modelagem utilizou 33 variáveis ambientais, incluindo 19 bioclimáticas do WorldClim v2.1, com resolução de 2,5 minutos (~4 km²), representando tendências anuais, variação sazonal e limites térmicos e pluviométricos (Fick & Hijmans, 2017; Rebello *et al.*, 2023). Também foram incorporadas 14 variáveis edáficas do Harmonized World Soil Database v2.0, contemplando atributos químicos e físicos do solo nas profundidades de 0–20 cm e 20–40 cm (ISRIC, 2024). Duas variáveis topográficas (elevação e declividade) foram obtidas do EarthEnv (ISRIC, 2024). Esses parâmetros representam gradientes climáticos, edáficos e geomorfológicos críticos para a distribuição natural das espécies (Andrade *et al.*, 2020; Morais *et al.*, 2024).

Para reduzir colinearidade e avaliar a contribuição das variáveis, realizou-se Análise de Componentes Principais (PCA), selecionando eixos que explicaram ao menos 95% da variância (De Marco & Nóbrega, 2018). Como não existem projeções futuras de solo com a mesma resolução das projeções climáticas, apenas os preditores climáticos foram atualizados para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, mantendo as variáveis edáficas estáticas, considerando sua baixa taxa de mudança no tempo e baixa sensibilidade às alterações climáticas (Velazco *et al.*, 2017; Magalhães *et al.*, 2025).

As projeções climáticas utilizadas derivam dos modelos HadGEM-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR e MIROC6, cuja média foi calculada para reduzir incertezas estruturais (Dormann *et al.*, 2018). Os cenários foram projetados para os períodos 2021–2040, 2041–2060, 2061–2080 e 2081–2100, correspondentes às trajetórias SSP2-4.5 (mitigação intermediária) e SSP5-8.5 (cenário crítico de altas emissões), conforme o Sexto Relatório de Avaliação do IPCC (2023) e a literatura especializada (Li *et al.*, 2020; Andrade *et al.*, 2020).

A modelagem de nicho ecológico foi realizada no ambiente R (RStudio v.4.2) com o pacote ENMTML (Andrade *et al.*, 2020). Foram utilizados os algoritmos Bioclim (Nix, 1986), MaxEnt/MXD (Anderson & Gonzalez, 2011), Random Forest, SVM (Prasad *et al.*, 2006) e GLM, com o objetivo de compor modelos complementares que capturassem diferentes aspectos da relação entre ocorrências e variáveis ambientais. A avaliação dos algoritmos foi conduzida pelas métricas AUC (Fielding & Bell, 1997), Kappa (Cohen, 1968), TSS (Allouche





et al., 2006), Jaccard e Sorensen (Leroy *et al.*, 2018). Modelos com desempenho superior a 0,7 nessas métricas foram considerados adequados para projeção.

O modelo consenso foi gerado por PCA, adotando-se o primeiro componente principal como síntese da performance dos algoritmos. Os mapas binários foram produzidos com base no limiar de sensibilidade e especificidade máximas (MX_TSS), garantindo comparabilidade entre cenários atuais e futuros. Essa abordagem permitiu integrar preditores estáticos e variáveis climáticas projetadas, assegurando robustez e coerência ecológica às previsões de distribuição atual e potencial das espécies.

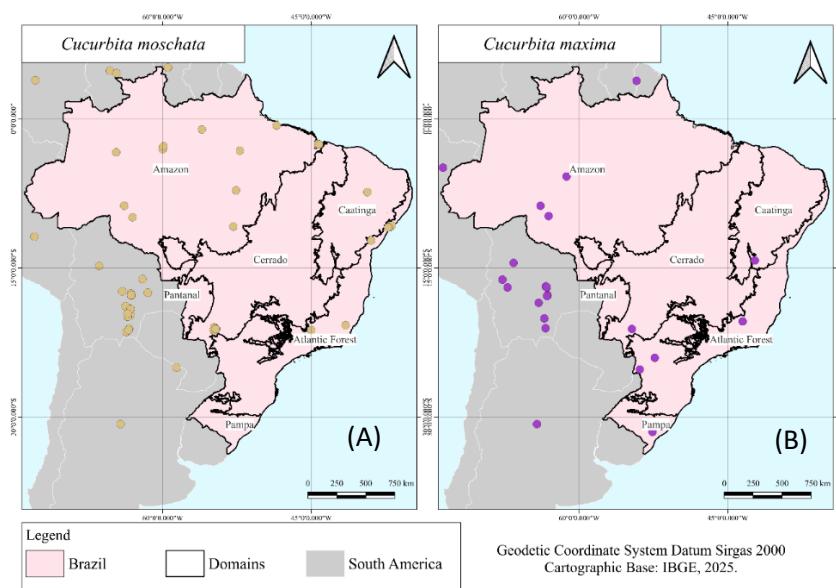
Resultados e Discussões

Após a limpeza e filtragem espacial dos dados, a matriz final incluiu 84 registros de ocorrência para as análises de modelagem de nicho ecológico, sendo: 27 pontos para *Cucurbita maxima* e 57 para *Cucurbita moschata*. *C. moschata* apresenta ampla distribuição no território brasileiro, com registros nos diferentes domínios fitogeográficos. Há uma concentração no Cerrado, além de presença significativa em áreas de transição com a Caatinga, Pantanal e Amazônia. Registros pontuais também são observados na Mata Atlântica e no Pampa (Figura 1). Entretanto, *C. maxima* apresentou uma distribuição mais no sul do Cerrado, no centro do Pantanal e em porções do Pampa, além da Amazônia e da Caatinga (Figura 1).



Figura 1

*Pontos de ocorrência restritos à América do Sul após análise de colinearidade e redução espacial de A) *Cucurbita moschata* e B) *Cucurbita maxima*.*



Os padrões de distribuição observados para *C. maxima* e *C. moschata* indicam estratégias adaptativas distintas. *C. maxima* apresentou distribuição mais limitada, fortemente associada à temperatura mínima no mês mais frio (bio06), temperatura média do trimestre mais frio (bio11) e precipitação no trimestre mais seco (bio17), sugerindo maior sensibilidade à variabilidade climática. Esses resultados convergem com López-Anido (2021), que identificou grupos morfoagronômicos de *C. maxima* estruturados por gradientes geográficos e ambientais, possivelmente relacionados à domesticação e seleção local.

Em contraste, *C. moschata* exibiu distribuição mais ampla entre domínios fitogeográficos, compatível com Hernández *et al.* (2023), que destacam sua grande diversidade fenotípica e ampla origem geográfica em regiões tropicais e subtropicais.

Para a modelagem de nicho ecológico, foram utilizados os 12 primeiros componentes principais (PC1–PC12), responsáveis por $\geq 95\%$ da variância acumulada. O PC1 foi influenciado majoritariamente por variáveis térmicas, enquanto o PC2 refletiu atributos edáficos, com maior contribuição do carbono orgânico superficial e total e do nitrogênio. O PC3 integrou variáveis climáticas e topográficas, especialmente sazonalidade da precipitação e elevação. O PC4 destacou características texturais do solo (areia, silte e argila), e o PC5 reuniu elementos climáticos extremos, como precipitação no trimestre mais quente, isotermalidade e elevação. Os componentes PC6–PC12 também revelaram combinações



relevantes de fatores térmicos, edáficos e hídricos, evidenciando gradientes ambientais complementares importantes para a modelagem das espécies (Tabela 1).

Tabela 1

*Principais variáveis ambientais associadas aos 12 primeiros componentes principais (PC1 a PC12), com seus respectivos pesos (autovetores), que apresentaram maior influência nos padrões de distribuição e na modelagem de nicho de *C. maxima* e *C. moschata*.*

Componentes Principais	Variáveis	Autovetor	Variáveis	Autovetor	Variáveis	Autovetor
PC1	BIO06	0,26304	BIO11	0,258607	BIO01	0,250122
PC2	ocs30	0,324382	ocd30	0,320489	nitrogen30	0,312026
PC3	BIO15	0,353419	BIO04	-0,31267	Elevação	0,311522
PC4	sand30	-0,54191	silt30	0,482277	clay30	0,348652
PC5	BIO18	-0,48316	BIO02	-0,40193	Elevação	-0,34066
PC6	cfvo30	0,33847	BIO14	0,286434	WRB	0,283793
PC7	clay30	0,53855	WRB	-0,41646	bio15	-0,30251
PC8	BIO19	-0,54508	BIO18	0,322616	BIO13	-0,25857
PC9	WRB	0,778496	silt30	-0,35209	clay30	0,243206
PC10	slope1	0,755026	BIO05	0,266142	BIO10	0,217011
PC11	clay30	-0,5107	soc30	-0,49716	silt30	0,321169
PC12	BIO02	-0,4689	cec30	-0,39521	BIO03	-0,3536

Bio1–Bio11: variáveis térmicas (médias, extremos e sazonalidade); Bio12–Bio19: variáveis de precipitação (anuais, mensais, trimestrais e sazonalidade). Variáveis edáficas e topográficas: elevação (m), nitrogênio total (nitrogen30); carbono orgânico total (ocd30, g/kg) e superficial (ocs30, g/kg); pH (0–30 cm); areia (sand30, %), silte (silt30, %), argila (clay30, %), carbono orgânico do solo (soc30, g/kg); declividade (slope1); densidade aparente (bdod30); volume de fragmentos grossos (cfvo30); capacidade de troca catiônica (cec30); classes e probabilidades de solo (WRB).

Quanto às análises de algoritmos, Random Forest apresentou os melhores valores de AUC para *C. maxima* ($0,949 \pm 0,009$) e *C. moschata* ($0,954 \pm 0,011$). Para *C. maxima*, Random Forest e MaxEnt alcançaram os maiores valores de Kappa ($0,786 \pm 0,022$ e $0,754 \pm 0,020$, respectivamente) e TSS ($0,807 \pm 0,019$ e $0,779 \pm 0,017$), indicando boa concordância entre previsões e observações reais. Da mesma forma, os índices Jaccard e Sorensen foram mais elevados para esses mesmos algoritmos, com Random Forest registrando $0,681 \pm 0,023$ (Jaccard) e $0,810 \pm 0,018$ (Sorensen) (Tabela 2).

Para *C. moschata*, os padrões foram semelhantes, com Random Forest novamente apresentando os maiores valores para todas as métricas avaliadas, incluindo Kappa ($0,810 \pm 0,020$), TSS ($0,831 \pm 0,018$), Jaccard ($0,693 \pm 0,024$) e Sorensen ($0,819 \pm 0,018$) (Tabela 2). Esses resultados reforçam a qualidade preditiva dos algoritmos na modelagem da distribuição ecológica das espécies estudadas.





Tabela 2

Desempenho dos algoritmos de modelagem de nicho ecológico para as espécies *Cucurbita maxima* e *Cucurbita moschata*, com base nas métricas AUC, Kappa, TSS, Jaccard e Sorensen. Os valores estão expressos como média \pm desvio padrão, obtidos a partir das replicações dos modelos.

<i>Cucurbita maxima</i>					
Algoritmos	Métricas				
	AUC ⁷	Kappa	TSS ⁸	Jaccard	Sorensen
BIO¹	0.77 \pm 0.192	0.54 \pm 0.385	0.54 \pm 0.385	0.64 \pm 0.251	0.759 \pm 0.178
GAU²	0.885 \pm 0.152	0.753 \pm 0.286	0.753 \pm 0.286	0.79 \pm 0.244	0.865 \pm 0.169
GLM³	0.679 \pm 0.112	0.333 \pm 0.201	0.333 \pm 0.201	0.476 \pm 0.147	0.634 \pm 0.136
MXD⁴	0.86 \pm 0.135	0.753 \pm 0.233	0.753 \pm 0.233	0.778 \pm 0.204	0.864 \pm 0.126
RDF⁵	0.83 \pm 0.16	0.64 \pm 0.192	0.64 \pm 0.192	0.689 \pm 0.16	0.806 \pm 0.123
SVM⁶	0.874 \pm 0.152	0.787 \pm 0.229	0.787 \pm 0.229	0.838 \pm 0.167	0.905 \pm 0.101

<i>Cucurbita moschata</i>					
Algoritmos	Métricas				
	AUC ⁷	Kappa	TSS ⁸	Jaccard	Sorensen
BIO¹	0.851 \pm 0.076	0.702 \pm 0.151	0.702 \pm 0.151	0.702 \pm 0.151	0.816 \pm 0.115
GAU²	0.927 \pm 0.039	0.77 \pm 0.087	0.77 \pm 0.087	0.8 \pm 0.069	0.887 \pm 0.044
GLM³	0.835 \pm 0.073	0.632 \pm 0.161	0.632 \pm 0.161	0.694 \pm 0.124	0.814 \pm 0.087
MXD⁴	0.834 \pm 0.098	0.697 \pm 0.143	0.697 \pm 0.143	0.751 \pm 0.108	0.855 \pm 0.067
RDF⁵	0.922 \pm 0.049	0.808 \pm 0.09	0.808 \pm 0.09	0.821 \pm 0.074	0.9 \pm 0.045
SVM⁶	0.927 \pm 0.035	0.806 \pm 0.074	0.806 \pm 0.074	0.829 \pm 0.061	0.906 \pm 0.037

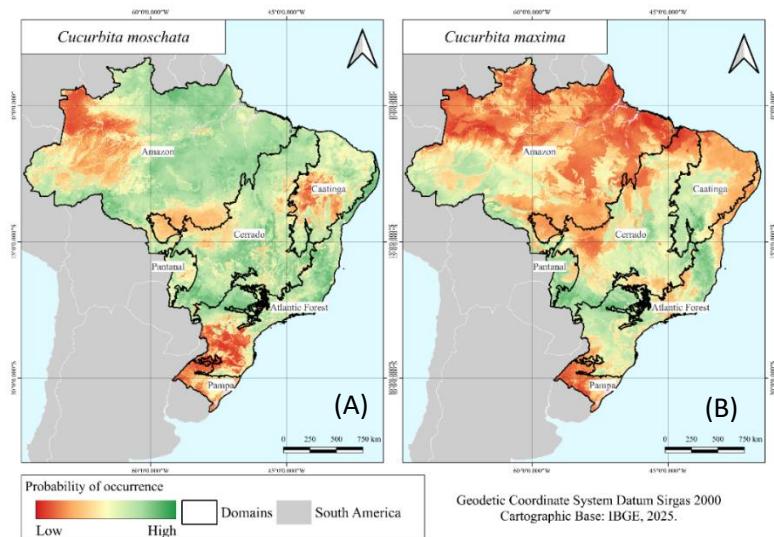
¹BIO = GAU² = Bayesian Gaussian Process; ³GLM = ⁴MXD = Maximum Entropy Default; ⁵RDF = Random Forests; ⁶SVM = Support Vector Machine; ⁷AUC = Area Under the Curve e ⁸TSS = True Skill Statistics.

No período de 2009 a 2019, a projeção da distribuição atual para *C. moschata* indica alta probabilidade de ocorrência em diversas regiões do Brasil, com destaque para áreas do Cerrado, da Mata Atlântica e porções do Pampa, revelando ampla adequabilidade ambiental nesses domínios (Figura 2A). Contudo, observa-se baixa distribuição nas porções centrais e setentrionais da Amazônia, bem como em áreas da Caatinga, sugerindo baixa probabilidade de ocorrência da espécie em ambientes mais secos ou com solos menos favoráveis (Figura 2A). Para *C. maxima*, a distribuição é mais restrita, com maior adequabilidade nos domínios da Mata Atlântica e do Pampa, enquanto a Amazônia, grande parte da Caatinga e do Cerrado apresentam baixa probabilidade de ocorrência, indicando limitações ambientais significativas para essa espécie nessas regiões (Figura 2B).



Figura 2

Projeção referente ao período presente (2009-2019) para as espécies A) *Cucurbita moschata* e B) *Cucurbita maxima*.



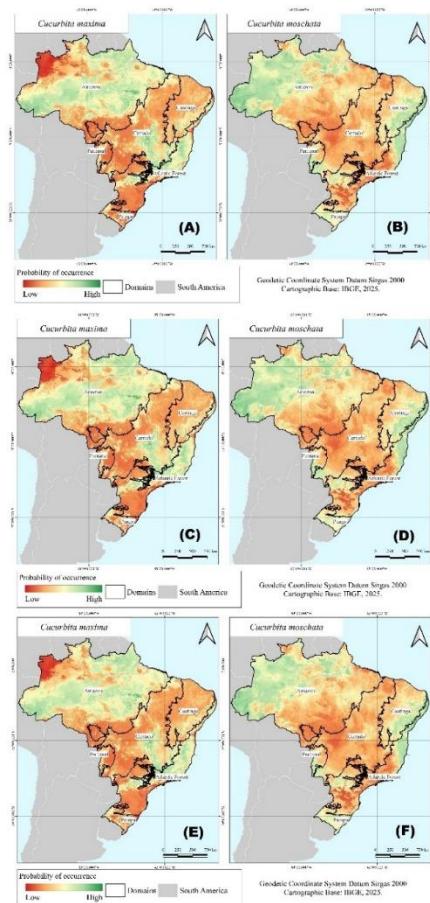
As projeções de adequabilidade ambiental para *C. maxima* e *C. moschata* no Brasil, sob os cenários climáticos SSP2-4.5 (intermediário) e SSP585 (pessimista), nos períodos de 2041–2060, 2061–2080 e 2081–2100, revelam padrões distintos entre as espécies (Figuras 3 e 4). Para *C. maxima*, as projeções para o cenário SSP2-4.5 indicam uma distribuição ambientalmente favorável e relativamente estável ao longo do tempo. No período de 2041–2060, destacam-se áreas com alta adequabilidade ambiental na Amazônia, bem como em regiões da Mata Atlântica, do Cerrado e do Pampa (Figura 3A). Entre 2061–2080, essas regiões favoráveis permanecem, com leve expansão no sul do Cerrado e se mantêm na Amazônia e Mata Atlântica (Figura 3C). Já no intervalo de 2081–2100, observa-se certo declínio, mas ainda há presença de áreas adequadas na Amazônia, em partes do Cerrado e nos extremos sul e sudeste do país, evidenciando a maior resiliência da espécie frente às mudanças climáticas intermediárias (Figura 3E).

Entretanto, *C. moschata* apresenta menor adequabilidade ambiental ao longo dos três períodos analisados. De 2041–2060, as áreas com condições favoráveis estão concentradas em porções da Mata Atlântica, da Caatinga e da Amazônia, com o Cerrado, Pantanal e Pampa apresentando baixa aptidão (Figura 3B). No período de 2061–2080, observa-se uma intensificação da fragmentação, com redução das áreas adequadas, especialmente no Pantanal, norte da Amazônia e bordas do Cerrado (Figura 3D). Entre 2081–2100, o cenário se agrava, com raras faixas descontínuas e moderadamente adequadas na Mata Atlântica e em pontos

isolados da Caatinga e da Amazônia, indicando maior sensibilidade climática da espécie (Figura 3F).

Figura 3

Projeção da adequabilidade ambiental para *Cucurbita maxima* (A, C, E) e *Cucurbita moschata* (B, D, F) no cenário climático menos pessimista SSP245 nos intervalos 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100.

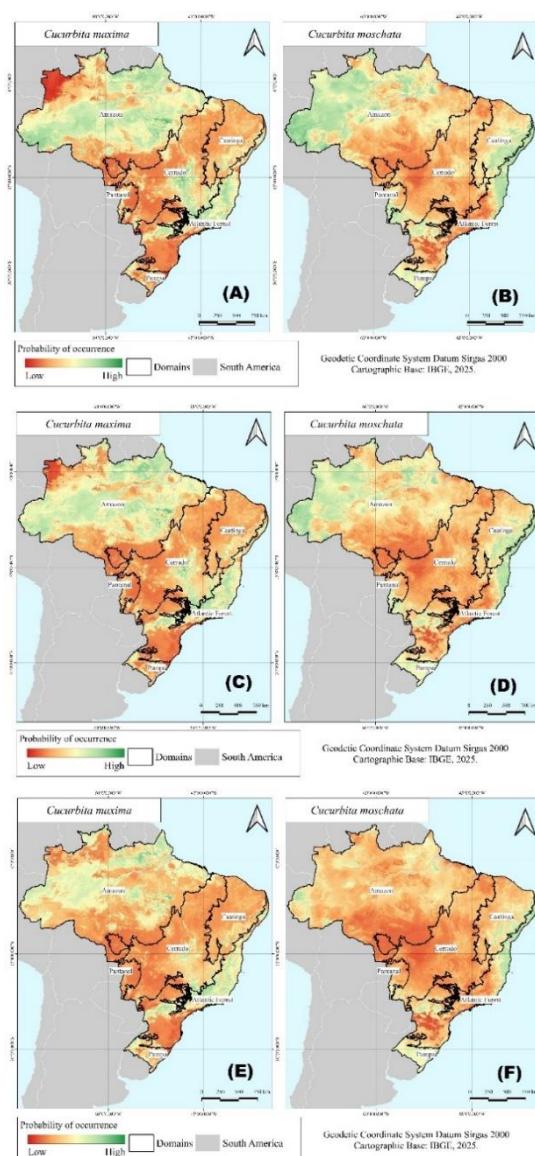


As projeções para o cenário SSP5-8.5 indicam forte redução da adequabilidade ambiental de *C. maxima* e *C. moschata* (Figura 4). Para *C. maxima*, entre 2041–2060, observa-se declínio acentuado na Caatinga, Pantanal e Pampa, enquanto a Amazônia mantém porções ainda favoráveis (Figura 4A). De 2061–2080, a perda se intensifica, atingindo o centro-sul do Cerrado e fragmentando ainda mais a Amazônia e a Mata Atlântica (Figura 4C). No período 2081–2100, as áreas adequadas tornam-se escassas, restritas à Mata Atlântica e a fragmentos da Amazônia (Figura 4E).

Para *C. moschata*, os efeitos do aquecimento são igualmente expressivos. Entre 2041–2060, ainda há adequabilidade na Amazônia, parte do Pantanal e setores da Caatinga (Figura 4B). De 2061–2080, ocorre declínio na Amazônia, Pantanal e Mata Atlântica (Figura 4D). Em 2081–2100, o cenário torna-se crítico, com baixa adequabilidade em quase todo o território, persistindo apenas faixas remanescentes na Caatinga e Mata Atlântica (Figura 4F).

Figura 4

Projeção da adequabilidade ambiental para Cucurbita maxima (A, C, E) e Cucurbita moschata (B, D, F) no cenário climático mais pessimista SSP585 nos intervalos 2041–2060, 2061–2080 e 2081–2100.



No intervalo de 2041–2060, para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, observa-se um



aumento da área ambientalmente adequada em todos os domínios fitogeográficos para *C. maxima*, com destaque para a Amazônia, onde a área estimada aumenta de aproximadamente 591.663,81 km² para 1.696.130,39 km² no cenário SSP2-4.5 (+186,67%) e 1.736.504,12 km² no SSP5-8.5 (+193,50%). Padrão semelhante é observado no Cerrado (+67,11% no SSP2-4.5 e +69,67% no SSP5-8.5), na Mata Atlântica (+57,37% no SSP245 e +54,91% no SSP5-8.5) e no Pampa (+34,13% e +62,50%, respectivamente) (Tabela 3).

Para *C. moschata*, observou-se uma redução de áreas ambientalmente adequadas ao longo dos cenários futuros. Na Amazônia, há uma redução de 2.991.017,00 para 1.843.683,15 km² de áreas adequadas no SSP2-4.5 (-38,36%) e 1.703.394,19 km² no SSP585 (-43,05%). Reduções ainda mais severas são estimadas para o Cerrado (-94,59% no SSP245 e -94,95% no SSP5-8.5) e para a Caatinga (-49,18% e -53,68%, respectivamente) (Tabela 3). A Mata Atlântica apresenta uma redução mais moderada, mas ainda relevante.

Tabela 3

Projeções de acréscimo (+) ou perda (-) de área de adequabilidade ambiental (%) nos cenários SSP245 e SSP585 nos intervalos de tempo 2041–2060, 2061–2080 e 2081–2100, em comparação com o período atual, em áreas dos domínios fitogeográficos brasileiros para Cucurbita maxima e Cucurbita moschata.

<i>Cucurbita maxima</i>				
SSP2-4.5				
Domínio	Atual (km²)	2041-2060	2061-2080	2081-2100
Amazônia	591.663,81	1.696.130,39	1.672.387,51	1.651.875,40
Caatinga	362.648,05	36.232,28	32.936,47	28.469,77
Cerrado	938.916,93	308.852,54	290.660,51	247.121,06
Mata Atlântica	694.267,73	295.994,53	314.164,87	315.747,73
Pampa	4.510,06	6.049,55	7.784,19	9.453,78
Pantanal	118.519,24	2.320,08	1.452,76	607,12
Total	2.710.526	2.345.579	2.319.386	2.253.275
SSP5-8.5				
Amazônia	591.663,81	1.736.504,12	1.508.333,99	700.425,70
Caatinga	362.648,05	32.416,07	21.314,38	11.838,91
Cerrado	938.916,93	284.784,42	205.988,43	101.302,94
Mata Atlântica	694.267,73	313.015,68	326.133,89	313.514,38
Pampa	4.510,06	7.328,85	8.066,07	18.647,37
Pantanal	118.519,24	1.452,76	238,51	0,00
Total	2.710.526	2.375.502	2.070.075	1.145.729
<i>Cucurbita moschata</i>				
SSP2-4.5				
Domínio	Atual (km²)	2041-2060	2061-2080	2081-2100
Amazônia	2.991.017,00	1.843.683,15	1.873.930,92	1.682.578,52
Caatinga	554.542,53	281.813,85	254.341,50	232.940,39
Cerrado	1.658.293,56	89.745,90	80.530,63	62.512,07
Mata Atlântica	820.115,82	308.267,10	311.454,50	291.007,44
Pampa	23.135,75	127.365,90	126.325,11	126.129,97





Pantanal	135.909,00	69.971,02	54.988,07	55.335,00
Total	6.183.014	2.720.847	2.701.571	2.450.503
SSP5-8.5				
Amazônia	2.991.017,00	1.703.394,19	1.309.175,71	181.464,96
Caatinga	554.542,53	256.856,73	194.995,15	116.220,84
Cerrado	1.658.293,56	83.674,67	48.786,73	22.788,82
Mata Atlântica	820.115,82	307.725,03	282.204,14	247.793,24
Pampa	23.135,75	121.966,83	133.025,16	129.230,63
Pantanal	135.909,00	59.519,81	39.051,07	12.359,31
Total	6.183.014	2.533.137	2.007.238	709.858

Os modelos de distribuição de *Cucurbita maxima* e *C. moschata* revelaram respostas contrastantes às variáveis climáticas e edáficas no Brasil. Após redução da colinearidade, identificou-se que a adequabilidade atual de *C. maxima* abrange amplamente Amazônia, Mata Atlântica e Pampa, enquanto *C. moschata* apresenta distribuição mais restrita, vinculada a climas tropicais sazonais e maior sensibilidade a temperatura e precipitação. As projeções indicam contração significativa das áreas adequadas para ambas até o fim do século, especialmente no cenário SSP5-8.5. Para *C. moschata*, a redução pode ultrapassar 70% em domínios como Cerrado, Pantanal e Caatinga; *C. maxima* tende a conservar pequenas áreas na Amazônia e Mata Atlântica sob SSP2-4.5, mas perde quase todos os remanescentes sob SSP5-8.5.

Essas tendências convergem com análises globais que projetam deslocamento e fragmentação dos domínios fitogeográficos brasileiros, com até 35–40% da área terrestre tornando-se adequada áreas de outros biomas entre 2150 e 2500 (Boonman *et al.*, 2021). A limitação à migração, decorrente do uso intensivo do solo, reforça a relevância dos refúgios climáticos, sobretudo nas regiões tropicais, onde a heterogeneidade topográfica favorece a permanência de populações localmente adaptadas. Isso se alinha às conclusões de Meyer *et al.* (2022), segundo as quais espécies tropicais permanecerão expostas ao estresse térmico prolongado devido ao overshoot climático.

A maior vulnerabilidade de *C. moschata* ressalta a necessidade de estratégias integradas de conservação, considerando que cultivos e variedades crioulas são fortemente afetados por extremos climáticos e variações edáficas, resultando em perdas produtivas e fenológicas (Allen *et al.*, 2024; Magalhães *et al.*, 2025). A conservação in situ e on-farm, fortalecida por sistemas agroflorestais, práticas tradicionais e atuação de agricultores guardiões, favorece o fluxo gênico e mantém processos adaptativos. A diversidade registrada em bancos de germoplasma brasileiros constitui recurso estratégico, incluindo acessos com alta variabilidade morfológica e bioquímica e atributos relevantes para tolerância hídrica e





térmica (Gomes *et al.*, 2024; Almeida *et al.*, 2024).

O estabelecimento de bancos regionais em potenciais refúgios climáticos (Amazônia central, Mata Atlântica úmida e bordas do Pampa) é prioritário, complementado por coleta e duplicação de acessos em áreas vulneráveis, como Cerrado e Caatinga. O melhoramento participativo amplia a seleção de genótipos adaptados às novas condições ambientais, promovendo conservação dinâmica. Em paralelo, a conservação ex situ deve integrar abordagens de manejo adaptativo da paisagem, garantindo conectividade e mitigando os efeitos da fragmentação (Allen *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2025). Políticas públicas que valorizem sociobiodiversidade e sistemas agroecológicos fortalecem a conservação on-farm e ampliam a segurança alimentar; a incorporação de abóboras crioulas em sistemas agroflorestais contribui para conservação genética, produção sustentável e mitigação de emissões (Hamdi *et al.*, 2020).

A ampla distribuição de *C. maxima* confirma sua elevada plasticidade edafoclimática (Martínez-González *et al.*, 2021), explicada pela grande variabilidade genética e fenotípica (Hernández *et al.*, 2023). Apesar disso, sua produtividade depende de condições mesotérmicas estáveis (López-Anido, 2021). Em contraste, *C. moschata* exibe distribuição mais limitada e associada à temperatura e umidade, sugerindo menor tolerância à variabilidade climática. Embora menos estudada, suas populações parecem apresentar adaptação regionalizada.

As projeções futuras (2041–2100) reforçam a tendência de redução das áreas adequadas, com queda acentuada para ambas as espécies sob SSP5-8.5 e perda superior a 70% do nicho atual de *C. moschata* em alguns domínios, padrão coerente com previsões de perda de áreas agrícolas tradicionais diante do aumento térmico e da irregularidade pluviométrica (Schneider *et al.*, 2022). A variabilidade intraespecífica das variedades tradicionais de *Cucurbita* constitui recurso-chave para seleção de genótipos tolerantes a estresses climáticos, pragas e doenças (Khoury *et al.*, 2022). A plasticidade fenotípica de *C. moschata*, como folhas menores em áreas secas e frutos maiores em regiões úmidas, reforça seu potencial adaptativo (Seka *et al.*, 2023).

Diante das projeções, recomenda-se fortalecer bancos de germoplasma regionais em áreas de refúgio climático, além de ampliar programas de melhoramento participativo (Ceccarelli & Grando, 2020). A conservação de hotspots agrícolas deve integrar conhecimento tradicional, sensoriamento remoto e modelagem (Bernis Fonteneau *et al.*, 2023). Por fim, políticas públicas devem priorizar a conservação on-farm, sistemas agroecológicos e estratégias de resiliência socioambiental que garantam a permanência de





cultivos tradicionais em cenários de mudança climática.

Conclusão

Os resultados da modelagem de nicho ecológico demonstram que *Cucurbita maxima* e *C. moschata* apresentam respostas contrastantes às variáveis climáticas e edáficas no território brasileiro, revelando diferentes estratégias adaptativas e distintos graus de vulnerabilidade às mudanças climáticas. Enquanto *C. maxima* mostrou maior resiliência e manutenção de áreas adequadas em cenários futuros intermediários, *C. moschata* apresentou forte sensibilidade a temperatura e precipitação, com acentuada contração de habitats potenciais, sobretudo em áreas nos domínios Cerrado, Pantanal e Caatinga. Os cenários mais pessimistas (SSP5-8.5) indicam reduções severas para ambas as espécies até o final do século, destacando que a intensificação do aquecimento global pode comprometer de forma crítica regiões tradicionalmente produtoras e a conservação da agrobiodiversidade associada a essas cucurbitáceas.

Diante desse panorama, o estudo reforça a urgência de estratégias integradas de conservação *in situ*, *on-farm* e *ex situ*, bem como o fortalecimento de bancos de germoplasma, programas de melhoramento participativo e políticas públicas que valorizem sistemas agroecológicos e o conhecimento tradicional. A identificação de áreas de refúgio climático, aliada ao mapeamento de zonas de risco, oferece subsídios estratégicos para o planejamento agrícola, a segurança alimentar e a mitigação dos impactos das mudanças climáticas sobre espécies cultivadas essenciais para agricultores familiares no Brasil. Esses resultados contribuem para a formulação de ações de cultivos baseados em evidências, fundamentais para promover resiliência produtiva e conservação genética em longo prazo.

Agradecimentos

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





Carlos Henrique Salvino Gadelha Meneses (Processo no. 306943/2025-5); Ricardo Lopes (Processo no. 308815/2023-8) e Maria Teresa Gomes Lopes (Processo no. 306943/2025-5).

Referências

- Aiello-Lammens, M. E., Boria, R. A., Radosavljevic, A., Vilela, B., & Anderson R. P. (2015). SpThin: an r package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. *Ecography*, 38(5), 541-545. <https://doi.org/10.1111/ecog.01132>
- Allen, B. J., Hill, D. J., Burke, A. M., Clark, M., Marchant, R., Stringer, L. C., ... & Lyon, C. (2024). Projected future climatic forcing on the global distribution of vegetation types. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 379(1902), 20230011. <https://doi.org/10.1098/rstb.2023.0011>
- Allouche, O., Tsoar, A., & Kadmon, R. (2006). Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa, and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, 43(6), 1223-1232. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01214.x>
- Almeida, D. P., Lopes, R., Bezerra, C. D. S., Tomaz, J. S., De Souza, S. F., Ramos, S. L. F., ... & Lopes, M. T. G. (2024). Climate change impact on modeling the distribution of ornamental species in brazilian territory. *Interciencia*, 49(9), 527-534.
- Anderson, R. P., & Gonzalez Júnior, I. (2011). Species-specific tuning increases robustness to sampling bias in models of species distributions: an implementation with Maxent. *Ecological Modelling*, 222(15), 2796-2811. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.04.011>
- Andrade, A. F. A. D., Velazco, S. J. E., & De Marco Júnior, P. (2020). ENMTML: An R package for a straightforward construction of complex ecological niche models. *Environmental Modelling & Software*, 125, 104615. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104615>
- Bernis-Fonteneau, A., Alcadi, R., Frangella, M., & Jarvis, D. I. (2023). Scaling up pro-poor agrobiodiversity interventions as a development option. *Sustainability*, 15(13), 10526. <https://doi.org/10.3390/su151310526>
- Bibi, F., & Rahman, A. (2023). An Overview of Climate Change Impacts on Agriculture and Their Mitigation Strategies. *Agriculture*, 13(1508), 1-27. <https://doi.org/10.3390/agriculture13081508>
- Boonman, C. C., Huijbregts, M. A., Benítez-López, A., Schipper, A. M., Thuiller, W., & SAntini, L. (2022). Trait-based projections of climate change effects on global biome distributions. *Diversity and Distributions*, 28(1), 25-37. <https://doi.org/10.1111/ddi.13431>
- Carrillo-García, C., Girola-Iglesias, L., Guijarro, M., Hernando, C., Madrigal, J., Mateo, R. G. (2023). Ecological niche models applied to post-megafire vegetation restoration in the context of climate change. *Science of The Total Environment*, 855, 158858. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158858>





Ceccarelli, S., & Grando, S. (2020). Participatory plant breeding: who did it, who does it and where?. *Experimental Agriculture*, 56(1), 1-11. <https://doi.org/10.1017/S0014479719000127>

Centro de Referência e Informação Ambiental (CRIA). SinBiota: sistema de informação ambiental do Programa Biota/FAPESP. Disponível em: <http://www.biotaesp.org.br/sia/> (Acesso em: março 10, 2025)

Cherubin, M. R., Pinheiro Junior, C. R., Alves, L. A., Bayer, C., Cerri, C. E. P., Barioni, L. G., Peper, A., & Anselmi, A. A. (2024). Carbon farming initiative: a national-scale public-private partnership to promote regenerative agriculture in Brazil. *Experimental Agriculture*, 60, e28. <https://doi.org/10.1017/S0014479724000255>

Cohen, J. (1968). Weighted kappa: Nominal scale agreement provision for scaled disagreement or partial credit. *Psychological Bulletin*, 70(4), 213-220. <https://psycnet.apa.org/doi/10.1037/h0026256>

De Marco, P. J., & Nóbrega, C. C. (2018). Evaluating collinearity effects on species distribution models: An approach based on virtual species simulation. *PLoS ONE*, 13(9), e0202403. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202403>

Dormann, C. F., Calabrese, J. M., Guillera-Arroita, G., Matechou, E., Bahn, V., Bartoń, K., & Beale, C. M. (2018). Model averaging in ecology: A review of Bayesian, information-theoretic, and tactical approaches for predictive inference. *Ecological Monographs*, 88(4), 485-504. <https://doi.org/10.1002/ecm.1309>

Fattori, I. M., Sentelhas, P. C., & Marin, F. R. (2022). Assessing the impact of climate variability on Asian rust severity and soybean yields in different Brazilian mega-regions. *International Journal of Plant Production*, 16(1), 17-28. <https://doi.org/10.1007/s42106-021-00169-x>

Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>

Fielding, A. H., & Bell, J. F. (1997). A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence model. *Environmental Conservation*, 24, 38-49. <https://doi.org/10.1017/S0376892997000088>

Fiorini, A. C. O., Angelkorte, G., Bakman, T., Baptista, L. B., Cruz, T., Diuana, F. A., Morais, T. N., Rathmann, R., Silva, F. T. F., Tagomori, I., Zanon-Zotin, M., Lucena, A. F. P., Szklo, A., Schaeffer, R., & Portugal-Pereira, J. (2024). How climate change is impacting the Brazilian agricultural sector: evidence from a systematic literature review. *Environmental Research Letters*, 19(8), 083001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad5f42>

Gambel, J., & Holway, D. A. (2024). Temperature and soil-moisture manipulation yields evidence of drought-induced pollen limitation in bee-pollinated *Cucurbita pepo*. *Ecology and Evolution*, 14(6), e11400. <https://doi.org/10.1002/ece3.11400>





Global Biodiversity Information Facility (GBIF). Occurrence download. 2025. Disponível em: <https://www.gbif.org/pt/occurrence/search> (Acesso em: março 10, 2025).

Gomes, L. M., de Souza Bezerra, C., Tomaz, J. S., Meneses, C. H. S. G., Marques, R. L. S., Pereira, A. M., ... & Lopes, M. T. G. (2024). Variation of Heavy Metals Accumulation by Malva in Amazonian Ecosystems of Drylands and Floodplains. Polish Journal of Environmental Studies, XX(X), 1-11. <https://doi.org/10.15244/pjoes/196054>

Hamdi, K., Palma, D., Angelini, P., Acciarri, N., Tarchoun, N., & Sestili, S. (2020). Cucurbita maxima Duch. population analysis: relationship between Tunisian and Italian germplasm. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 95(4), 496-505. <https://doi.org/10.1080/14620316.2019.1689855>

Hernandez, C. O., Labate, J., Reitsma, K., Fabrizio, J., Bao, K., Fei, Z., ... & Mazourek, M. (2023). Characterization of the USDA Cucurbita pepo, C. moschata, and C. maxima germplasm collections. Frontiers in Plant Science, 14, 1130814. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1130814>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change: the physical science basis. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. (Acesso em: março 28, 2025).

Khoury, C. K., Heider, B., Castañeda-Álvarez, N. P., Achicanoy, H. A., Sosa, C. C., Miller, R. E., ... & Struik, P. C. (2015). Distributions, ex situ conservation priorities, and genetic resource potential of crop wild relatives of sweetpotato [Ipomoea batatas (L.) Lam., I. series Batatas]. Frontiers in plant science, 6, 251. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00251>

Leroy, B., Delsol, R., Hugueny, B., Meynard, C. N., Barhoumi, C., Barbet-Massin, M., & Bellard, C. (2018). Without quality presence-absence data. discrimination metrics such as TSS can be misleading measures of model performance. Journal of Biogeography, 45, 1994-2002. <https://doi.org/10.1111/jbi.13402>

Li, F., Liu, Y., Yan, W., Zhao, Y., & Jiang, R. (2020). Effects of future climate change on summer maize growth in Shijin irrigation district. Theoretical and Applied Climatology, 139(1), 33-44. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02956-z>

Lima, M. V., Oliveira, F. I. C. de, Ramos, S. R. R., Freitas, B. M., & Aragão, F. A. S. de. (2022). Flowering phenology and floral biology in pumpkin cultivars. Revista Ciência Agronômica, 53, e20218013. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20220024>

Lin, C.-T., Tejano, L. A., Panjaitan, F. C. A., Permata, V. N. S., Sevi, T., & Chang, Y.-W. (2024). Protein identification and potential bioactive peptides from pumpkin (Cucurbita maxima) seeds. Food Science & Nutrition, 12, 5388-5402. <https://doi.org/10.1002/fsn3.4188>

López-Anido, F. S. (2021). Cultivar-groups in Cucurbita maxima Duchesne: Diversity and possible domestication pathways. Diversity, 13(8), 354. <https://doi.org/10.3390/d13080354>

Magalhães, L. L., Tomaz, J. S., Souza Bezerra, C., Lopes, M. T. G., Lopes, R., Souza, S. F., ... & Ramos, S. L. F. (2025). Climate Change Threatens the Geographic Distribution of





Cupuaçu More Than Cacao: Insights from Ecological Modeling in Brazil. *Ethnobiology and Conservation*, 14(31), 1-20. <https://doi.org/10.15451/ec2025-09-14.31-1-18>

Martínez-González, C., Castellanos-Morales, G., Barrera-Redondo, J., Sanchez-de La Vega, G., Hernández-Rosales, H. S., Gasca-Pineda, J., ... & Eguiarte, L. E. (2021). Recent and historical gene flow in cultivars, landraces, and a wild taxon of *Cucurbita pepo* in Mexico. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9, 656051. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.656051>

Meyer, A. L., Bentley, J., Odoulami, R. C., Pigot, A. L., & Trisos, C. H. (2022). Risks to biodiversity from temperature overshoot pathways. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 377(1857), 20210394. <https://doi.org/10.1098/rstb.2021.0394>

Morais, I. L. L., Lima, A. A., Santos, I. N. L., Meneses, C., Silva, R. F., Lopes, R., Ramos, S. L. F., Aguiar, A. V., Wrege, M. S., Lopes, M. T. G. (2024). Climate Change Impact on the Distribution of Forest Species in the Brazilian Amazon. *Sustainability*, 16, 3458. <https://doi.org/10.3390/su16083458>

Nix, H. A. (1986). A biogeographic analysis of Australian elapid snakes. *Atlas of Elapid Snakes of Australia*. Australian Government Publishing Service, Canberra, ACT: ed R. Longmore, 4-15.

Ortiz Cano, H. G., Hadfield, R., Gomez, T., Hultine, K., Mata Gonzalez, R., Petersen, S. L., Hansen, N. C., Searcy, M. T., Stetler, J., Cervantes Mendívil, T., Burchfield, D., Park, P., & Stewart, J. R. (2023). Ecological-niche modeling reveals current opportunities for *Agave* dryland farming in Sonora, Mexico and Arizona, USA. *PLoS ONE*, 18(1), e0279877. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0279877>

Prasad, A. M., Iverson, L. R., & Liaw, A. (2006). Newer Classification and Regression Tree Techniques: Bagging and Random Forests for Ecological Prediction. *Ecosystems*, 9, 181-199. <https://doi.org/10.1007/s10021-005-0054-1>

R Core Team. (2025, maio 26). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria; 2024. Disponível em: <https://www.R-project.org/> (Acesso em: maio 25, 2025)

Rebelo, K. M., Almeida, G. S. S., & Brito, G. R. (2023). Modelagem de distribuição de *Moquiniastrum oligocephalum* (Gardner) G. Sancho (Asteraceae: Gochnatieae) para a Bahia, Brasil. *Peer Review*, 5(19), 414-429. <https://doi.org/10.1007/s00344-024-11314-x>

Santos da Mota, J., Barbosa, L. R., & Marchioro, C. A. (2024). Climate change impacts the risk of invasion of eucalypt pests in Brazil. *Agricultural and Forest Entomology*, 26(1), 101-114. <https://doi.org/10.1111/afe.12599>

Schneider, J. M., Zabel, F., & Mauser, W. (2022). Global inventory of suitable, cultivable and available cropland under different scenarios and policies. *Scientific Data*, 9(1), 527. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01632-8>

Seka, D., Kouago, B.A. & Bonny, B.S. (2023). Assessment of the variability of the morphological traits and differentiation of *Cucurbita moschata* in Côte d'Ivoire. *Scientific Reports*, 13, 3689. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30295-7>





- Silva, D. J. H., Gomes, R. S., Machado Júnior, R., Almeida, C. F., Oliveira, R. L., Albuquerque, D. P., & Santana, S. R. (2025). Characterization, conservation, and breeding of winter squash (*Cucurbita moschata* Duchesne): Case study of the collection maintained at the Federal University of Viçosa Vegetable Germplasm Bank. *Plants*, 14(15), 2317. <https://doi.org/10.3390/plants14152317>
- Vanessa, B. G., Alice, T. I., William, D. A., Adelaide, D. M., Loé-Etame, G., Condurache, N.-N., Milea, Ş.-A., Cotarlet, M., Fabrice, D. D., Inocent, G., & Iordachescu, G. (2024). Effect of fertilizers on yield, phytochemical, and antioxidant properties of *Cucurbita moschata* fruits. *Food Science & Nutrition*, 12, 6742–6751. <https://doi.org/10.1002/fsn3.4294>
- Velazco, S. J. E., Galvão, F., Villalobos, F., Marco Júnior, P. D. (2017). Using worldwide edaphic data to model plant species niches: An assessment at a continental extent. *PLoS ONE*, 12, e0186025. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186025>
- Wickham, H., Wickham, M.H. (2017, julho 04). Package tidyverse. Easily install and load the “Tidyverse”. World Soil Information (ISRIC) (2024) SoilGrids — global gridded soil information. Disponível em: <https://www.isric.org/explore/soilgrids> (Acesso em: julho, 04, 2025).
- World Soil Information (ISRIC) (2024) SoilGrids — global gridded soil information. Disponível em: <https://www.isric.org/explore/soilgrids> (Acesso em: julho, 04, 2025).

Received: 11.1.2025

Accepted: 11.24.2025

