

VARIÁVEIS BIOCLIMÁTICAS DETERMINANTES DA DISTRIBUIÇÃO DE TRÊS ESPÉCIES DE BATATA-SILVESTRE NO CONE SUL

RODRIGO, NICOLAO¹; KAYLA R. HANKINS²; MORGAN GOSTEL³;
CAROLINE M. CASTRO⁴; GUSTAVO HEIDEN⁵

¹Universidade Federal de Pelotas – rodnicolao@gmail.com

²Fort Worth Botanic Garden – khankins@fwbg.org

³Botanical Research Institute of Texas – mgostel@brit.org

⁴Embrapa Clima Temperado – caroline.castro@embrapa.br

⁵Embrapa Clima Temperado – gustavo.heiden@embrapa.br

1. INTRODUÇÃO

Solanum seção *Petota* Dumort. (Solanaceae) compreende a batata (*S. tuberosum* L.), a terceira cultura alimentar mais importante globalmente, cinco espécies domesticadas e 107 parentes silvestres (SPOONER et al., 2014). As batatas silvestres se distribuem ao longo dos Andes, desde o sul do Chile (41°S) até o norte da Colômbia e Venezuela, estendendo-se às regiões áridas do México e sudoeste dos Estados Unidos (38°N) (HIJMANS; SPOONER, 2001). Notavelmente, algumas batatas-silvestres sul-americanas também ocorrem nas planícies e planaltos do sul e sudeste do Brasil, assim como no leste da Argentina e no Uruguai (SPOONER et al., 2004, 2014, 2016, 2019). Duas dessas espécies estão classificadas em *Solanum* série *Commersoniana* Bukasov, a qual inclui apenas *S. commersonii* Dunal e *S. malmeanum* Bitter (SPOONER et al., 2016), cuja taxonomia tem sido historicamente debatida. Há discussões sobre reconhecê-las como espécies distintas ou como subespécies ou formas de uma única espécie (CORRELL, 1962; HAWKES & HJERTING, 1969; MENTZ & OLIVEIRA, 2004; SPOONER et al., 2014, 2016, 2019). Além disso, *S. chacoense* Bitter, pertencente à *Solanum* seção *Petota* ser. *Tuberosa* Rydb. ex Bukasov & Kamez, e tem área de distribuição sobreposta com essas espécies, tendo inclusive sido proposto que *S. malmeanum* poderia ter origem híbrida de cruzamentos naturais entre *S. commersonii* e *S. chacoense* (CORRELL, 1962).

A modelagem de distribuição de espécies (SDM) é uma ferramenta crucial para o entendimento da interação entre espécies e os ambientes em que se distribuem (JANSKY et al., 2009; GUIBAN et al., 2017). Definir as variáveis bioclimáticas preponderantes é essencial para compreender os limites e a distribuição geográfica das espécies e direcionar ações de conservação (TSHWENE-MAUCHAZA; AGUIRRE-GUTIÉRREZ 2019), sendo úteis na aplicação em programas de melhoramento genético, possibilitando a identificação de genótipos mais adaptados às diferentes condições ambientais (KHOURY et al, 2015).

Explorar o determinismo desses fatores bioclimáticos é essencial para entender os limites de distribuição das espécies, especialmente em regiões onde coexistem duas ou mais espécies. Portanto, este estudo visa aprimorar o entendimento das variáveis bioclimáticas que determinam a distribuição de três espécies de batata-silvestre (*S. chacoense*, *S. commersonii* e *S. malmeanum*) ocorrentes no Cone Sul da América do Sul.

2. METODOLOGIA

Amostragem: 236 espécimes de *S. chacoense* (105), *S. commersonii* (85) e *S. malmeanum* (46) revisados taxonomicamente e cujos dados de distribuição foram obtidos em acervos de herbários no Brasil (ECT, HBR, ICN), Estados Unidos (BRIT, F, MO, WIS) e Uruguai (MVM, MVFA, MVJB) (Figura 1). Registros duplicados e ocorrências duvidosas foram removidas no QGIS (versão 3.36.01 Maidenhead; QGIS, 2024) e as coordenadas foram arredondadas para cinco casas decimais com funções *round* e *duplicated* no R (R CORE TEAM, 2024), resultando em 110 pontos únicos.

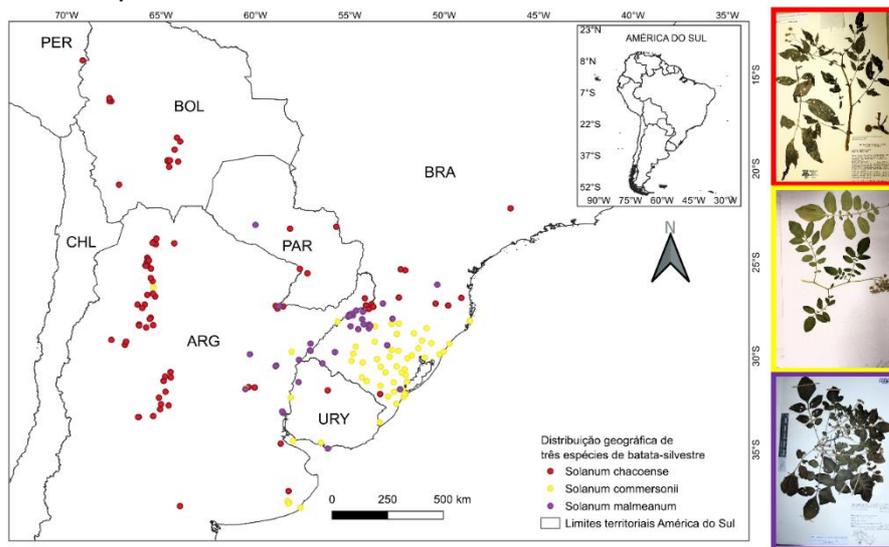


Figura 1. Distribuição geográfica das espécies *Solanum chacoense*, *S. commersonii* e *S. malmeanum* no Cone Sul da América do Sul.

Seleção de variáveis preditoras: foram utilizadas 19 variáveis bioclimáticas do arquivo CliMond (HUTCHINSON, 2009; KRITICOS et al., 2012) e dados de elevação (FICK; HIJMANS, 2017). **Tratamento de colinearidade:** as variáveis preditoras foram analisadas usando o Fator de Inflação da Variância (VIF), e as com VIF acima de 5 foram removidas (GUISAN et al., 2002; 2017). **Amostragem de pseudoausências:** os dados de fundo foram ajustados para corresponder ao viés amostral dos dados de ocorrência (PHILLIPS et al., 2009), com buffers (VANDERWAL et al., 2009; GALLE et al., 2024), e pontos de fundo amostrados aleatoriamente nos buffers. **Treinamento dos modelos:** modelos MaxEnt e BRT foram treinados no RStudio (R CORE TEAM, 2024), com 80% dos dados para treinamento e 20% para teste, usando *k-fold* do pacote *dismo* (HIJMANS et al., 2020). Variáveis colineares foram removidas com *vifstep* (NAIMI et al., 2014), e dados de presença convertidos em pontos espaciais com o pacote *sp* (PEBESMA; BIVAND, 2021). Modelos MaxEnt foram treinados com a função *maxent* (URBANEK, 2021), seguindo o protocolo de GALLE et al., (2024). O modelo BRT usou a função *gbm.step* do *dismo* (HIJMANS et al., 2020), ajustado para evitar *overfitting*. **Avaliação dos modelos:** O desempenho foi avaliado usando AUC (*Area Under the Receiver Operating Characteristic Curve*), COR (Correlação de Pearson), estatística de Kappa e TSS (*True Skills Statistic*) (BROENNIMANN et al., 2021), com previsões ponderadas por escores AUC (ARAUJO; NEW, 2007). **Previsões ponderadas:** As previsões foram integradas em modelos de ensemble (modelos conjuntos), combinando as vantagens de MaxEnt e BRT (ARAUJO; NEW, 2007; CRIMMINS et al., 2013).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para *S. chacoense*, o modelo BRT foi superior e as principais variáveis que contribuíram foram a sazonalidade da temperatura (26,12%) e a variação diária da temperatura (25,87%), destacando a sensibilidade às flutuações térmicas, além da precipitação do mês mais seco (16,48%) e do mês mais úmido (16,27%), que refletem a resposta aos padrões de chuva e déficit hídrico em fases críticas.

Em relação a *S. commersonii*, o modelo Maxent destacou-se e as principais variáveis que influenciaram a distribuição foram a sazonalidade da precipitação (37,7%) e a temperatura máxima do mês mais quente (23,3%), sugerindo que a espécie é sensível a flutuações de precipitação e calor extremo. Isotermalidade (18,3%) e a temperatura mínima do mês mais frio (15,9%) também foram importantes, a última destacando a tolerância da espécie ao frio e à geada.

Já em *S. malmeanum*, a predição do modelo BRT obteve melhores índices, apontando a temperatura média do trimestre mais seco (23,78%) e do trimestre mais quente (14,7%) como principais preditores, sugerindo que a espécie é fortemente influenciada pela temperatura durante o período mais seco e quente do ano, uma adaptação crucial para sobreviver com disponibilidade intermitente de água. A sazonalidade da precipitação (12,93%) e a elevação (10,75%) também foram importantes, de acordo com a ocorrência em ambientes onde a altitude e os padrões sazonais de chuva são determinantes. A menor contribuição de variáveis como a variação diária da temperatura e a precipitação do mês mais úmido sugere que a espécie pode ser mais adaptada a oscilações diárias de temperatura e à chuva na estação chuvosa.

4. CONCLUSÕES

Os modelos de nicho climático aplicados permitiram determinar as principais variáveis bioclimáticas na distribuição das batatas-silvestres *S. chacoense*, *S. commersonii* e *S. malmeanum* no Cone Sul da América do Sul, as quais diferem conforme os requisitos ecológicos de cada espécie.

A comparação entre os modelos aplicados demonstrou que BRT ofereceu resultados superiores para *S. chacoense* e *S. malmeanum*, enquanto MaxEnt destacou-se para *S. commersonii*.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, MB.; GUIAN, A. Five (or so) challenges for species distribution modelling. **Journal of Biogeography**, v. 33, n. 10, p. 1677-1688, 2006.
- ARAÚJO, MB.; NEW, M. Ensemble forecasting of species distributions. **Trends in ecology & evolution**, v. 22, n. 1, p. 42-47, 2007.
- BROENNIMANN, O.; DI COLA, V.; GUIAN, A. 2021. **Ecospat: spatial ecology miscellaneous methods** (Version 3.2) [Computer software]. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=ecospat>
- CORRELL D. **The potato and its wild relatives**. Texas Research Foundation, Renner, USA, 1962.
- FICK, SE.; HIJMANS, RJ. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 12, p. 4302-4315, 2017.
- GALLE, NA.; et al. Ecological niche modeling for the prediction of suitable environments for *Chrysodeixis chalcites* (Noctuidae) in the contiguous United States. **Biological Invasions**, v. 26, n. 10, p. 3301-3313, 2024.

- GUISAN, A.; et al. Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene. **Ecological Modelling**, v. 157, n. 2-3, p. 89-100, 2002.]
- GUISAN, A.; et al. **Habitat suitability and distribution models: with applications in R**. Cambridge University Press, 2017.
- HAWKES JG.; HJERTING JP. **The potatoes of Argentina, Brazil, Paraguay and Uruguay. A biosystematic study**. Oxford University Press, London, 1969.
- HIJMANS RJ.; SPOONER DM. Geographic distribution of wild potato species. *American journal of Botany*, v. 88, n. 11, p. 2101-2112, 2001.
- HIJMANS, RJ. et al. 2020. **Dismo: species distribution modeling** (Version 1.3-3) [Computer software]. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=dismo>
- HUTCHINSON, M.; XU, T.; et al. 2009. **ANUCLIM 6.0 User's Guide**. Australian National University, Fenner School of Environment and Society, 2009.
- KHOURY, CK.; et al. Crop wild relatives of pigeonpea [*Cajanus cajan* (L.) Millsp.]: Distributions, ex situ conservation status, and potential genetic resources for abiotic stress tolerance. **Biological Conservation**, v. 184, p. 259-270, 2015.
- KRITICOS, DJ.; et al. CliMond: global high resolution historical and future scenario climate surfaces for bioclimatic modelling. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 3, p. 53–64, 2012.
- MENTZ LA.; OLIVEIRA PL. **O gênero *Solanum* na Região Sul do Brasil**. São Leopoldo, Pesquisas, Série Botânica v. 54, p. 1-327, 2004.
- NAIMI, B.; et al. Where is positional uncertainty a problem for species distribution modelling? **Ecography**, v. 37, n. 2, p. 191-203, 2014.
- PEBESMA, E.; BIVAND, RS. 2021. **Sp: classes and methods for spatial data** (Version 1.4-6) [Computer software]. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=sp>
- PHILLIPS, SJ.; et al. Sample selection bias and presence-only distribution models: implication for background and pseudo-absence data. **Ecological Applications**, v. 19, n. 1, p. 181-197, 2009.
- R CORE TEAM. 2024. **R: a language and environment for statistical computing** (Version 4.3.3) [Computer software]. R Foundation for Statistical Computing. Disponível em: <https://www.R-project.org/>
- SPOONER, DM.; et al. Systematics, diversity, genetics, and evolution of wild and cultivated potatoes. **The Botanical Review**, v. 80, p. 283-383, 2014.
- SPOONER, DM.; et al. Taxonomy of wild potatoes in northern South America (*Solanum* section *Petota*). **Systematic Botany Monographs**, v. 108, p. 1-305, 2019.
- SPOONER, DM.; et al. Taxonomy of wild potatoes and their relatives in southern South America (*Solanum* sects. *Petota* and *Etuberosum*). **Systematic Botany Monographs**, p. 1-240, 2016.
- TSHWENE-MAUCHAZA, B.; AGUIRRE-GUTIÉRREZ, J. Climatic drivers of plant species distributions across spatial grains in Southern Africa tropical forests. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 2, p. 69, 2019.
- URBANEK, S. 2021. **RJava: low-level R to Java interface** (Version 1.0-6) [Computer software]. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=rJava>
- VANDERWAL, J.; et al. 2009. Selecting pseudoabsence data for presence-only distribution modeling: how far should you stray from what you know? **Ecological Modelling**, v. 220, n. 4, p. 589-594, 2009.