

Ecología

Análisis exploratorio de la amplitud ambiental y requerimientos ecológicos para identificar áreas potenciales de muestreo y cultivo de *Elionurus muticus* (Poaceae) en América del Sur

Exploratory analysis of the environmental amplitude and ecological requirements to identify potential sampling and cultivation areas for *Elionurus muticus* (Poaceae) in South America

María Camila Bagliani ^{a, b}, Gisela Mariel Via do Pico ^a,
Viviana G. Solis-Neffa ^{a, b} y Ercilia María Sara Moreno ^{a, b, *}

^a Universidad Nacional del Nordeste, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Instituto de Botánica del Nordeste, Sargento Cabral 2131, c.c. 209, 3400 Corrientes, Argentina

^b Universidad Nacional del Nordeste, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura, Av. Libertad 5460, 3400 Corrientes, Argentina

*Autor para correspondencia: em.sara.moreno@exa.unne.edu.ar (E.M.S. Moreno)

Recibido: 23 septiembre 2024; aceptado: 8 enero 2025

Resumen

Elionurus muticus posee un gran potencial industrial y capacidad de producción; no obstante, se carece de información sobre sus requerimientos ecológicos. Aquí analizamos su distribución potencial actual y futura en América del Sur mediante modelado de nicho ecológico para establecer estrategias de muestreo, identificar regiones óptimas de cultivo y evaluar el impacto del cambio climático en su distribución. Se estimó una distribución potencial de 4,573,895.843 km². Las áreas de mayor probabilidad de presencia fueron el noroeste de la Sabana Uruguaya, Chaco Húmedo, Campos y Malezales, norte de la Sabana Inundada del Paraná, suroeste del Espinal y sureste de la Pampa Húmeda. Las variables bioclimáticas presentaron una mayor amplitud comparadas con las edáficas. La temperatura mínima del mes más frío, la precipitación del mes más cálido y el pH del suelo mostraron el mayor porcentaje de contribución al modelo. En las 12 combinaciones de escenarios futuros analizados, la distribución se mantuvo estable. La mayoría de las variables mostraron intervalos de valores uniformes. El suroeste del Cerrado, oeste de la Sabana Uruguaya, y Campos y Malezales destacaron como áreas altamente potenciales y estables propicias para el muestreo, cultivo y aprovechamiento eficiente de *E. muticus* en América del Sur.

Palabras clave: Distribución potencial; Cambio climático; Modelado de nicho; Cobertura de suelo

Abstract

Elionurus muticus has a high industrial potential and production capacity. However, information on its ecological requirements is lacking. Here we analyze its current and future potential distribution in South America using ecological niche modelling to establish sampling strategies, identify optimal growing regions, and assess the impact of climate change on its distribution. A potential distribution of 4,573,895.843 km² was estimated. The areas with the highest probability of occurrence were the northwest of the Uruguayan Savannah, Humid Chaco, Campos and Malezales, north of the Paraná Flooded Savannah, southwest of the Espinal and southeast of the Humid Pampa. The bioclimatic variables showed a greater amplitude compared to the edaphic variables. Minimum temperature of the coldest month, precipitation of the warmest month and soil pH showed the highest percentage contribution to the model. In the 12 combinations of future scenarios analyzed, the distribution remained stable. Most variables showed uniform ranges of values. The southwest of the Cerrado, west of the Uruguayan Savannah, and Campos and Malezales stood out as highly potential and stable areas, suitable for sampling, cultivation and efficient utilization of *E. muticus* in South America.

Keywords: Potential distribution; Climate change; Niche modeling; Land cover

Introducción

Elionurus muticus (Spreng.) Kuntze (Andropogoneae, Poaceae) es la especie más ampliamente distribuida del género, encontrándose en América, África y Asia. Esta especie constituye un valioso recurso renovable con múltiples aplicaciones. Bajo un manejo adecuado, que generalmente implica el uso del fuego para mejorar la palatabilidad de las hojas, *E. muticus* puede ser utilizada como forrajera para la alimentación del ganado (Nicola y Rúgolo-de-Agrasar, 1987). Además, se han reportado varios usos en la medicina popular (Stuckert, 1904; Tredgold, 1986), así como su potencial como antioxidante natural y fuente de compuestos bioactivos útiles (Dzingirai et al., 2007). Debido a su actividad antibacteriana, antifúngica, citotóxica y antimicrobiana, también se ha sugerido su uso como alternativa a los fungicidas sintéticos en la agroindustria (Cacciabue et al., 2005; Hess et al., 2007; Sabini et al., 2006). Una de las características más interesantes de *E. muticus* es su potencial como productor de aceites aromáticos, ya que su resina contiene más del 90% de citral, un compuesto con un fuerte aroma cítrico, fácil de extraer (Castro y Ramos, 2003). Por este motivo, se ha propuesto a esta especie como un sucedáneo de la citronela o como una fuente alternativa de extracción de aceite (Fester et al., 1961; Füller et al., 2014; Vidal, 1954). El citral es utilizado como materia prima en la industria farmacéutica para sintetizar iononas, una de las cuales se emplea para la síntesis de vitamina A (Koshima et al., 2006), lo que confiere a esta especie un gran interés para la industria aromática, alimentaria y cosmética (Heydorn et al., 2003; Kolb et al., 2007).

A pesar de su amplia distribución, su capacidad de producción en diferentes agroecosistemas, sus propiedades bioactivas y el potencial productivo de sus

aceites esenciales, *E. muticus* permanece subexplotada. Se carece de información detallada sobre los requerimientos ecológicos y los factores, tanto naturales como antrópicos (usos agropecuarios de la tierra, avance de los cascos urbanos, silvicultura, entre otros), que influyen en su distribución geográfica. Este tipo de información es fundamental para establecer bases que permitan proponer estrategias de muestreo de campo, identificar las regiones más adecuadas para su cultivo, y evaluar el impacto de diferentes escenarios futuros de cambio climático en la distribución de la especie. La distribución espacial y temporal de una especie refleja sus interacciones con el entorno (Brown et al., 1995), influyen sus requisitos ecológicos específicos y su tolerancia a las desviaciones de condiciones óptimas (Hirzel et al., 2002). Las predicciones acerca de la distribución geográfica de las especies pueden basarse en modelos matemáticos que relacionan las observaciones de campo con un conjunto de variables ambientales (Hirzel et al., 2006; Kirkpatrick et al., 1997). Estos factores ambientales pueden afectar de manera diferente la distribución de las especies a distintas escalas espaciales. A escala regional, el clima es el principal factor limitante, mientras que, a escala local, la distribución de los organismos puede estar condicionada por las características geomorfológicas y edáficas (Bray y Curtis, 1957; Hutchinson, 1957; Whittaker, 1956). Entre las múltiples aplicaciones que tienen los modelos de distribución de especies, los análisis de modelado de nicho ecológico (MNE) han sido empleados para analizar la distribución potencial de diversas especies cultivadas, así como para identificar las áreas óptimas para su cultivo y de especies con potencial para el cultivo (Akpoti et al., 2020; d'Eeckenbrugge et al., 2014; Ghehsareh Ardestani et al., 2021; Hao et al., 2012; Hernández et al., 2018; Idohou et al., 2017; Lentz et al., 2008; Nagahama y Bonino,

2020; Plath et al., 2016; Ramírez-Cabral et al., 2016; Ramírez-Gil et al., 2018; Vitali et al., 2015). Los análisis de distribución basados en MNE permiten describir la influencia de las condiciones ambientales actuales en la distribución geográfica real y potencial de las especies (Pulliam, 2000; Soberón y Peterson, 2005). En especies cultivadas, el MNE se ha utilizado para estudiar el impacto de los cambios climáticos sobre su distribución potencial e incluso para comprender cómo los factores antropogénicos, junto con los ambientales, influyen en el nicho ecológico realizado de las especies (Beck, 2013; Jing-Song et al., 2012; Kodis et al., 2018; Lopes et al., 2017; Spooner et al., 2010). Las predicciones espaciales realizadas a partir de los MNE permiten incrementar la eficiencia y reducir los esfuerzos y costes de muestreo en el terreno, mediante la identificación de localidades con altos valores de idoneidad del hábitat. Sobre esta base, es posible hacer predicciones y orientar estrategias de uso sostenible de los recursos naturales (Guisan et al., 2005, 2006).

En este contexto, el presente trabajo se enfocó en el modelado de la distribución potencial, actual y futura de *E. muticus* en América del Sur. El objetivo principal fue generar un modelo predictivo que identifique las áreas más probables de ocurrencia de la especie, determinar sus requerimientos ecológicos, contribuir a la comprensión del efecto de los cambios climático-ambientales y del uso y cobertura del suelo sobre sus patrones de distribución, y establecer las bases para futuras estrategias de muestreo y uso sostenible de la especie.

Materiales y métodos

El área de modelado espacial (área M) es el espacio geográfico y ambiental donde se ha registrado la presencia de una especie, delimitada en función del conocimiento de su biología y su capacidad de dispersión (Soberón y Peterson, 2005). Para delimitar el área M en este estudio, se utilizaron los registros de presencia de *E. muticus* en América del Sur y para evitar estimaciones de nicho sesgadas que surgen al tratar como ausencia áreas que son climáticamente adecuadas, pero no están ocupadas debido al aislamiento geográfico o ausencia de registros por falta de recolectas (Oney et al., 2013), se creó un área buffer de 300 km alrededor del conjunto de datos de presencia para toda la especie. Se creó una región buffer de aproximadamente 300 km, abarcando casi la totalidad de la región neotropical de América del Sur, desde 11.33° N hasta 44.51° S y desde 31.44° O hasta 78.98° O, comprendiendo 19,636,747.99 km². Esta macroregión incluye casi todos los biomas conocidos, abarcando zonas de selvas tropicales y subtropicales húmedas y secas,

sabanas y praderas tropicales y subtropicales, praderas y matorrales de montaña. Siguiendo la clasificación de ecorregiones de Olson et al. (2021), el área abarca 102 ecorregiones (fig. 1).

La macroregión se caracteriza por una gran diversidad de relieves, destacando la cordillera de los Andes, que atraviesa de norte a sur el borde occidental. También se observan extensas llanuras, mesetas y numerosas cuencas hidrográficas, algunas de las más grandes del mundo. En cuanto a los climas, los tropicales son dominantes en toda la región intertropical de América del Sur. Los climas ecuatoriales presentan temperaturas y precipitaciones muy estables en la zona ecuatorial; mientras que los climas monzónicos se encuentran a medida que se aleja del ecuador, donde las precipitaciones y las temperaturas pierden regularidad. La región intertropical también incluye climas estacionales de sabana, con una marcada estación seca y otra húmeda, a medida que se degrada la regularidad climática ecuatorial.

Elionurus muticus es una especie herbácea, cespitosa y perenne, ampliamente distribuida en América, desde México hasta la Argentina y Uruguay (Tropicos, 2022; Zuloaga et al., 2012). Esta especie puede formar extensas poblaciones, constituyendo praderas en las regiones medanosas y arenosas de la región semiárida pampeana, donde actúa como un valioso fijador de suelos. Además, es una especie dominante en las sabanas de la Mesopotamia argentina y en los aybales del Chaco semiárido, donde forma espartillares extensos y casi puros, acompañados frecuentemente por leguminosas (Marino et al., 2013). Las plantas pueden alcanzar 1 m de altura y presentan hojas de color verde grisáceo que se enrollan en los extremos durante épocas de sequía, manteniéndose verdes durante todo el año. Sus rizomas son breves y superficiales (Molina et al., 2006). Es una especie monoica, que florece entre octubre y diciembre, y aunque puede propagarse por medio de semillas, la propagación más común es mediante la división de matas (Coelho, 2018). *Elionurus muticus* exhibe una gran diversidad morfológica, lo que resulta en una compleja taxonomía y una gran cantidad de sinonimias (Zuloaga et al., 2003). Además de esta diversidad morfológica, se ha observado una considerable variación en la composición química de sus aceites esenciales, identificándose, según los componentes presentes, 5 quimiotipos diferentes (Füller, 2013).

Se realizó el modelado de nicho ecológico (MNE) predictivo para evaluar la distribución potencial de *E. muticus* tanto en el tiempo presente como en escenarios futuros. Se realizaron 2 MNE para el presente, uno utilizando variables bioclimáticas y edáficas, y el otro utilizando únicamente variables bioclimáticas. Este

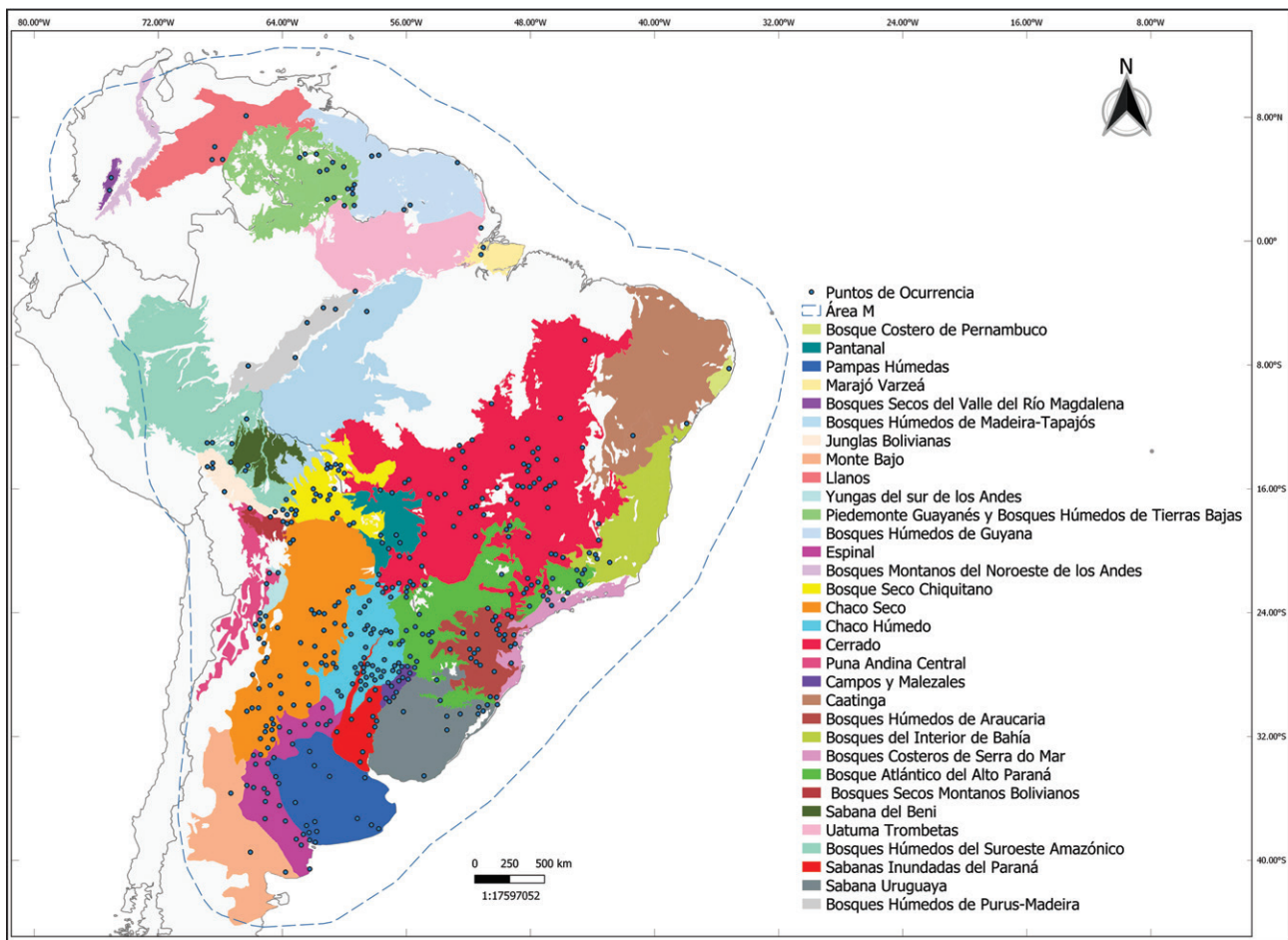


Figura 1. Distribución geográfica actual de *Elionurus muticus* en las diferentes ecorregiones de América del Sur (definidas según Olson et al., 2001) y puntos de presencia utilizados para el análisis de modelado de nicho ecológico. En línea punteada se indica el área M. Mapa elaborado por M.C. Bagliani y G.M. Via do Pico.

último fue utilizado para la extrapolación a los escenarios climáticos futuros. Se obtuvieron 2,932 puntos de presencia georreferenciados de *E. muticus* en todo su rango de distribución en América del Sur. Las fuentes incluyeron ejemplares del herbario del Instituto de Botánica del Nordeste (CTES) (94 registros) y las bases de datos Documenta Florae Australis (370 registros, <http://www.darwin.edu.ar/iris/>), SpeciesLink (580 registros, <https://splink.cria.org.br/>), GBIF (1,777 registros, <https://www.gbif.org/es/>) y Tropicos (111 registros, Tropicos.org, Missouri Botanical Garden). Las sinonimias que presenta el taxón fueron incluidas en la búsqueda de puntos de presencia, para lo cual se tuvo como criterio el catálogo de Poaceae del Nuevo Mundo (Zuloaga et al., 2003), en el cual se reconocen 60 sinónimos para la especie, como así también su basónimo. Solo se utilizaron aquellos puntos de presencia que correspondían a registros de herbario. Con

la plataforma Wallace (Kass et al., 2018, 2023), habilitada en R ver. 3.3.1 (R Core Team, 2020) se eliminaron los puntos de presencia duplicados y aquellos con una distancia de separación menor a 30 km, lo cual permite evitar la sobreestimación de los modelos por el efecto de la autocorrelación espacial (Peterson y Nakazawa, 2008). Luego del filtrado de los datos, se retuvieron 391 puntos de presencia (material suplementario: tabla S1).

Se descargaron las 19 variables bioclimáticas de la base WorldClim Global Climate GIS version 2.1 (www.worldclim.org) (Fick y Hijmans, 2017; Hijmans et al., 2005, tabla 1) a una resolución espacial de 2.5 arc-min (~ 5 km) y en formato GeoTiff (.tiff). Se obtuvieron 11 variables edáficas de la base ISRIC-World Soil Information database (Hengl et al., 2014, 2017; <http://soilgrids1km.isric.org>; tabla 1) a una resolución de 250 m y fueron transformadas a una resolución de 2.5 arc-

min (~ 5 km). Las capas ambientales fueron cortadas por el área M para la construcción de los modelos de *E. muticus*, se seleccionaron las variables mediante análisis de componentes principales (ACP) y de correlación de Pearson (≤ 0.8) realizados en R ver. 3.3.1. Dichos análisis se realizaron usando el conjunto de variables bioclimáticas y edáficas por separado. Las variables se seleccionaron en función del número de componentes que, sumados, explican como mínimo 85% de la variabilidad observada y luego se verificó que no se encuentren correlacionadas.

Para evaluar la distribución potencial actual de *E. muticus* se realizó el MNE utilizando el algoritmo de máxima entropía implementado en MaxEnt v3.4.4 (Phillips et al., 2006, 2017, www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/). Los parámetros utilizados para ejecutar MaxEnt se calibraron utilizando la plataforma Wallace (Kass et al., 2018, 2023) basada en R. Se seleccionó un único conjunto de parámetros para los modelos tanto del presente como del futuro tomando como criterio de elección el valor AICc más bajo, cercano a 0. Basados en estos resultados, se ejecutó MaxEnt utilizando las clases de características (“feature classes”) Linear Quadratic Hinge (LQH), el multiplicador de regularización 1, 10 réplicas, 1,000 iteraciones máximas, 10,000 puntos máximos de “background”, “replicate run type” (“Crossvalidate”) y formato de salida CogLog. Con estos ajustes se obtuvieron los modelos finales transformando los mapas probabilísticos en mapas binarios (presencia 0 - ausencia 1) empleando 10% inferior de los datos de entrenamiento como valor umbral para cada predicción. Los rangos de los valores de probabilidad de presencia considerados bajos fueron 24-48%, medio 48-73% y alto 73-100%. Para la visualización de las predicciones y edición de los mapas se utilizó Quantum GIS 3.4.2 (QGIS Development Team, <http://www.qgis.org/>). El análisis de la distribución potencial se llevó a cabo con base a las ecorregiones caracterizadas por Olson et al. (2021) para el área de estudio.

Con el fin de obtener una estimación más realista del área de distribución de *E. muticus* y analizar el impacto del uso de la tierra, se ajustó el mapa del MNE bioclimático y edáfico actual a la información de cobertura y uso del suelo. Para esto se utilizó un mapa de uso y cobertura del suelo derivado de las imágenes de ESRI 2020 Global Land Use Land Cover de Sentinel-2 de la ESA (material suplementario: fig. S1). El mismo consiste en predicciones de uso y cobertura del suelo para 10 clases a lo largo del año 2021 (material suplementario: tabla S2; ESRI 2020 Global Land Use Land Cover; Karra et al., 2021; <https://www.arcgis.com/apps/instant/media/index.html?appid=f9c2d38533d440078f17678ebc20e8e2>). Del total de clases,

se excluyeron del mapa las áreas donde la distribución de *E. muticus* resulta improbable (agua, vegetación inundada, cultivos, área construida, suelo desnudo y nieve/hielo).

Para predecir el impacto del cambio climático en la distribución de *E. muticus* se realizaron interpolaciones climáticas globales bajo distintos escenarios del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPPC) que asumen diferentes incrementos de gases de efecto invernadero. Las capas bioclimáticas de los escenarios futuros fueron extraídas de WorldClim v.2.0 con la misma resolución y formato que los datos para el presente. Se utilizaron 2 modelos de circulación global (MCG), MIROC6 y MRI-ESM2-0, para 2 trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP por sus siglas en inglés), 2.6 (mitigación) y 8.5 (pesimista), y 3 periodos (años 2041-2060, 2061-2080 y 2081-2100). Para proyectar los modelos se utilizaron los parámetros del modelo bioclimático de distribución actual con el mejor ajuste estadístico, utilizando el mismo umbral que para los modelos del presente.

Utilizamos el análisis multidimensional de superficies de similitud ambiental (MESS) en Maxent para determinar áreas con condiciones ambientales novedosas. Este análisis nos da la posibilidad de mapear en el espacio geográfico los resultados de la comparación de espacios climáticos (Elith et al., 2010). El análisis MESS representa cuán similar es un punto a un conjunto de puntos de referencia, con respecto a un conjunto de variables predictoras. Los valores MESS negativos indican áreas de extrapolación del modelo en las que el valor de al menos un descriptor ambiental está más allá del rango ambiental cubierto por los registros de solo presencia disponibles. Por el contrario, los valores MESS positivos indican áreas de proyección del modelo en las que los valores de los descriptores ambientales están dentro del rango ambiental cubierto por los registros de solo presencia. El índice MESS se estimó siguiendo el procedimiento descrito por Elith et al. (2010). El análisis arroja 2 resultados: un mapa (MESS), donde las áreas con valores negativos presentan una o más variables fuera del rango presente en los datos de entrenamiento (MNE presente) y otro mapa que muestra la variable más disímil (MoD), es decir, la que está más alejada de su rango de entrenamiento (Elith et al., 2010).

Teniendo en cuenta los puntos de presencia de la especie, se determinó el rango de valores que adopta cada una de las variables empleadas para los distintos MNE, representándolos en gráficos de caja elaborados en R. A su vez, a partir de los gráficos de comportamiento de las variables arrojados por MaxEnt, se determinó el valor óptimo de cada una de las variables en el cual se predice el mayor valor de probabilidad de presencia de la especie.

Tabla 1

Código, descripción y unidad de medida de cada variable bioclimática y edáfica obtenida de las bases WorldClim Global Climate GIS e ISRIC-World Soil Information, respectivamente. Con un asterisco se identifican las variables no correlacionadas y utilizadas para la construcción de los modelos de nicho ecológico de *Elionurus muticus*. Entre paréntesis se indica la unidad de medida.

Código de la variable	Descripción
BIO 1	Temperatura media anual (°C)
BIO 2	Rango medio diario (media mensual [temperatura máxima-temperatura mínima]) (°C)
BIO 3	Isotermalidad ($BIO\ 2 / BIO\ 7 \times (100)$) (°C)
BIO 4	Rango medio diario (media mensual (temperatura máxima-temperatura mínima)) (°C)
BIO 5*	Temperatura máxima del mes más cálido (°C)
BIO 6*	Temperatura mínima del mes más frío (°C)
BIO 7	Rango anual de temperatura (BIO5 - BIO6) (°C)
BIO 8	Temperatura media del trimestre más húmedo (°C)
BIO 9	Temperatura media del trimestre más cálido (°C)
BIO 10	Temperatura media del trimestre más cálido (°C)
BIO 11	Temperatura media del trimestre más frío (°C)
BIO 12	Precipitación anual (mm)
BIO 13	Precipitación del mes más húmedo (mm)
BIO 14*	Precipitación del mes más seco (mm)
BIO 15*	Estacionalidad en las precipitaciones (coeficiente de variación)
BIO 16	Precipitación del trimestre más húmedo (mm)
BIO 17*	Precipitación del cuatrimestre más seco (mm)
BIO 18*	Precipitación del mes más cálido (mm)
BIO 19*	Precipitación del cuatrimestre más frío (mm)
BLDFIE*	Densidad aparente (tierra fina) (kg/m)
CECSOL	Capacidad de intercambio catiónico del suelo (cmolc/kg)
CLYPPT	Porcentaje en peso de las partículas de arcilla ($< 0.0002\ mm$) (%)
CRFVOL*	Porcentaje volumétrico de fragmentos gruesos ($> 2\ mm$) (%)
NITRÓGENO (N)*	Suma de nitrógeno Kjeldahl total (amoníaco, nitrógeno orgánico y reducido) y nitrato-nitrito (g/kg)
ORCDRC*	Contenido de carbono orgánico del suelo (por mil)
PHIHOX*	Índice de pH medido en solución acuosa (pH)
SLGWRB*	Grado de suelo sódico (°)
SLTPPT*	Porcentaje en peso de las partículas de limo ($0.0002 - 0.05\ mm$) (%)
SNDPPT	Porcentaje en peso de las partículas de arena ($0.05 - 2\ mm$) (%)
WWP*	Capacidad de agua disponible en el suelo (fracción volumétrica) hasta el punto de marchitamiento (%)

Resultados

Luego del filtrado y depuración de los datos de presencia, se obtuvo una base de datos de 391 registros para *E. muticus* en 16 ecorregiones (fig. 1, material suplementario: tabla S1). Se seleccionaron 7 variables bioclimáticas (BIO 5, BIO 6, BIO 14, BIO 15, BIO 17, BIO

18 y BIO 19) y 8 edáficas (BLDFIE, CRFVOL, nitrógeno, ORCDRCI, PHIHOX, SLGWRB, SLTPPT y WWP) no correlacionadas para realizar los MNE (tabla 1).

Los modelos de distribución potencial de *E. muticus* en el presente mostraron un buen desempeño, con un AUC promedio de 0.82 cuando solo se utilizaron variables bioclimáticas y un AUC de 0.86 cuando se utilizaron tanto

variables bioclimáticas como edáficas. El valor de umbral de 10% fue de 0.28 para ambos modelos. La contribución de las variables bioclimáticas y edáficas a los modelos obtenidos se resume en la tabla 2. Las variables con mayor porcentaje de contribución al modelo presente, basado en datos bioclimáticos, fueron la temperatura mínima del mes más frío (BIO 6: 55.1%) y la precipitación del mes más cálido (BIO 18: 24%). Al añadir las variables edáficas, la BIO 6 (27.4%) y BIO 18 (19.4%) continuaron como las variables de mayor contribución al modelo, seguidas por el pH del suelo (19%).

El resultado del MNE para el presente basado en datos bioclimáticos mostró un área de idoneidad de 7,380,279.072 km², que coincide con los respectivos puntos de presencia de la especie y se extiende ligeramente más allá de los rangos actuales. Las áreas con mayor probabilidad de presencia de la especie incluyeron las ecorregiones del Espinal, Pampas Húmedas, Sabana inundada del Paraná, sudeste del Chaco Seco, oeste de las Yungas del sur de los Andes, oeste de la Sabana Uruguaya, Chaco Húmedo, Campos y Malezales, Bosques húmedos de Araucaria, Bosques Costeros de Serra do Mar, Bosque Atlántico del Alto Paraná, el sur del Cerrado, sur de los Bosques del Interior de Bahía Yungas Bolivianas, el norte de la

Cordillera oriental y parte del sureste de las Yungas Peruvianas (fig. 2A). Al incorporar datos edáficos, el MNE mostró una distribución más ajustada, con una reducción de 1,026,891 km² de las áreas de alta probabilidad de presencia (6,353,387.492 km²), principalmente para las Pampas Húmedas, la Sabana Inundada del Paraná y el Cerrado (fig. 2B, tabla 3).

Al integrar las capas de cobertura y uso del suelo al MNE realizado con variables bioclimáticas y edáficas, la superficie de áreas con alta probabilidad de presencia disminuyó notablemente (4,573,895.84 km²) con una diferencia de 2,806,383.23 km² respecto al modelo realizado solo con variables bioclimáticas y 1,779,491.64 km² respecto al modelo que integra también variables edáficas (tabla 3). Dicha reducción fue notable en las ecorregiones Pampa Húmeda, Campos y Malezales, Bosques húmedos de Araucaria, Bosques costeros, Bosque Atlántico del Alto Paraná y Sabana Inundada del Paraná. Las áreas de alta probabilidad se restringieron al noroeste de las ecorregiones de la Sabana Uruguaya, el Chaco Húmedo, Campos y Malezales, el norte de la Sabana inundada del Paraná, suroeste del Espinal y sureste de la Pampa Húmeda (fig. 2 C).

Tabla 2

Porcentaje de contribución de las variables bioclimáticas, y bioclimáticas más edáficas a los MNE del presente de *Elionurus muticus*.

Variable	MNE con variables bioclimáticas	MNE con variables bioclimáticas y edáficas
BIO 6	55.1	27.4
BIO 18	24	19.4
BIO 14	9.5	7.8
BIO 5	6.9	7.4
BIO 15	2.1	1.2
BIO 19	1.8	0.7
BIO 17	0.6	0.4
PHIHOX	-	19
NITRÓGENO	-	7.8
WWP	-	2.1
SLGWRB	-	2
SLTPPT	-	2
BLDFIE	-	1.8
ORCDR	-	0.6
CRFVOL	-	0.3

Tabla 3

Superficie potencial predicha (km²) para los modelos de nicho ecológico (MNE) presentes y futuros de *Elionurus muticus*. MCG: Modelos de circulación global; SSP: trayectorias socioeconómicas compartidas.

MNE Presente		
Variables climáticas	7,380,279.07	
Variables climáticas + edáficas	6,353,387.49	
Variables climáticas + edáficas + uso y cobertura del suelo	4,573,895.84	
MNE Futuros		
MCG: MIROC	SSP 2.6 (optimista)	SSP 8.5 (pesimista)
2041-2060	6,865,148.78	6,682,641.73
2061-2080	6,555,047.40	6,495,266.01
2081-2100	6,417,607.24	6,807,334.46
MCG: MRI-ESM-2-0		
2041-2060	6,686,153.21	6,411,355.26
2061-2080	6,808,911.11	6,596,375.60
2081-2100	6,541,573.15	6,717,005.20

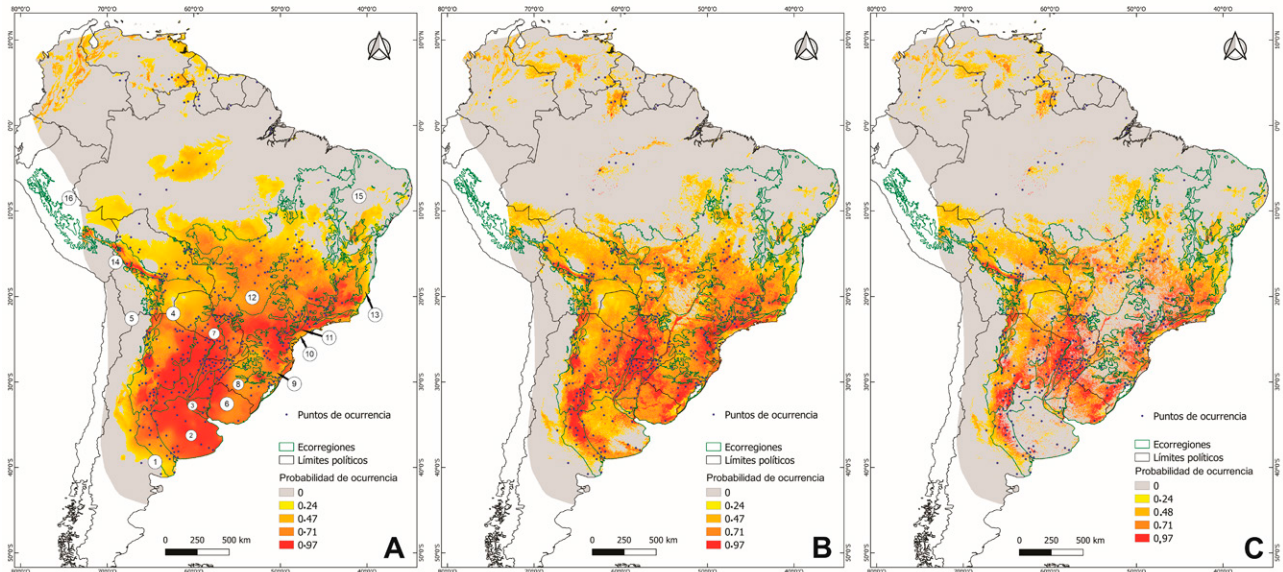


Figura 2. Mapas resultantes del modelado de nicho ecológico de *Elionurus muticus* en el presente. A, MNE basado en variables bioclimáticas. Los números indican las ecorregiones (definidas según Olson et al. [2001]) en las cuales existe la máxima probabilidad de presencia de la especie: 1, Espinal; 2, Pampas Húmedas; 3, Sabana inundada del Paraná; 4, Chaco Seco; 5, Yungas del sur de los Andes; 6, Sabana Uruguaya; 7, Chaco Húmedo; 8, Campos y Malezales; 9, Bosques húmedos de Araucarias; 10, Bosques Costeros de Serra do Mar; 11, Bosques Atlánticos del Alto Paraná; 12, Cerrado; 13, Bosques del Interior de Bahía; 14, Yungas Bolivianas; 15, Caatinga; 16, Yungas Peruvianas. B, MNE basado en variables bioclimáticas y edáficas. C, MNE basado en variables bioclimáticas y edáficas en combinación con el uso y cobertura de suelo. Mapas elaborados por M.C. Bagliani y G.M. Via do Pico.

Se probaron 12 combinaciones de diferentes escenarios futuros para predecir los cambios en la distribución de *E. muticus* (material suplementario: figs. S2-S5). En general, la distribución potencial de *E. muticus* se mantuvo estable y similar a los modelos del presente realizados únicamente con variables bioclimáticas (tabla 3). En los modelos futuros, la temperatura mínima del mes más frío (BIO 6) continuó siendo la variable con mayor contribución a los modelos, seguida por la precipitación del mes más cálido (BIO 18) y la precipitación del mes más seco (BIO 14) (tabla 4). El análisis MESS identificó áreas con condiciones ambientales muy similares entre los escenarios climáticos actuales y futuros (material suplementario: figs. S6, S7). Las áreas de distribución potencial futura proyectadas para *Elionurus muticus* están asociadas con valores MESS positivos, lo que indica que los resultados de los modelos Maxent tienen una alta confiabilidad. Las proyecciones futuras que mostraron mayor disparidad ambiental (valores MESS negativos) fueron principalmente los escenarios pesimistas del período 2081-2100 para ambos MCG (material suplementario: fig. S6). La temperatura máxima del mes más cálido (BIO 5) y la temperatura mínima del mes más frío (BIO 6) fueron las variables

que presentaron valores más disímiles en las proyecciones futuras (material suplementario: fig. S7).

En cuanto a la amplitud ambiental en la que *E. muticus* se encuentra actualmente en América del Sur, se observó que las variables bioclimáticas presentan una mayor amplitud en comparación con las variables edáficas (material suplementario: fig. S8). El grado de suelo sódico (SLGWRB) fue la variable con menor amplitud, seguida del porcentaje volumétrico de fragmentos gruesos (CFRVOL), el nitrógeno y el contenido de carbono orgánico del suelo (ORCDR). Por el contrario, la estacionalidad en las precipitaciones (BIO 15) fue la de mayor amplitud, seguida por la precipitación del mes más seco (BIO 14), la precipitación del cuatrimestre más seco (BIO 17), la temperatura mínima del mes más frío (BIO 6) y la temperatura máxima del mes más cálido (BIO 5).

En los diferentes escenarios futuros, la mayoría de las variables mostraron rangos de valores uniformes (material suplementario: fig. S9), destacándose la temperatura máxima del mes más cálido (BIO 5) y la temperatura mínima del mes más frío (BIO 6), que mostraron una tendencia de aumento en los valores medios entre los escenarios de mitigación y pesimista; mientras que la

Tabla 4

Valores del umbral de corte, porcentaje de contribución de las variables bioclimáticas y AUC promedio de los MNE futuros de *Elionurus muticus* para los 2 modelos de circulación global (MCG) utilizados. Modelos: MIROC6 y MRI-ESM2-0 para 2 trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP) 2.6 (mitigación) y 8.5 (pesimista) durante 3 períodos (2041-2060, 2061-2080 y 2081-2100). BIO 6: temperatura mínima del mes más frío (°C). BIO 18: precipitación del mes más cálido (mm). BIO 14: precipitación del mes más seco (mm). BIO 5: temperatura máxima del mes más cálido (°C). BIO 15: estacionalidad en las precipitaciones (coeficiente de variación) (mm). BIO 19: precipitación del cuatrimestre más frío (mm). BIO 17: precipitación del cuatrimestre más seco (mm).

Modelos de Circulación Global (MCG)	Trayectorias socio económicas	Periodo	Umbral 10%	Contribución de variables bioclimáticas (%)	AUC	
MIROC 6	SSP 2.6 (mitigación)	2041 - 2060	0.27	BIO 6	59.90	0.81
				BIO 18	21.30	
				BIO 14	7.70	
				BIO 5	5.70	
				BIO 19	2.40	
				BIO 15	2.00	
				BIO 17	1.10	
		2061 - 2080	0.27	BIO 6	60.30	0.82
				BIO 18	19.14	
				BIO 14	10.60	
				BIO 5	5.50	
				BIO 15	2.00	
				BIO 17	1.20	
				BIO 19	1.00	
		2081 - 2100	0.30	BIO 6	57.60	0.82
				BIO 18	19.90	
				BIO 14	10.20	
				BIO 5	7.50	
				BIO 15	2.00	
				BIO 19	1.80	
	SSP 8.5 (pesimista)	2041 - 2060	0.30	BIO 17	1.00	0.81
				BIO 6	54.80	
				BIO 18	21.90	
				BIO 14	10.50	
				BIO 5	6.50	
				BIO 15	3.60	
		2061 - 2080	0.31	BIO 19	2.10	0.82
				BIO 17	0.70	
				BIO 6	56.40	
				BIO 18	20.90	
				BIO 14	10.00	
				BIO 5	6.80	
				BIO 19	2.70	

Tabla 4. Continúa

Modelos de Circulación Global (MCG)	Trayectorias socio económicas	Periodo	Umbral 10%	Contribución de variables bioclimáticas (%)	AUC
ESMR 2	SSP 2.6 (mitigación)	2081 - 2100	0.27	BIO 15	2.40
				BIO 17	0.70
				BIO 6	59.00
				BIO 18	15.60
				BIO 14	12.20
				BIO 5	2.50
		2041 - 2060	0.30	BIO 19	20.50
				BIO 15	2.20
				BIO 17	0.80
				BIO 6	57.60
				BIO 18	20.00
				BIO 14	10.80
	SSP 8.5 (pesimista)	2061-2080	0.29	BIO 5	6.50
				BIO 15	3.20
				BIO 19	1.30
				BIO 17	0.70
				BIO 6	59.00
				BIO 18	20.50
		2081 - 2100	0.31	BIO 14	9.10
				BIO 5	6.60
				BIO 19	1.90
				BIO 17	1.80
				BIO 15	1.20
				BIO 6	58.00
	SSP 8.5 (pesimista)	2041 - 2060	0.31	BIO 18	21.20
				BIO 14	9.90
				BIO 5	7.30
				BIO 15	1.40
				BIO 19	1.30
				BIO 17	9.90
	SSP 8.5 (pesimista)	2041 - 2060	0.31	BIO 6	60.50
				BIO 18	19.40
				BIO 14	8.00
				BIO 5	6.50
				BIO 15	2.30
				BIO 17	1.90
				BIO 19	1.60

Tabla 4. Continúa

Modelos de Circulación Global (MCG)	Trayectorias socio económicas	Periodo	Umbral 10%	Contribución de variables bioclimáticas (%)	AUC
		2061 - 2080	0.29	BIO 6	57.10
				BIO 18	20.30
				BIO 14	12.20
				BIO 5	6.70
				BIO 15	2.20
				BIO 19	0.80
				BIO 17	0.80
		2081 - 2100	0.29	BIO 6	55.10
				BIO 18	21.20
				BIO 14	11.10
				BIO 5	7.40
				BIO 15	2.40
				BIO 19	1.90
				BIO 17	0.90

precipitación del cuatrimestre más frío (BIO 19) mostró un aumento únicamente en el período ESM- SSP 2.6- 2081-2100.

A partir de los modelos de distribución obtenidos, se determinaron los valores óptimos de las variables no correlacionadas utilizadas para construir los MNE para el presente y el futuro (material suplementario: fig. S10, tabla S3). Estos valores están relacionados con las áreas de mayor aptitud para esta especie y representan las condiciones óptimas en las cuales la especie es capaz de desarrollarse y subsistir en la actualidad. Con respecto a las variables bioclimáticas de temperatura, se observó que las temperaturas extremas, tanto bajas como altas, son muy importantes para la habitabilidad de la especie. El valor óptimo de la temperatura mínima del mes más frío (BIO 6) es de 8.48 °C, mientras que el de la temperatura máxima del mes más cálido (BIO 5) es de 26.82 °C. Las variables de precipitación indican preferencia por una baja estacionalidad en las precipitaciones (BIO 15) y un amplio rango de los valores óptimos en las demás variables de precipitación (BIO 14, BIO 17, BIO 18 y BIO 19). En cuanto a las variables edáficas, se evidenciaron preferencias por suelos con pH ácido (5.55), con valores cercanos a cero de nitrógeno (0) y sodio (SLGWRB = 0), con un porcentaje de disponibilidad de agua del 18.50% (WWP), aproximadamente un 50% de partículas de limo (SLTPPT), alto grado de compactación (BLDFIE = 1,232 kg/m³), pobres en contenido orgánico (ORCDR = 1.91%)

y con un bajo porcentaje de fragmentos gruesos (CRFVOL = 0.72%).

Discusión

Este estudio constituye el primer análisis exhaustivo de la distribución potencial actual y futura de una especie del género *Elionurus*. Los resultados obtenidos mediante los MNE basados en variables bioclimáticas, edáficas y de uso y cobertura de suelo aportan un conocimiento valioso sobre la biogeografía y los requerimientos ecológicos de *E. muticus* en América del Sur. Además, estos resultados permiten evaluar el impacto de diversos escenarios futuros de cambio climático sobre la distribución de la especie, identificando las condiciones ecológicas y las regiones más adecuadas para su cultivo.

La superposición de capas de uso y cobertura del suelo sobre los modelos bioclimáticos y edáficos reveló un impacto significativo de las actividades humanas en la distribución de *E. muticus* con una reducción de 1,779,491.649 km² del área potencial. En este sentido, las zonas donde se observa una notable reducción de las áreas favorables para la especie coinciden con aquellas donde ha ocurrido un significativo avance de la frontera agropecuaria en las últimas décadas (Miñarro y Bilenca, 2008; Morello y Mateucci, 1999; Morello et al., 2012). Los cambios en la cobertura y en el uso de suelo pueden conducir a la fragmentación de las áreas más propicias

para la distribución de las especies (Çakir et al., 2008; Nagendra et al., 2004). La fragmentación y reducción del área de distribución potencial de *E. muticus* podría comprometer la viabilidad de la especie, lo que hace necesaria la realización de estudios futuros para evaluar el impacto de la fragmentación ecológica en la variabilidad genética, química y morfológica de la especie, con el fin de identificar áreas propicias para su cultivo, así como de establecer estrategias de conservación y restauración.

El cambio climático global, vinculado al calentamiento atmosférico, representa una amenaza significativa para los ecosistemas. Las alteraciones en la temperatura o las precipitaciones pueden hacer que los hábitats actuales de las especies se vuelvan inadecuados en el futuro al modificar la distribución potencial de las especies (Bradley, 2009; Quesada-Quirós et al., 2017), lo que ocasiona el desplazamiento de las áreas de distribución adecuadas hacia altitudes más elevadas o latitudes mayores (Bradley, 2009; Parmesan y Yohe, 2003). No obstante, los resultados del MNE obtenidos en este estudio indican que, en general, las áreas de mayor probabilidad de presencia de *E. muticus* se mantendrán estables en los diferentes escenarios futuros. Esta estabilidad podría atribuirse a la amplia distribución geográfica y ecológica de la especie, así como a su adaptabilidad en diferentes ambientes y a su capacidad de recuperación (Buglia, 2021; Lewis et al., 1990; Nicora y Rúgolo de Agrasar, 1987; Sarmiento, 1992). No obstante, estos resultados deben tomarse con precaución, considerando que los mapas de distribución potencial futura han sido construidos únicamente con variables bioclimáticas.

El cambio climático no solo está relacionado con los fenómenos atmosféricos (temperatura y precipitaciones), también afecta la calidad de los suelos. El suelo desempeña un papel destacado en la regulación y abastecimiento de los servicios ecosistémicos (Martínez et al., 2014; Tarrasón et al., 2016), y la calidad y propiedades del mismo son clave para cualquier tipo de cultivo. Los cambios en los patrones de temperatura y pluviosidad pueden tener un gran impacto en la materia orgánica y los procesos que tienen lugar en los suelos, así como en las plantas y cultivos que crecen en ellos. Los resultados de este estudio mostraron que, aunque las variables bioclimáticas tienen una gran influencia en la distribución actual de *E. muticus* a escala regional y con base en éstas se predice una gran estabilidad en su distribución en el tiempo, la incorporación de las variables edáficas al MNE reduce considerablemente el área predicha de la distribución a escala local. Esto último subraya la importancia de las características del suelo para la viabilidad de la especie. Por lo tanto, para la conservación y el cultivo sostenible

de *E. muticus*, es crucial considerar tanto las variables bioclimáticas como las edáficas en la planificación y gestión de su manejo.

Amplitud ambiental y requerimientos ecológicos. Los resultados del análisis conjunto de la importancia de las variables bioclimáticas y edáficas obtenidos en este trabajo han proporcionado información valiosa que contribuye a una mayor comprensión de los requerimientos ecológicos que influyen en la distribución de *E. muticus*. Los resultados obtenidos en este estudio corroboran algunas de las observaciones de estudios previos, en donde se abordaron, de manera independiente, la contribución de variables bioclimáticas y edáficas. En los mismos se ha mostrado que *E. muticus* prospera en climas subtropicales con una estación fría breve y escasas heladas (Füller, 2013), así como en suelos pobres, predominantemente arenosos o arcillosos (Nicora y Rúgolo de Agrasar, 1987), con un pH ligeramente ácido (Buglia, 2021; Coelho, 2018; Da Silva Nunes, 2008; Füller et al., 2010; Hess et al., 2007). Con base en las variables no correlacionadas sobre las cuales llevamos a cabo los análisis, se evidenció la preferencia de *E. muticus* por suelos con pH ácido, pobres, con bajo contenido de carbono orgánico y alto contenido de fragmentos finos y compactos (alta densidad aparente). Por otro lado, este trabajo pone de manifiesto la gran amplitud ambiental con respecto a las variables bioclimáticas y destaca la importancia de las variables edáficas en la distribución de la especie. Otros estudios han demostrado la relevancia de las características físicas —como la densidad aparente— y químicas, como el contenido de carbono orgánico en el crecimiento de otras especies de gramíneas (Ocampo-Quijano et al., 2020; Rojas-Solano et al., 2022). La información obtenida en este estudio sobre los requerimientos edáficos de *E. muticus* resulta especialmente relevante, ya que se observa una mayor especificidad en comparación con las variables bioclimáticas.

Existe consenso entre diferentes autores sobre los meses y estaciones en los que *E. muticus* florece, siendo la primavera y el verano los períodos más comunes (Buglia, 2021; Füller et al., 2010). Además, Coelho (2018) investigó los efectos de la temperatura en la floración de *E. muticus*, encontró que la floración y la formación de semillas ocurren en periodos con temperaturas más altas, con una media de 21 °C (± 4 °C). Estos resultados concuerdan con los valores óptimos de temperatura obtenidos en este trabajo. Además, *E. muticus* muestra un comportamiento acorde con una especie que requiere horas de frío durante el invierno para inducir a la floración (Füller et al., 2010). La temperatura media invernal para las Andropogoneae (la tribu a la cual pertenece *E. muticus*), típicas de zonas

ecuatoriales y tropicales, es de 15 °C (Burkart, 1975), lo cual coincide con la temperatura mínima del mes más frío tolerada por *E. muticus*, según nuestros resultados.

El establecimiento de un programa de cultivo de plantas bioactivas como *E. muticus*, requiere la optimización de la calidad de sus compuestos secundarios (aceites), junto con otros aspectos agronómicos como la producción de biomasa y el contenido químico. Estos factores determinan el valor del producto final (Füller, 2008). Para lograr este objetivo, es fundamental asegurar que las condiciones ambientales en las que se desarrollan las plantas sean óptimas, ya que estas condiciones influyen directamente en las características de interés de la especie, o indirectamente a través del aumento de la biomasa, especialmente en plantas productoras de aceites esenciales (Coelho, 2018). El área de distribución potencial de *E. muticus* identificada en este estudio sugiere que la mayoría de las regiones adecuadas, con condiciones climáticas óptimas, se encuentran en regiones tropicales, como había señalado Burkart (1975), abarcando una amplia distribución a lo largo de diversas ecorregiones. Es importante destacar que todos los factores ambientales que influyen en la distribución de *E. muticus* y que han sido analizados en el presente trabajo, pueden influir en la concentración y calidad de los aceites esenciales de la especie (Buglia, 2021; Da Silva Nunes, 2008; Füller, 2008). Estudios previos han observado que los principales componentes de los aceites esenciales de esta especie varían según la procedencia geográfica de las plantas (Füller et al., 2010, 2014), habiéndose detectado una mayor concentración del citral en plantas provenientes del centro-oeste y sur de Río Grande do Sul, Brasil, así como en poblaciones del nordeste argentino (Cacciabue et al., 2005; Füller et al., 2010; Hess et al., 2007; Kolb et al., 2007, 2012; Mevy et al., 2002; Sabini et al., 2006; Scramim et al., 2000). Es destacable que dichas áreas, correspondientes en gran parte con el límite oeste de la Sabana Uruguaya y con la ecorregión Campos y Malezales, coinciden con algunas de las zonas de mayor probabilidad de presencia de *E. muticus* obtenidas después de superponer las capas del uso y cobertura del suelo al modelado realizado tanto con variables bioclimáticas como edáficas. Por lo tanto, un estudio más detallado de los patrones de distribución de la producción y concentración de aceites esenciales incluyendo poblaciones de estas áreas, permitirá identificar regiones en las que se encuentren las mejores fuentes de germoplasma en términos de producción y concentración de dichos aceites. Esto es crucial para optimizar la calidad y el rendimiento de los aceites esenciales en programas de cultivo a gran escala.

Los resultados obtenidos en este estudio permitieron identificar varias ecorregiones como propicias para el

muestreo de campo, el cultivo y el aprovechamiento eficiente de *E. muticus* en América del Sur. Regiones como el suroeste del Cerrado, oeste de la Sabana Uruguaya, y Campos y Malezales destacan como áreas actuales altamente potenciales, incluso después de superponer el MNE bioclimático y edáfico con las capas de uso y cobertura del suelo. Estas áreas no solo presentan condiciones favorables para la especie, sino que también han registrado poblaciones con altas concentraciones de aceite esencial.

El uso combinado de variables bioclimáticas, edáficas y de uso y cobertura del suelo en los MNE, optimiza las predicciones de la distribución de *E. muticus*, mostrando una notable reducción de las áreas óptimas de habitabilidad. La amplia distribución actual geográfica y ambiental de *E. muticus* permitiría que las áreas de mayor probabilidad de presencia se mantuvieran estables en el futuro. Sin embargo, se observó que aunque *E. muticus* puede tolerar una mayor variedad de condiciones climáticas, sus requerimientos edáficos son más específicos. Estos hallazgos son fundamentales para el desarrollo de programas de cultivo y manejo agronómico de *E. muticus*. Además, subrayan la importancia de considerar no solo los factores climáticos de la especie, sino también las propiedades del suelo en la planificación de la conservación y el aprovechamiento sostenible de esta especie a escala local en América del Sur.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Carolina Peichoto (IBONE, CONICET-UNNE) por el asesoramiento en la taxonomía de la especie en estudio. Este trabajo fue financiado por PICT 2019 2286, (ANPCyT-FONCyT), PIP 11220200103041CO (CONICET) y 22P006 (Secretaría General de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional del Nordeste). G.M. Via do Pico, E.M.S. Moreno y V.G. Solís Neffa son miembros de la Carrera del Investigador Científico del CONICET.

Referencias

- Akpoti, K., Kabo-Bah, A. T., Dossou-Yovo, E. R., Groen, T. A. y Zwart, S. J. (2020). Mapping suitability for rice production in inland valley landscapes in Benin and Togo using environmental niche modeling. *Science of the Total Environment*, 709, 136165. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136165>
- Beck, J. (2013). Predicting climate change effects on agriculture from ecological niche modeling: who profits, who loses? *Climatic Change*, 116, 177–189. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0481-x>

- Bradley, B. A. (2009). Regional analysis of the impacts of climate change on cheatgrass invasion shows potential risk and opportunity. *Global Change Biology*, 15, 196–208. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01709.x>
- Bray, J. R. y Curtis, J. T. (1957). An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin. *Ecological Monographs*, 27, 326–349. <https://doi.org/10.2307/1942268>
- Brown, J. H., Mehlman, D. W. y Stevens, G. C. (1995). Spatial variation in abundance. *Ecology*, 76, 2028–2043. <https://doi.org/10.2307/1941678>
- Buglia, A. G. (2021). Study on vegetative propagation of *Elionurus latiflorus* (Nees Ex Steud.) Hack. *European Journal of Medicinal Plants*, 32, 29–36. <https://doi.org/10.9734/ejmp/2021/v32i130361>
- Burkart, A. (1975). Evolution of grasses and grasslands in South America. *Taxon*, 24, 53–66. <https://doi.org/10.2307/1219001>
- Cacciabue, M., Gallucci, N., Cordero, G. P., Kolb, N., Demo, M. y Sabini, L. (2005). *Elionurus muticus* from north of Argentina: evaluation of the antibacterial activity of three essential oil chemotypes. Abstracts from the XV Biennial Scientific Meeting in the 70th Anniversary. Argentina. *Biocell*, 29, 223.
- Çakir, G., Ün, C., Baskent, E. Z., Köse, S., Sivrikaya, F. y Keleş, S. (2008). Evaluating urbanization, fragmentation and land use/land cover change pattern in Istanbul city, Turkey from 1971 to 2002. *Land Degradation and Development*, 19, 663–675. <https://doi.org/10.1002/ldr.859>
- Castro, L. O. y Ramos, R. L. D. (2003). Principais gramíneas produtoras de óleos essenciais. *Cymbopogon citratus* (D.C.) Staupf., capim-cidró, *Cymbopogon martinii* (Rox) J. F. Watson, palma-rosa, *Cymbopogon nordus* (L) Rendle, citronela, *Elyonurus candidus* (Trin) Hack., campim-limão, *Vetiveria zizanioides* (L) Nash, vetiver. Porto Alegre: FEPAGRO 31p. (Boletín FEPAGRO, 11). <https://www.agricultura.rs.gov.br/upload/arquivos/202105/11141958-boletim-11-completo.pdf>
- Coelho, A. P. D. (2018). *Caracterização fenotípica e determinação do sistema de cruzamento de Elionurus muticus* (Tesis doctoral). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Faculdade de Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia. Brasil. <http://hdl.handle.net/10183/181093>
- Da Silva Nunes, A. C. G. (2008). *Coleta, prospecção em herbários e estudos sobre propagação vegetativa de capim limão (Elionurus sp.)* (Tesis de maestría en Fitotecnia Área de Concentração Horticultura). Porto Alegre (RS). Brasil. <http://hdl.handle.net/10183/14311>
- d’Eeckenbrugge, G. y Lacape, J. M. (2014). Distribution and differentiation of wild, feral, and cultivated populations of perennial upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in Mesoamerica and the Caribbean. *Plos One*, 9, e107458. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107458>
- Dzingirai, B., Muchuweti, M., Murenje, T., Chidewe, C., Benhura, M. A. N. y Chagonda, L. S. (2007). Phenolic content and phospholipids peroxidation inhibition by methanolic extracts of two medicinal plants: *Elionurus muticus* and *Hypoxis hemerocallidea*. *African Journal of Biochemistry Research*, 1, 137–41.
- Elith, J., Graham, C. H., Anderson, R. P., Dudi’k, M., Ferrier, S., Guisan, A. et al. (2006). Novel methods improve prediction of species’ distributions from occurrence data. *Ecography*, 29, 129–151. <https://doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x>
- Fester, G. A., Martinuzzi, E. A., Retamar, J. A. y Ricciardi, A. I. (1961). *Aceites esenciales de la República Argentina*. Córdoba: Academia Nacional de Ciencias. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Fick, S. E. y Hijmans, R. J. (2017) WorldClim 2: new 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37, 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Füller, T. N. (2008). *Caracterização fenotípica, fitoquímica e molecular de populações de Elionurus sp. Humb. y Bompl ex Willd (capim-limão)* (Tesis de maestría en Fitotecnia, Faculdade de Agronomia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.
- Füller, T. N. (2013). *Caracterização genética e química e atividade biológica do óleo essencial de populações naturais de Elionurus muticus Humb. y Bompl ex Willd* (Tesis doctoral en Fitotecnia, Faculdade de Agronomia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.
- Füller, T. N., Tessele, C., Barros, I. B. I. D. y Barbosa-Neto, J. F. (2010). Phenotypic, phytochemical and molecular characterization of “capim-carona” [*Elionurus muticus* (Spreng.) Kuntze] populations. *Brazilian Journal of Medicinal Plants*, 12, 261–268. <https://doi.org/10.1590/S1516-05722010000300003>
- Füller, T. N., Bertrand, C., Simon, A., de Barros, I. B. I. y Neto, J. F. B. (2014). *Elionurus muticus* as an alternative source of citral from Pampa biome, Brazil. *Journal of Oleo Science*, 63, 1109–1116. <https://doi.org/10.5650/jos.ess13234>
- GBIF (Global Biodiversity Information Facility). GBIF.org. Last access on May 2022. <https://doi.org/10.15468/dl.rcp6sp>
- Ghehsareh-Ardestani, E., Rigi, H. y Honarbakhsh, A. (2021). Predicting optimal habitats of *Haloxylon persicum* for ecosystem restoration using ensemble ecological niche modeling under climate change in southeast Iran. *Restoration Ecology*, 29, e13492. <https://doi.org/10.1111/rec.13492>
- Guisan, A. y Thuiller, W. (2005). Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8, 993–1009. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00792.x>
- Guisan, A., Broennimann, O., Engler, R., Vust, M., Yoccoz, N. G., Lehmann, A. et al. (2006). Using niche-based models to improve the sampling of rare species. *Conservation Biology*, 20, 501–511. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00354.x>
- Hao, C. Y., Rui, F. A. N., Ribeiro, M. C., Tan, L. H., Wu, H. S., Yang, J. F. et al. (2012). Modeling the potential geographic distribution of black pepper (*Piper nigrum*) in Asia using GIS tools. *Journal of Integrative Agriculture*, 11, 593–599. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(12\)60046-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(12)60046-X)

- Hengl, T., De Jesús, J. M., MacMillan, R. A., Batjes, N. H., Heuvelink, G. B., Ribeiro, E. et al. (2014). SoilGrids 1km —global soil information based on automated mapping. *Plos One*, 9, e105992. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105992>
- Hengl, T., Mendes-de Jesus, J., Heuvelink, G. B., Ruiperez-Gonzalez, M., Kilibarda, M., Blagotić, A. et al. (2017). SoilGrids250m. Global gridded soil information based on machine learning. *Plos One*, 12, e0169748. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>
- Hernández, H. R., García, K. L. T. y Cabrera, B. E. H. (2018). Caracterización del ambiente de los vainillales y área potencial para su cultivo en la huasteca potosina. *Biocencia*, 20, 49–57. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=672971088007>
- Hess, S. C., Peres, M. T., Batista, A. L., Rodrigues, J. P., Tiviroli, S. C., Oliveira, L. G. et al. (2007). Evaluation of seasonal changes in chemical composition and antibacterial activity of *Elyonurus muticus* (Sprengel) O. Kuntze (Gramineae). *Química Nova*, 30, 370–373. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000200025>
- Heydorn, S., Menné, T., Andersen, K. E., Bruze, M., Svedman, C., White, I. R. et al. (2003). Citral a fragrance allergen and irritant. *Contact Dermatitis*, 49, 32–36. <https://doi.org/10.1111/j.0105-1873.2003.00144.x>
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G. y Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 25, 1965–1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- Hirzel, A. H., Hausser, J., Chessel, D. y Perrin, N. (2002). Ecological-niche factor analysis: How to compute habitat-suitability maps without absence data? *Ecology*, 83, 2027–2036. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2002\)083\[2027:ENFAHTJ2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2002)083[2027:ENFAHTJ2.0.CO;2)
- Hirzel, A. H., Le Lay, G., Helfer, V., Randin, C. y Guisan, A. (2006). Evaluating the ability of habitat suitability models to predict species presences. *Ecological Modelling*, 199, 142–152. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.05.017>
- Hutchinson, H. W. (1957). *Village and plantation life in Northeastern Brazil*. Seattle, WA: University of Washington Press.
- Idohou, R., Townsend-Peterson, A., Assogbadjo, A. E., Vihotogbe, R. L., Padonou, E. y Glèlè Kakaï, R. (2017). Identification of potential areas for wild palm cultivation in the Republic of Benin through remote sensing and ecological niche modeling. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 64, 1383–1393. <https://doi.org/10.1007/s10722-016-0443-7>
- Jing-Song, S., Guang-Sheng, Z. y Xing-Hua, S. (2012). Climatic suitability of the distribution of the winter wheat cultivation zone in China. *European Journal of Agronomy*, 43, 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.05.009>
- Karra, K., Kontgis, C., Statman-Weil, Z., Mazzariello, J. C., Mathi, M. y Brumby, S. P. (2021). Global land use/land cover with Sentinel 2 and deep learning. En 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS 4704–4707. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9553499>
- Kass, J. M., Vilela, B., Aiello-Lammens, M. E., Muscarella, R., Merow, C. y Anderson, R. P. (2018). Wallace: a flexible platform for reproducible modeling of species niches and distributions built for community expansion. *Methods in Ecology and Evolution*, 9, 1151–1156. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12945>
- Kass, J. M., Pinilla-Buitrago, G. E., Paz, A., Johnson, B. A., Grisales-Betancur, V., Meenan, S. I. et al. (2023). Wallace 2: a shiny app for modeling species niches and distributions redesigned to facilitate expansion via module contributions. *Ecography*, 2023, e06547. <https://doi.org/10.1111/ecog.06547>
- Kirkpatrick, M. y Barton, N. H. (1997). Evolution of a species' range. *The American Naturalist*, 150, 1–23. <https://doi.org/10.1086/286054>
- Kodis, M. O., Galante, P., Stearling, E. J. y Blair, M. E. (2018). Ecological niche modeling for a cultivated plant species: a case study on taro (*Colocasia esculenta*) in Hawaii. *Ecological Applications*, 28, 967–977. <https://doi.org/10.1002/eap.1702>
- Kolb, N., Ferrera, D., Kolb, E., Rodriguez, R. y Vivero, L. (2007). *Evaluación de la aptitud del espartillo para su explotación comercial*. Misiones: Universidad Nacional de Misiones. Disponible en: http://www.unam.edu.ar/index.php?option=com_content&task=view&id=243&Itemid=123
- Kolb, E., Kolb, N., Ferreyra, D. J., Uliana, R. F., Celaya, L. S., Puglisi, C. et al. (2012). Poaceas de Misiones: quimiotipos de *Elionurus muticus*. *Dominguezia*, 28, 76.
- Koshima, F. A. T., Ming, L. C. y Marques, M. O. M. (2006). Produção de biomassa, rendimento de óleo essencial e de citral em capim-limão, *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf, com cobertura morta nas estações do ano. *Revista Brasileira de Plantas Mediciniais*, 8, 112–116.
- Lentz, D. L., Bye, R. y Sánchez-Cordero, V. (2008). Ecological niche modeling and distribution of wild sunflower (*Helianthus annuus* L.) in Mexico. *International Journal of Plant Sciences*, 169, 541–549. <https://doi.org/10.1086/528754>
- Lewis, J. P., Stofella, S. L., Pire, E. F., Franceschi, E. A., Carnevale, N. J. y Prado, D. E. (1990). Dynamics and development of floristic richness in the vegetation of a large depressed area of the Great Chaco. *Flora*, 184, 63–77. [https://doi.org/10.1016/S0367-2530\(17\)31590-6](https://doi.org/10.1016/S0367-2530(17)31590-6)
- Lopes, T. M., Bailly, D., Almeida, B. A., Santos, N. C., Gimenez, B. C., Landgraf, G. O. et al. (2017). Two sides of a coin: effects of climate change on the native and non-native distribution of *Colossoma macropomum* in South America. *Plos One*, 12, e0179684. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179684>
- Marino, G. D., Miñarro, F., Zaccagnini, M. E. y López-Lanús, B. (eds.). (2013). *Pastizales y sabanas del cono sur de Sudamérica: iniciativas para su conservación en la Argentina*. Buenos Aires: Temas de Naturaleza y Conservación, Monografía de Aves Argentinas N° 9. Aves Argentinas, AOP/ Fundación Vida Silvestre Argentina/ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

- Martínez, J., Cajas, Y. S., León, J. D. y Osorio, N. W. (2014). Silvopastoral systems enhance soil quality in grasslands of Colombia. *Applied and Environmental Soil Science*, 2014, 359736. <https://doi.org/10.1155/2014/359736>
- Mevy, J. P., Bessiere, J. M., Dherbomez, M. y Viano, J. (2002). Composition and some biological activities of the essential oils from an African pasture grass: *Elionurus elegans* Kunth. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50, 4240–4243. <https://doi.org/10.1021/jf0115140>
- Miñarro, F. y Bilenca, D. (2008). *The conservation status of temperate grasslands in central Argentina*. Special report. Buenos Aires: Fundación Vida Silvestre Argentina.
- Molina, A. M. (2006). *Familia gramíneas. Flora chaqueña, Argentina (Formosa, Chaco y Santiago del Estero)*. Colección Científica del INTA. Buenos Aires: Argentina.
- Morello, J. y Matteucci, S. D. (1999). Biodiversidad y fragmentación de los bosques en la Argentina. En S. D. Matteucci, O. T. Solbrig, J. Morello y G. Halffter (Eds.), *Biodiversidad y uso de la tierra. Conceptos y ejemplos de Latinoamérica*. Buenos Aires: Eudeba-Unesco.
- Morello, J., Matteucci, S., Rodríguez, A. y Silva, M. (2012). *Ecorregiones y complejos ecosistémicos argentinos*. Buenos Aires: Orientación Gráfica Editora.
- Nagahama, N. y Bonino, M. F. (2020). Modeling the potential distribution of *Valeriana carnosa* Sm. in Argentinean Patagonia: a proposal for conservation and in situ cultivation considering climate change projections. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 16, 100240. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2020.100240>
- Nagendra, H., Munroe, D. K. y Southworth, J. (2004). From pattern to process: landscape fragmentation and the analysis of land use/land cover change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 101, 111–115. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.003>
- Nicora, E. G. y Rúgolo de Agrasar, Z. E. (1987). *Los géneros de gramíneas de América Austral: Argentina, Chile, Uruguay y áreas limítrofes de Bolivia, Paraguay y Brasil*. Buenos Aires: Ed. Hemisferio Sur.
- Ocampo-Quijano, L. E., Osorio-Vega, W. N., Martínez-Atencia, J. y Cabrera-Torres, K. R. (2021). La densidad aparente y el tamaño de agregados del suelo controlan el crecimiento radical de *Megathyrsus maximus*. *Acta Agronómica*, 70, 353–362. <https://doi.org/10.15446/acag.v70n4.88785>
- Olson, D. M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E. D., Burgess, N. D., Powell, G. V. G. V. E., Underwood, C. et al. (2001). Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on Earth. A new global map of terrestrial ecoregions provides an innovative tool for conserving biodiversity. *BioScience*, 51, 933–938. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0933:TEOTWA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0933:TEOTWA]2.0.CO;2)
- Oney, B., Reineking, B., O'Neill, G. y Kreyling, J. (2013). Intraspecific variation buffers projected climate change impacts on *Pinus contorta*. *Ecology and Evolution*, 3, 437–449. <https://doi.org/10.1002/ece3.426>
- Parmesan, C. y Yohe, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421, 37–42. <https://doi.org/10.1038/nature01286>
- Peterson, A. T. y Nakazawa, Y. (2008). Environmental data sets matter in ecological niche modelling: an example with *Solenopsis invicta* and *Solenopsis richteri*. *Global Ecology and Biogeography*, 17, 135–144. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00347.x>
- Phillips, S., Anderson, R. y Schapire, R. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231–259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., Dudík, M., Schapire, R. E. y Blair, M. (2017). Opening the black box: an open-source release of MaxEnt. *Ecography*, 40, 887–893. <https://doi.org/10.1111/ecog.03049>
- Plath, M., Moser, C., Bailis, R., Brandt, P., Hirsch, H., Klein, A. M. y von Wehrden, H. (2016). A novel bioenergy feedstock in Latin America? Cultivation potential of *Acrocomia aculeata* under current and future climate conditions. *Biomass and Bioenergy*, 91, 186–195. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.04.009>
- Pulliam, H. R. (2000). On the relationship between niche and distribution. *Ecology Letters*, 3, 349–361. <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2000.00143.x>
- Quesada-Quirós, M., Acosta-Vargas, L. G., Arias-Aguilar, D. y Rodríguez-González, A. (2017). Modelación de nichos ecológicos basado en tres escenarios de cambio climático para cinco especies de plantas en zonas altas de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 14, 1–12.
- R Core Team. (2020). R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Ramírez-Cabral, N. Y. Z., Kumar, L. y Taylor, S. (2016). Crop niche modeling projects major shifts in common bean growing areas. *Agricultural and Forest Meteorology*, 218, 102–113. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.12.002>
- Ramírez-Gil, J. G., Morales, J. G. y Peterson, A. T. (2018). Potential geography and productivity of “Hass” avocado crops in Colombia estimated by ecological niche modeling. *Scientia Horticulturae*, 237, 287–295. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.04.021>
- Rojas-Solano, J., Brenes-Gamboa, S. y Abarca-Monge, S. (2022). Carbono en el suelo: comparación entre un área de pastos y un bosque. InterSedes, *Revista Electrónica de las Sedes Regionales de la Universidad de Costa Rica*, XXIII, 47. <https://doi.org/10.15517/isucr.v23i47.47695>
- Sabini, L. I., Cordero-Gabrieli, P., Torres, C. V., Escobar, F. M., Cacciabue, M., Rovera, M. et al. (2006). Study of the cytotoxic and antifungal activity of the essential oil of *Elionurus muticus* against *Candida* spp. *Molecular Medicinal Chemistry*, 11, 31–33. <http://idecefyn.com.ar/mmcv11/14mmv11.pdf>
- Sarmiento, G. (1992). Adaptive strategies of perennial grasses in South American savannas. *Journal of Vegetation Science*, 3, 325–336. <https://doi.org/10.2307/3235757>

- Scramin, S., Saito, M. L., Pott, A. y Ortiz-Mayo Marques, M. (2000). Essential oil of *Elionurus muticus* (Sprengel) O. Kuntze (Gramineae). *Journal of Essential Oil Research*, 12, 298–300. <https://doi.org/10.1080/10412905.2000.9699520>
- Soberón, J. y Peterson, A. T. (2005). Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics*, 2, 1–10. <https://doi.org/10.17161/bi.v2i0.4>
- Spooner, D. M., Gavrilenko, T., Jansky, S. H., Ovchinnikova, A., Krylova, E., Knapp, S. et al. (2010). Ecogeography of ploidy variation in cultivated potato (*Solanum* sect. *Petota*). *American Journal of Botany*, 97, 2049–2060. <https://doi.org/10.3732/ajb.1000277>
- Stuckert, T. (1904). *Contribución al conocimiento de las gramináceas argentinas*. Buenos Aires: Ed. J. A. Alsina. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.15662>
- Tarrasón, D., Ravera, F., Reed, M. S., Dougill, A. J. y González, L. (2016). Land degradation assessment through an ecosystem services lens: integrating knowledge and methods in pastoral semi-arid systems. *Journal of Arid Environments*, 124, 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.08.002>
- Tredgold, M. H. (1986). *Food plants of Zimbabwe: with old and new ways of preparation*. Gwero, Zimbabwe: Mambo Press.
- Tropicos (Tropicos.org). (2022). Missouri Botanical Garden. Recuperado el 1 de junio del 2022 de <https://tropicos.org>
- Vidal, A. A. 1954. Estudio químico de una gramínea argentina “*Elionurus viridulus* Hackel”. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 302, 167–180.
- Vitali, M. S. y Katinas, L. (2015). Modelado de distribución de las especies argentinas de *Smallanthus* (Asteraceae), el género del “yacón”: un cultivo potencial para la agricultura familiar. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 114, 110–121.
- Whittaker, R. H. 1956. Vegetation of the great smoky mountains. *Ecological Monographs*, 26, 2–80. <https://doi.org/10.2307/1943577>
- Zuloaga, F. O., Morrone, O., Davidse, G., Filgueiras, T. S., Peterson, P. M., Soreng, R. J. et al. (2003). Catalogue of new world grasses (Poaceae): III. Subfamilies Panicoideae, Aristidoideae, Arundinoideae, and Danthonioideae. *Contributions from the United States National Herbarium*, 46, 1–662.
- Zuloaga, F.O., Rúgolo, Z. E. y Anton, A. M. (Eds.). (2012). *Flora Argentina. Plantas vasculares de la República Argentina. Monocotiledoneae: Poaceae: Aristidoideae-Pharoideae*. Vol. 3. Buenos Aires: Instituto de Botánica Darwinion.