2025 | 16·20
GIJÓN | JUNIO
9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1721

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025**.
ISBN: **978-84-941695-7-1**

Organiza

Modelos de Distribución de Especies: aplicación a la identificación de poblaciones y áreas potenciales de distribución de la forrajera *Bituminaria bituminosa*

JAVIER SAN MARTÍN LOREN (1), JESÚS FERNÁNDEZ HABAS (1), JOSÉ RAMÓN LEAL MURILLO (1), PILAR FERNÁNDEZ REBOLLO (1)

(1) Dpto. Ingeniería Forestal. ETSIAM. Universidad de Córdoba. Campus Universitario de Rabanales. Ctra N-IVa km 396. 14071 Córdoba

Resumen

La especie *Bituminaria bituminosa* (L.) C.H. STIRT ha sido estudiada durante las últimas 2 décadas con objeto de ser incorporada como forrajera en sistemas agro-silvo-pastorales por sus cualidades nutritivas y bajo requerimiento hídrico (<200 mm). Fruto de estos trabajos se han desarrollado nuevas variedades utilizando genotipos procedentes de las islas Canarias. El objetivo es utilizarlas en mezclas o en monocultivo aprovechando su tolerancia a la sequía para alargar la oferta de alimento de calidad, permitiendo así reducir costes durante los baches alimenticios de la época estival. La capacidad para cumplir ese rol en explotaciones de la cuenca mediterránea dependerá en gran medida de su adaptación a las condiciones ambientales.

Este trabajo busca estudiar la distribución circunmediterránea de *Bituminaria* mediante Modelos de Distribución de Especies (MDE) y datos de plataforma GBIF de poblaciones naturales de *Bituminaria*. Los resultados permitirán predefinir áreas potenciales para la incorporación de esta nueva forrajera en explotaciones agroganaderas. Además, servirá para identificar poblaciones diferenciadas que sirvan de base para mejorar rasgos concretos en futuros programas de mejora genética, así como para ampliar el conocimiento de la ecología de *Bituminaria sp.*

Palabras clave

Bituminaria sp., sistemas agro-silvo-pastorales, modelos de nicho ecológico.

1. Introducción

Bituminaria bituminosa ha sido propuesta como una nueva especie forrajera resistente a la sequía para los entornos mediterráneos (Real & Kidd, 2012; Ward etal., 2017). Esta especie es nativa de la cuenca mediterránea y las Islas Canarias, con altos niveles de diversidad genética en el noroeste de África (Magreb y Anti-Atlas), seguida de las Islas Canarias (García-Verdugo etal., 2021). En esta última región, se han descrito dos variedades con potencial forrajero, *crassiuscula* y *albomarginata* (Méndez, 1990).

Su uso como forraje ha sido utilizado históricamente en las Islas Canarias para el

ganado caprino (Ventura etal., 2012), aunque se ha testado con diferentes especies de ganado, como ovejas (Raeside etal., 2012; Real etal., 2018; Hardy etal., 2023), cabras (Álvarez Ríos etal., 2018) y aves de corral (Barbera etal., 2019), para evaluar su potencial en la producción animal. Los brotes de *Bituminaria* no presentan toxicidad ni fotosensibilidad (C. Oldham etal., 2013; C. M. Oldham etal., 2015). En la última década, se ha proporcionado información detallada sobre las prácticas de manejo adecuadas provided (Real & Kidd, 2012; Melis etal., 2018). Además, estudios recientes han avanzado en la delineación del paquete agronómico (Real, 2022; Real, Bennett, etal., 2022), incluidos herbicidas para el control de herbáceas adventicias competidoras (Real, Dhammu, etal., 2022). *B. bituminosa* muestra potencial para proporcionar forraje fuera de temporada, compensando el "bache alimentario" durante la etapa estival en los sistemas mediterráneos (Real etal., 2018), también es capaz de responder rápidamente a eventos de riego tras sequías prolongadas (Foster etal., 2015) y prospera en áreas con precipitaciones anuales bajas hasta 200 mm (Martínez-Fernández etal., 2012). Sus estrategias de tolerancia a la sequía incluyen un fuerte control estomático y un ajuste osmótico eficiente. Además, las adaptaciones morfológicas a la sequía incluyen la proliferación de pubescencia en tallos y hojas, una mayor relación del sistema radical respecto a su parte aérea y un marcado paraheliotropismo (Foster etal., 2013, 2015).

B. bituminosa tiene buena calidad forrajera (Ventura etal., 2000; Fernández-Habas etal., 2022), además se presenta como una planta forrajera a incorporar dentro de los sistemas agroforestales en áreas semiáridas (Ward etal., 2017; Melis etal., 2018). Esto permite mejorar la calidad de los pastos mediterráneos (Fernández-Habas etal., 2022), y reducir potencialmente los costos de producción debido al aumento de productividad de hasta un 26%, además de proporcionar forraje durante el período de "bache alimentario" (Finlayson etal., 2012).

Sin embargo, trabajos recientes destacan algunas limitaciones para el establecimiento de *Bituminaria*, específicamente la competencia con gramíneas anuales (Fernández-Habas etal., 2023), sensibilidad al encharcamiento en suelos mal drenados o arcillosos (Fernández-Habas etal., 2023; Real etal., 2014), saturación de agua en el suelo (Fernández-Habas etal., 2022) y daños por heladas durante los inviernos fríos (Raeside etal., 2012); lo que muestra una falta de resistencia al frío en los entornos mediterráneos.

Por lo tanto, se necesita más investigación para determinar el potencial y limitaciones de esta especie en las áreas del mediterráneo y su idoneidad. Un factor clave para dilucidar oportunidades para ser incorporada en futuros manejos y limitaciones de esta leguminosa forrajera es su potencial distribución en el área mediterránea e inmediaciones. Es necesario comprender mejor la biología y características de poblaciones naturales del género *Bituminaria sp.* Tal información puede ayudar en la selección de variedades adecuadas de *Bituminaria* para su futura incorporación en mezclas multi-especie. Los Modelos de Distribución de Especies se presentan como una herramienta capaz de afrontar esta incertidumbre, utilizadas con fines similares para ubicar espacialmente plantas forrajeras (Wang etal., 2017; Patel etal., 2023).

Este estudio tiene como objetivo investigar la distribución de *Bituminaria* en el mediterráneo y caracterizar sus poblaciones, respondiendo a las preguntas de: ¿Dónde sería idóneo incorporar *Bituminaria* sp. en sistemas agrosilvopastorales en el entorno mediterráneo? ¿Existe un potencial de mejora genética para *Bituminaria sp.* que permita una adecuación y optimización de los sistemas agrosilvopastorales? Los resultados pueden proporcionar información útil para profundizar el conocimiento biológico del género *Bituminaria sp.*, encontrar poblaciones con potencial de mejora genética o establecer una base de conocimiento de en qué áreas puede establecerse exitosamente como monocultivo en el contexto de la intensificación ecológica (Wezel etal., 2015; Jhariya etal., 2021; Mondal & Palit, 2022).

2. Objetivos

- Elaboración de un modelo de distribución potencial de *Bituminaria* sp. en el área circunmediterránea y áreas adyacentes de distribución natural de la especie.
- Caracterización y agrupación en clústeres de las poblaciones naturales de *Bituminaria sp.* en función de las variables de mayor idoneidad de hábitat para la especie.

3. Metodología

3.1 Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la cuenca mediterránea y áreas limítrofes. En total abarca un área de 12.9 millones de km², alcanzando un 9 % de la superficie global terrestre, sus coordenadas de latitud y longitud se encuentran entre 27.65°N y 50.85°N (latitudes) y entre -18.13°W y 41.85°E (longitudes). Esta área es escogida por contener la especie *Bituminaria sp.* La diversidad orográfica y bioclimática es marcada. Aunque presenta altitudes máximas por encima de los 3000 metros (Volcán del Teide, Macizo de Sierra Nevada, Sistema Pirenaico, Sistema Alpino, Sistema de los Tauro, Cordillera del Cáucaso y la Cordillera del Rif) y una amplia superficie marítimo-costera (M. Mediterráneo, M. negro, Océano Atlántico), predominan en el paisaje las llanuras continentales.

3.2 Datos de ocurrencia

Se utilizaron 33132 geolocalizaciones de tipo de geometría punto de la especie *Bituminaria sp.* Los registros de presencias de *Bituminaria sp.* se extrajeron de la base de datos Global Biodiversity Information Facility (GBIF): http://www.gbif.org. Estos datos se filtraron y armonizaron de forma previa al modelaje. Para ello se eliminaron coordenadas duplicadas, coordenadas con ausencia de información, coordenadas fuera de los límites terrestres, nombres incompletos de la especie, coordenadas ubicadas en núcleos urbanos. La descarga de esta información de partida fue realizada con R Studio a través del paquete “rgbif”, así como su armonización y preprocesado.

3.3 Variables predictoras

Con objeto de modelar el nicho ecológico de *Bituminaria sp.* se han escogido variables siguiendo el criterio de expertos junto a la literatura de esta especie, la generación de modelos estadísticos previos y análisis estadísticos asociativos (para reducir la multicolinealidad entre variables).

El conjunto inicial de variables predictoras incluyó 28 variables (datos no mostrados). Se seleccionaron variables (bio)climáticas, edáficas y geomorfológicas, que pudieran predecir la distribución e idoneidad de *Bituminaria bituminosa.* en el arco mediterráneo, así como poblaciones circundantes. Las variables bioclimáticas para el periodo actual se obtuvieron de la plataforma WorldClim , se utilizaron las 19 variables bioclimáticas disponibles en https://www.worldclim.org/, consultar el nombre de cada una de las 19 variables en https://www.worldclim.org/data/bioclim.html. Estas variables se calcularon a partir de la temperatura y la precipitación con objetivo de obtener variables de mayor valor ecológico. Las variables edáficas y geomorfológicas como la elevación son obtenidas a través del paquete “geodata” en R Studio, consulta de las variables en https://github.com/rspatial/geodata.

A partir de la elevación son calculadas 5 variables derivadas a través de la función ‘terrain’ del paquete “terra” (pendiente, orientación, Índice de Posición Topográfica, rugosidad, dirección del flujo del agua), a su vez, de la variable orientaciones se extraen 2 variables derivadas: coseno y seno de la variable orientación. Este cálculo del seno y del coseno sobre la variable orientación facilita el ajuste y comprensión de los resultados en los modelos RF sobre las influencias Norte-Sur y Este-Oeste de la variable orientación. Todas las variables fueron procesadas con R Studio, utilizando el sistema de referencia de coordenadas WGS 84, con una resolución espacial inferior a 1 km, de 30 arc-sec (0.83 km).

3.4 Pre-procesado de las variables predictoras

Todas las variables predictoras se utilizaron con la misma resolución espacial y solapamiento de las subunidades a nivel de píxel. Las variables inicialmente seleccionadas fueron sometidas a un análisis de correlación por pares no paramétrica de Spearman para identificar posibles problemas de multicolinealidad entre ellas. Se estableció un umbral de 0.8 para eliminar aquellas variables de menor interés biológico para *Bituminaria sp.*, basándose en criterios de expertos y en la literatura. Además, se aplicaron las funciones '*VIFcor*' y '*VIFstep*' para la reducción de multicolinealidad, utilizando también un umbral de 0.8. Finalmente, se retuvieron 12 variables, aunque la bio6 se incluyó a pesar de tener una correlación de 0.68 con la bio_19, lo que resultó en un total de 13 variables incorporadas al cálculo del modelo.

Se realizó una armonización de los datos de presencias, eliminando ubicaciones

duplicadas, erróneas, aquellas fuera de áreas terrestres y las situadas en núcleos urbanos. Las presencias fueron filtradas espacialmente para reducir la autocorrelación espacial utilizando el paquete *spThin*. La distancia media esperada fue de 11.3 kilómetros, aplicándose un filtro de seguridad a 12 km para minimizar los sesgos de muestreo asociados con avistamientos y registros de *Bituminaria sp.* en zonas de mayor densidad de población, áreas naturales protegidas de alto tránsito y/o regiones con mayor uso de la aplicación GBIF. A partir de 33,132 ocurrencias, se generó un conjunto de puntos de 2,612, utilizado para el ajuste de los modelos.

3.5 Procedimiento de modelado, ensamblaje y evaluación

El modelo de distribución de *B. bituminosa* se desarrolló a partir del paquete *biomod2* utilizando el software estadístico R, diseñado específicamente para crear modelos de distribución de especies y proyectarlos en diferentes escenarios a escoger. Aunque existe la opción de aplicar diferentes algoritmos estadísticos sobre las variables de entrada, en el presente trabajo únicamente se utiliza '*random forest*' por ser el que proporciona los mejores resultados en las métricas de evaluación y por admitir un grado de multicolinealidad entre las variables, lo que permite introducir variables con cierto grado de multicolinealidad (en el presente estudio un máximo de p=0.68) de interés biológico sin generar redundancia en el modelo final. Para aplicar el algoritmo de *Bosque Aleatorio* se ajustaron los híper-parámetros (número de árboles=1000, nodos=5).

Se construyeron conjuntos de pseudoausencias debido a que la única información disponible para *Bituminaria sp.* son las presencias, sin contar con datos sobre las ausencias de la especie, lo que impide la verificación de los datos ausencia-presencia para validar los modelos. La construcción de las pseudoausencias se realizó con un peso del 50%, es decir, se generó un número igual de puntos de pseudoausencias que de presencias filtradas (2,612) para evitar el desequilibrio en el modelo. Para ubicar las pseudoausencias en el espacio geográfico, se seleccionó una distancia umbral mínima de 0.5 unidades entre estas y las presencias.

3.6 Calibración, evaluación del modelo y predicción de conjunto

Se calcularon 10 conjuntos de pseudoausencias, los cuales se utilizaron en el algoritmo para el ajuste de los modelos. Se empleó la validación cruzada estratificada con k=8 para evaluar los modelos, utilizando el 80% de los datos para el ajuste y el 20% restante para la validación en cada iteración del conjunto de datos, lo que dio un total de 811 rondas de evaluación. Este proceso se repitió 10 veces, alcanzando un total de 8,110 modelos. Cada modelo individual fue ajustado con 326 presencias.

Para la evaluación del rendimiento del modelo, se calcularon el área bajo la curva de operación del receptor (AUC-ROC) y el Índice de Sensibilidad y Especificidad Verdadera (TSS). De los 8,110 modelos generados, se realizó un filtrado superior al

tercer cuartil de cada una de las métricas por separado. Se seleccionaron los modelos con mejor rendimiento y se construyó un modelo de conjunto utilizando el promedio de los modelos seleccionados, lo que permitió reducir la incertidumbre entre ellos. Para la binarización y la idoneidad de presencia (entre 0 y 1000) de las proyecciones del modelo, se utilizó el valor umbral que maximiza el estadístico TSS.

3.7 Importancia de las variables y curvas respuesta

La importancia de cada variable predictiva se evaluó mediante la función 'get_variables_importance' del paquete '*biomod2*'. Para ello, se seleccionó aleatoriamente cada variable en el procesamiento del algoritmo y se realizaron predicciones del modelo utilizando el conjunto de variables aleatorio. A continuación, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (Pc) para determinar la relación entre las predicciones 'control' o de referencia y las obtenidas con las variables seleccionadas aleatoriamente, obteniendo como resultado I = 1 - Pc. Cuanto mayor es el valor obtenido, mayor es la importancia de la variable.

En el análisis de la distribución potencial de *Bituminaria* sp., se generaron curvas de respuesta utilizando la función 'bm_PlotResponseCurves' de '*biomod2*'. Las curvas se calcularon individualmente para cada variable, obteniendo de todas ellas la media y representando su desviación estándar. Estas curvas permiten evaluar cómo las variables ambientales predictoras influyen en la probabilidad de presencia de la especie, proporcionando una interpretación visual en un gradiente ambiental de la relación entre cada variable y el comportamiento biológico del modelo. Se muestran las curvas respuesta de las variables que muestran una fluctuación de idoneidad a lo largo del gradiente de la variable y superan el 3.5% de importancia para los modelos de conjunto.

3.8 Clusterización de las presencias

Se realizó una agrupación de las presencias totales armonizadas (32,125) de *Bituminaria sp.* con el fin de caracterizar la diversidad o plasticidad ambiental que presenta el género a nivel global en las poblaciones naturales. Esto se llevó a cabo utilizando el algoritmo de agrupamiento *kmeans* del paquete base de R. Para la división de las presencias de *Bituminaria sp.* en función de las variables de mayor importancia del modelo de conjunto, se seleccionaron aquellas cuya importancia fue superior al 8% en el modelo de conjunto, con un total de 4 variables (bio6, bio4, bio19, bio17).

Previo a la aplicación del algoritmo *kmeans*, las variables seleccionadas fueron escaladas. Las presencias fueron divididas en 8 clústeres, en función de la métrica de proporción de cuadrados explicados (ESSR = 79.2%), cuya fórmula es la suma de cuadrados entre grupos dividida por la suma total de cuadrados. Los resultados se representaron mediante un gráfico de visualización de clústeres para mostrar las

presencias con mayor distanciamiento o cercanía ambiental, un gráfico con las variables escaladas y una tabla resumen de las características de cada uno de los clústeres del género *Bituminaria sp.*

4. Resultados

4.1 Rendimiento de los modelos y predicción de conjunto

La evaluación del rendimiento de los 8,110 modelos generados se basó en modelos con valores superiores al tercer cuartil, con TSS > 0.74 y ROC > 0.96. A partir de estos modelos de mayor rendimiento, se seleccionaron un total de 287 modelos, con una métrica media de conjunto de TSS igual a 0.78.

4.2 Correlación entre variables e importancia en el modelo de conjunto

Las variables utilizadas para el ajuste de los modelos mostraron una correlación máxima de 0.58, según el índice de correlación de Spearman. Se seleccionaron un total de 13 variables (Tabla 1) que abarcan descriptores (bio) climáticos relacionados con la temperatura y la precipitación, así como variables edáficas (fracción volumétrica de fragmentos gruesos mayores de 2 mm y contenido de arcilla menor a 0.002 mm en el suelo fino) y geomorfológicas (elevación, pendiente, dirección del flujo del agua, índice de posición topográfica, seno de la orientación en radianes y coseno de la orientación en radianes).

En el modelo conjunto, ocho variables mostraron una importancia superior o igual al 3.5%. La temperatura mínima del mes más frío (BIO6) destacó como la variable más relevante en el ajuste de los modelos, con una importancia del 18.5%, seguida por la estacionalidad de la temperatura media mensual (BIO4), que refleja el contraste térmico entre los meses cálidos y fríos. Estas variables se identificaron como los principales determinantes en el ajuste de los modelos (Tabla 1).

En un nivel de importancia intermedio se situaron las variables relacionadas con las precipitaciones, seguidas de las variables geomorfológicas y, finalmente, las edáficas. Dentro de estas últimas, las variables derivadas de la orientación tuvieron una importancia relativa baja respecto al resto. Sin embargo, se observó que las orientaciones este-oeste (coseno de la orientación) fueron más determinantes para la distribución de *Bituminaria sp.* que las orientaciones norte-sur (seno de la orientación).

Las variables con los valores más bajos de importancia en el modelo de conjunto fueron el contenido de arcilla y la dirección del flujo hídrico, lo que sugiere que su influencia en la distribución de la especie es limitada en comparación con las variables climáticas y geomorfológicas.

Tabla 1. Importancia relativa de las trece variables utilizadas en el modelo conjunto basado en 287 combinaciones de variables climáticas, edáficas y geomorfológicas. El modelo alcanzó una estadística de habilidad verdadera (TSS) de 0.78. Para el ajuste de los modelos, se utilizaron 2612 registros de presencias de Bituminaria sp.

Importancia %	Variables	Descripción

18,5	bio6
17,3	bio4
11,1	bio19
9,8	bio17
7,8	pnte
5,5	bio8
4,7	cfvo
3,5	elev
2,9	IPT
1,2	c_o
1,2	arcilla
0,6	s_o
0,3	flwdr

4.3 Curvas de respuesta

La presencia de *Bituminaria sp.* está condicionada por múltiples factores ambientales que determinan su idoneidad en distintas áreas. Entre las variables climáticas, la temperatura mínima del mes más frío (bio6) juega un papel crucial, siendo desfavorable cuando desciende por debajo de -3 °C. Además, la sensibilidad de la especie a temperaturas extremas se refleja en la disminución de su probabilidad de presencia a medida que aumenta la estacionalidad de la temperatura (bio4), especialmente cuando supera un umbral de 670. Por otro lado, la temperatura media del trimestre más húmedo (bio8) muestra que valores inferiores a 8 °C reducen la adecuación al 20%, mientras que un rango entre 8 y 15 °C representa el óptimo. Por encima de 15 °C, la adecuación disminuye nuevamente.

La disponibilidad hídrica también es determinante. Las precipitaciones del mes más húmedo deben superar los 150 mm para permitir el inicio de la adecuación, ya que valores inferiores eliminan completamente la presencia de la especie. Por el contrario, en el mes más seco, la probabilidad de presencia es nula con precipitaciones por debajo de 15 mm, pero aumenta exponencialmente entre 15 y 100 mm, alcanzando un máximo del 75%. Más allá de este valor, la probabilidad disminuye progresivamente hasta estabilizarse en un 40% con precipitaciones superiores a 200 mm.

La pendiente del terreno también influye en la adecuación de la especie. Se observa un óptimo de idoneidad en pendientes a partir del 2,7%, que se mantiene hasta valores superiores al 30%. Sin embargo, en pendientes bajas, entre 0 y 1%, la idoneidad cae por debajo del 50%.

En cuanto a las variables edáficas, la fracción volumétrica de fragmentos gruesos (> 2 mm) fluctúa de forma marcada en relación con la idoneidad de la especie, favoreciéndola a medida que aumenta, alcanzando su máximo a partir de un 15% de cfvo. Finalmente, la altitud también representa una limitación importante, ya que elevaciones superiores a 1000 m.s.n.m. reducen considerablemente la probabilidad de presencia de la especie, manteniéndose por debajo del 10% de idoneidad.

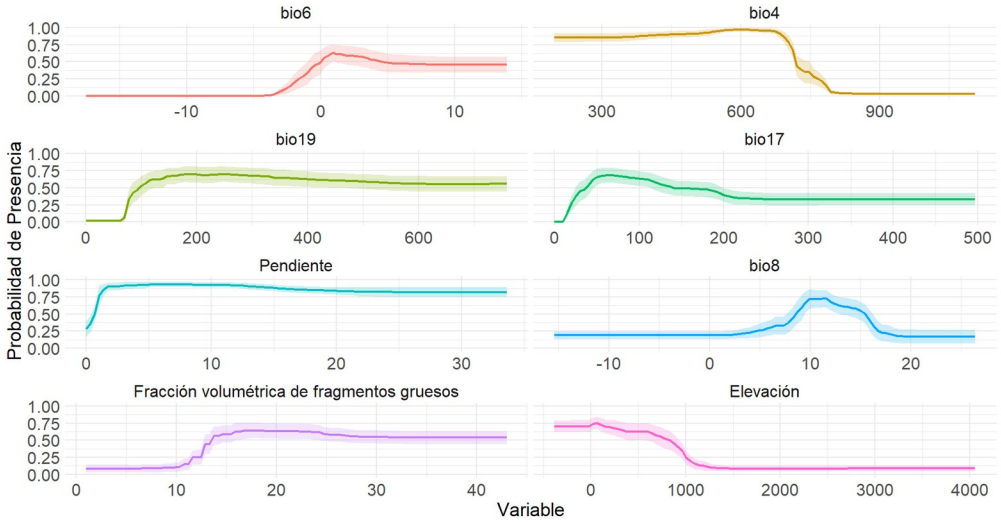

Figura 1. Curvas de respuesta medias generadas con la función 'bm_PlotResponseCurves' del paquete 'biomod2' para cada variable con una importancia superior al 3 % en el modelo. Las áreas con más transparencia del color representan la desviación típica. Los resultados se obtuvieron a partir de los 287 modelos combinados ajustados mediante el algoritmo de bosques aleatorios. La métrica de evaluación utilizada, True Skill Statistic (TSS=0.78). Variables utilizadas explicadas en Tabla1, las variables no representadas no mostraron fluctuación de idoneidad a lo largo del gradiente de la variable.

4.4 Proyecciones espaciales y probabilidad de presencia

En la Península Ibérica (PI), se identificó una alta probabilidad de presencia representadas en color azul oscuro (Figura 2) en el suroeste tanto en zonas costeras atlánticas como en áreas continentales. También a lo largo de las áreas costeras del Mediterráneo español, incluyendo la Comunidad Valenciana, Murcia y Andalucía Oriental. Asimismo, se observa una notable expansión hacia el sur de los Pirineos, donde la especie penetra en áreas más continentales entre Pamplona,

Burgos y Soria, que se extienden por la costa de la cordillera cantábrica. En Francia y los Pirineos, la idoneidad continúa hacia el noreste por la costa mediterránea, abarcando la región occidental y sur de los Pirineos franceses, con una limitada expansión hacia zonas interiores entre Marsella y Toulouse, aunque se observó elevada probabilidad de presencia en pequeñas áreas dispersas y separadas incluso hasta la altura de Paris, costa noroeste de Francia, alrededores de la ciudad de Estrasburgo y el oeste de Bélgica.

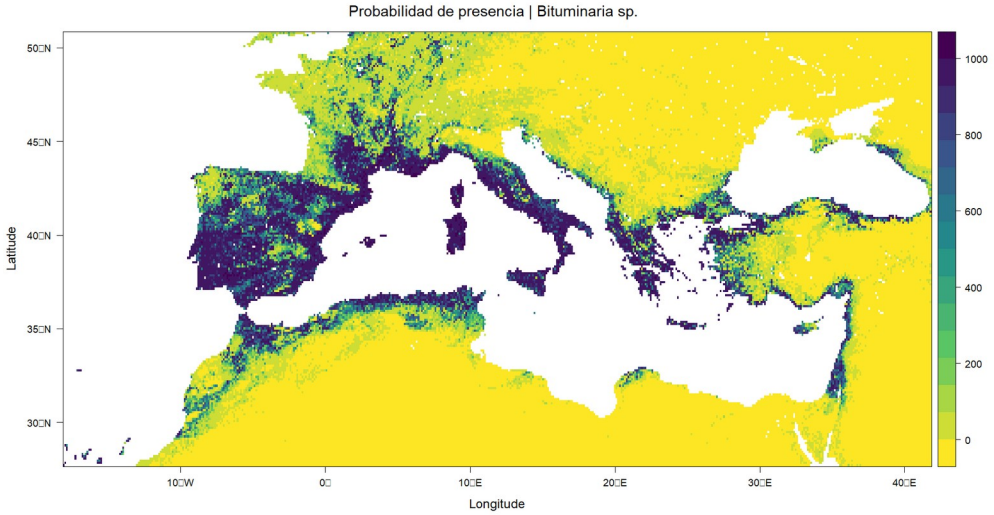

Figura 2. Gradiente espacial de probabilidad de presencia del género Bituminaria sp. Se construyó utilizando el estadístico mediana a partir de 287 modelos combinados ajustados mediante el algoritmo de bosques aleatorios. Se utilizó la métrica de evaluación estadística de habilidad verdadera (TSS = 0.78) en 'biomod2'. Los valores más próximos a 1000 (tonos azul oscuro) tienen mayor probabilidad de ser idóneos para la presencia de la especie, los amarillos muestran áreas de probabilidad nula de presencia de la especie

En Italia, destacan las zonas costeras del noroeste (región del Mediterráneo ligur) y del centro-sur, incluidas las islas de Sicilia, junto a Cerdeña y Córcega como altamente probables en presencia de *Bituminaria sp.* También se identifican áreas interiores del centro de Italia con menor intensidad, aunque todavía adecuadas. En Grecia y los Balcanes, las áreas costeras junto al conjunto de islas del Mediterráneo griego y del mar Egeo presentan una idoneidad elevada, incluyendo islas como Creta y otros archipiélagos del mar Egeo. Todas las islas mediterráneas prestan alto grado de idoneidad de hábitat, incluyendo el archipiélago canario, Azores y Madeira. exceptuando el este de Chipre, ya en el extremo este del mediterráneo, que debido a su aridez disminuye la idoneidad de esta especie.

En la región del norte de África, las costas mediterráneas de Marruecos, Argelia y Túnez muestran una alta idoneidad, que se extiende hacia áreas montañosas cercanas a la costa. No obstante, la idoneidad disminuye significativamente en las zonas interiores. En el Oriente Medio y Turquía, las costas mediterráneas de Turquía, junto con regiones sur del mar Negro y del este del Mediterráneo, son

áreas destacadas. Además, se identifican áreas favorables costeras en el noreste de Libia entre las ciudades Al Baida y Al Marj, así como y en algunas zonas costeras de Israel y el Líbano. Circundantes al Mar negro destacaron las áreas con elevada probabilidad de presencia de Ucrania cercanas a la ciudad de Simferópol, en la península de Crimea y de Rusia cercanas a la ciudad de Krasnodar, ambas cercanas a la costa.

Por otro lado, las áreas menos adecuadas, marcadas en tonos amarillos y verdes, reflejan una baja idoneidad o ausencia potencial de la especie. Estas incluyen regiones más continentales de Europa, como el centro y norte de la Península Ibérica, el norte de Francia y la mayor parte del interior de Europa central. También destacan las áreas desérticas del norte de África, como el Sahara, donde las condiciones climáticas no favorecen la presencia de la especie, así como gran parte de Asia Menor alejada de las zonas costeras.

4.5 Clústeres poblacionales

El clúster 4 destaca por su separación respecto al resto (Figura 3), mostrando valores característicos de climas más cercanos al trópico. Presenta una menor estacionalidad y menores contrastes térmicos entre verano e invierno, lo que se traduce en temperaturas medias más altas durante los meses más fríos, alcanzando una media de 11 °C (Tabla 2). Por otro lado, el clúster 7 se caracteriza por la homogeneidad en las cuatro variables analizadas, siendo representativo de condiciones promedio y valores centrales de las 4 variables entre los diferentes clústeres (Figura 3).

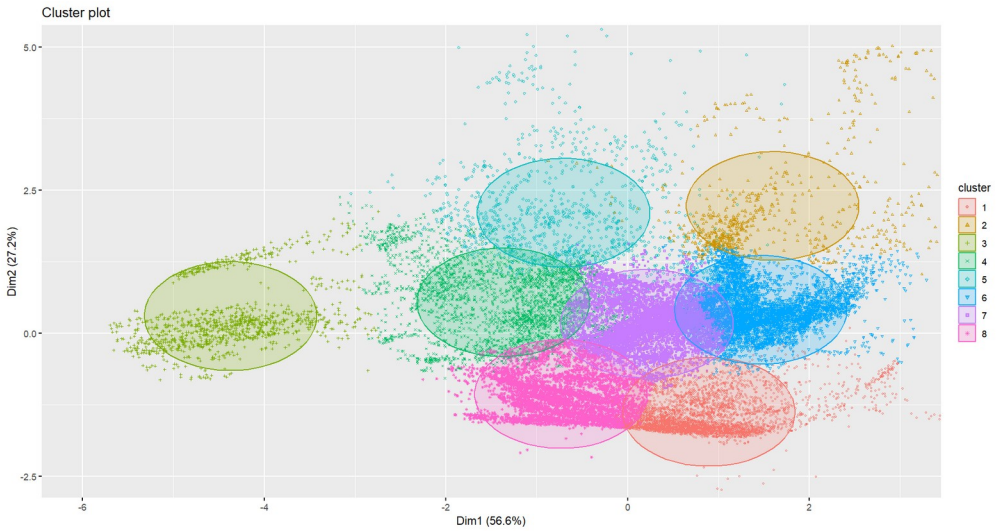

Figura 3. Gráfico de clústeres 'k-means', se muestran los ocho clústeres identificados en las 32,125 presencias de distribución de Bituminaria sp. en la cuenca mediterránea y áreas adyacentes. El análisis se realizó mediante el algoritmo de agrupamiento jerárquico k-means, obteniendo una proporción de cuadrados explicados (ESSR = 79.2%). Para el cálculo de los clústeres se utilizaron cuatro variables de mayor importancia (BIO6, BIO4, BIO19, BIO17), identificadas a partir del ajuste de los modelos de conjunto elaborados en biomod2. El modelo final

presentó una métrica de evaluación estadística de habilidad verdadera (TSS = 0.78).

Los clústeres 1, 2 y 6 sobresalen por registrar temperaturas mínimas más bajas (-0.1 °C, 1 °C y 0.3 °C, respectivamente), con valores del percentil 5 oscilando entre -1.8 °C y -3.7 °C. En cuanto a la estacionalidad anual, se observa una relativa homogeneidad entre la mayoría de los clústeres, salvo el clúster 3, que presenta una estacionalidad marcadamente baja. El resto se encuentra en un rango entre 540.8 (clúster 4) y 666.8 (clúster 1).

Las precipitaciones muestran una mayor variabilidad, tanto entre clústeres como dentro de ellos. Los clústeres 5 y 2 destacan por las mayores precipitaciones en el periodo más húmedo (374.9 mm y 335 mm, respectivamente), mientras que los clústeres 1 (104.8 mm) y 8 (102.6 mm) presentan los valores más bajos. Los clústeres 3, 4, 6 y 7 se sitúan en un rango intermedio, con precipitaciones entre 165.2 mm y 198.1 mm. En el periodo más seco, los clústeres 2 y 6 presentan las mayores precipitaciones (183.8 mm y 160.9 mm, respectivamente), mientras que el clúster 3 se encuentra en el extremo inferior (9.1 mm) localizados en el archipiélago canario (Figura 4). Por encima de este se ubican los clústeres 4 y 5 (39.3 mm y 42.6 mm) y, en un rango superior, los clústeres 8 y 1 (56.5 mm y 65.5 mm). Finalmente, el clúster 7 ocupa una posición intermedia con 106.2 mm en el periodo más seco.

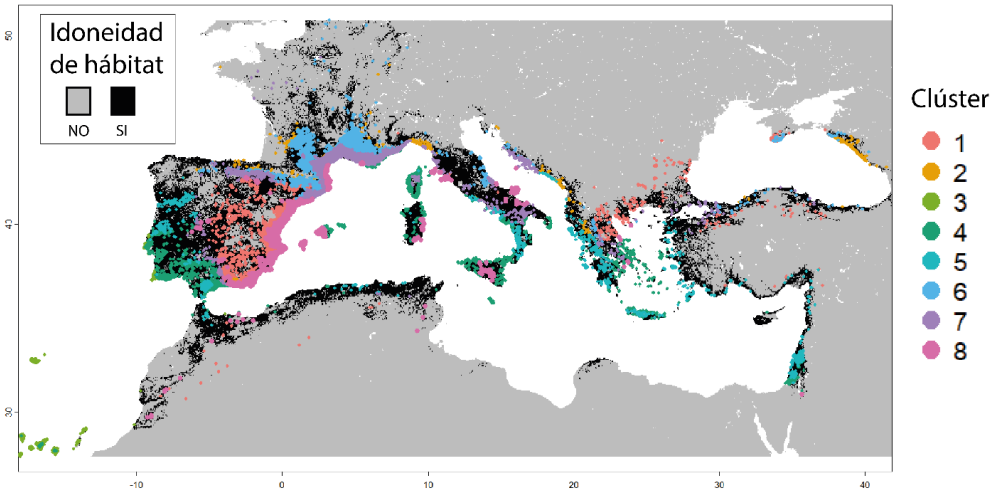

Figura 4. Presencias de los ocho clústeres de la especie Bituminaria sp. agrupados según las cuatro variables de mayor importancia (bio6, bio4, bio19, bio17) obtenidas en el modelo conjunto basado en 287 modelos individuales, utilizando 13 variables. El modelo de conjunto presentó una métrica de evaluación TSS = 0.78. Como fondo, se presenta el mapa binario de idoneidad de hábitat para Bituminaria sp., color gris áreas no idóneas para la especie, negro áreas idóneas.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de los ocho clústeres de presencias, que incluyen las cuatro variables bioclimáticas más relevantes para la distribución de Bituminaria sp.. Para cada variable se presentan la media, la desviación estándar, y los percentiles 5 y 95. Variables: Número de presencias (n), Temperatura mínima del mes más frio (bio6), Estacionalidad anual de la temperatura (bio4), Precipitación del

trimestre más frio (bio19), Precipitación del trimestre más seco (bio17), Grupos o clústeres (Clúster).

Clúster	n	bio6		bio4			
media ± sd	p.95	p.5	media ± sd	p.95	p.5		
1	4339	2.1	-3.3	767.7	603.8		
2	930	3.8	-3.7	712.6	518.6		
3	1655	14.2	7.8	343.7	231.6		
4	3936	8.7	3.3	643.4	419.6		
5	1403	7.5	0.8	682.1	443.4		
6	7383	1.7	-1.8	681.7	560.2		
7	7627	4.5	1.1	649.8	548.3		
8	5676	6.1	2.4	616.6	531.4		
Clúster	n	bio19			bio17		
media ± sd	p.95	p.5	media ± sd	p.95		p.5	
1	4339	104.8±35.8	179	75	65.5±21.4	109	31
2	930	335.7±69.4	494	266.4	183.8±46.8	281	125.4
3	1655	165.2±44.7	247	102	9.1±9.4	31	2
4	3936	233.7±43.7	305	157	39.3±27	88	5
5	1403	374.9±73.7	516	299	42.6±33.4	95	
6	7383	198.1±23.5	244	164	160.9±21.8	195	126
7	7627	189.6±33.5	249	129	106.2±19.6	138	78
8	5676	102.6±24.5	157	75	56.5±19.3	89	24

5. Discusión

Bituminaria sp. se distribuye en una amplia diversidad de hábitats presentes en el área mediterránea (Figura 4). Esta especie muestra una notable plasticidad adaptativa, lo que le permite colonizar un rango amplio de condiciones climáticas. Por ejemplo, tolera temperaturas mínimas que varían entre -3.7 ºC y 14.2 ºC, así como precipitaciones en el trimestre más seco que oscilan entre 2 mm y 281 mm, y

en el trimestre más húmedo entre 75 mm y 516 mm.

No obstante, las temperaturas inferiores a -3 ºC y las áreas con mayor continentalidad, junto con una estacionalidad superior a 670, limitan significativamente su expansión en la región estudiada. Esto se traduce en una menor presencia en áreas más continentales (Figura 4). Estas limitaciones ya han sido señaladas en estudios previos (Raeside etal., 2012), que destacaron su sensibilidad a las heladas invernales.

Por otro lado, como se observa en la Tabla 2, *Bituminaria sp.* muestra una alta tolerancia a la sequía, particularmente durante el trimestre más seco. Este comportamiento es especialmente notable en los clústeres 3, 4 y 5, donde las precipitaciones pueden ser inferiores a 9 mm. Estos resultados coinciden con ensayos previos (Martínez-Fernández etal., 2012; Foster etal., 2013, 2015), documentan la capacidad de *Bituminaria sp.* para tolerar condiciones de sequía extrema a través de adaptaciones estomáticas, pubescencia en tallo y hojas, control osmótico, relación sistema radical respecto de la superficie foliar y paraheliotropismo.

5.1 Modelo de Conjunto a partir de 'biomod2'

Las trece variables predictoras utilizadas para la elaboración de los modelos de conjunto y un número elevado de presencias filtradas (2,612) han permitido obtener métricas de evaluación (TSS = 0.78) elevadas dentro de los modelos de distribución de especies vegetales, además de ser un modelo aplicado sobre áreas de gran superficie (13 millones de km^2).

Esta información de partida ha sido suficiente para obtener un mapa de probabilidad de presencia para el género *Bituminaria sp.* con una resolución inferior a 1 km, lo que puede mejorar la toma de decisiones futuras respondiendo la pregunta: ¿Dónde se podría ubicar *Bituminaria sp.* a nivel espacial en la cuenca mediterránea con una probabilidad de presencia dada? Estos resultados permiten avanzar en la domesticación de *Bituminaria sp.*, tanto para el diseño de nuevos ensayos científicos como para su manejo en sistemas agrosilvoganaderos.

5.2 Caracterización de poblaciones

Las presencias obtenidas a partir de la plataforma GBIF han permitido avanzar en el entendimiento del comportamiento y plasticidad biológica de *Bituminaria sp.* Además, estas presencias han facilitado la agrupación en ocho clústeres, así como su caracterización climática, proporcionando información valiosa sobre su amplitud ecológica. Esta metodología se posiciona como una herramienta de gran utilidad para ser replicada, especialmente en el caso de especies en proceso de domesticación o aquellas con un conocimiento limitado de su biología, a escala mediterránea.

5.3 Mejora de variedades

Esta variación climática entre poblaciones de *Bituminaria sp.* puede relacionarse tanto con la plasticidad biológica adaptativa del género como con una diversidad genética asociada. Por ejemplo, el área sur de marruecos (Anti-Atlas), seguido del archipiélago canario son dos de las áreas de la cuenca mediterránea con mayor diversidad genética de *Bituminaria sp.* (García-Verdugo etal., 2021). Han sido realizados anteriormente procesos de mejora genética en la especie *Bituminaria bituminosa*, obteniendo variedades comerciales seleccionadas a partir del cruzamiento de variedades canarias (Pradhan etal., 2014). En este ámbito una prospección de variedades resistentes al frio o heladas podría ser realizada en los clústeres 1, 2 y 6, mientras que una tolerancia a la sequía en los clústeres 3, 4 y 5, Tabla2; posibilitaría una mejora de las variedades existentes, aumentando su plasticidad biológica a la estacionalidad y sensibilidad a heladas hasta los -3.7 ºC.

5.4 Limitaciones y oportunidades

El agrupamiento de las poblaciones de *Bituminaria sp.* se realizó en función de las variables de mayor importancia, las cuales fueron climáticas. Los clústeres se ejecutaron sin tener en cuenta barreras físicas como por ejemplo los sistemas montañosos o efecto isla del archipiélago canario, Azores, Cerdeña, Córcega o Sicilia. Tampoco el distanciamiento entre las presencias se tuvo en cuenta para el agrupamiento de las presencias de *Bituminaria sp.,* por ello presencias ubicadas en el sistema montañoso pirenaico se encuentran en el mismo clúster que las ubicadas en la costa este del Mar Negro en Rusia. Incluir barreras físicas mediante el uso del paquete 'MigClim' o la conectividad del paisaje (Monsimet etal., 2020) o incorporar el uso de modelos espaciales bayesianos jerárquicos (Martínez-Minaya etal., 2019) permitiría profundizar en los aislamientos poblaciones dentro del género *Bituminaria* sp. Otra perspectiva para solucionar el problema de las barreras sería el uso de predictores de dispersión asimétricos (Parreira & Nabout, 2023) para ser incorporados directamente en el proceso de ajuste de los modelos utilizando 'biomod2', evitando el ajuste a posteriori de la distribución predicha.

Por otro lado, en el contexto de la incorporación de *Bituminaria sp.* a escala local para su integración en sistemas agrosilvoganaderos, la caracterización de los ecosistemas acompañantes de esta especie podría contribuir significativamente al diseño de nuevos sistemas agroforestales. Además, esta información permitiría optimizar su inclusión en sistemas agroforestales altamente compatibles con *Bituminaria sp.*, con el objetivo de mejorar la eficiencia y sostenibilidad de estos sistemas productivos extensivos.

6. Conclusiones

El presente estudio ha identificado los principales factores ambientales que influyen en la distribución potencial del género *Bituminaria* en la región

mediterránea. A través del ajuste de 8,110 modelos y la selección de los 287 con mejores métricas de evaluación, se construyó un modelo de conjunto robusto (TSS = 0.78), que confirma la relevancia de variables climáticas, edáficas y geomorfológicas en la predicción de la idoneidad del hábitat para este género.

Entre las variables climáticas, la temperatura mínima del mes más frío (BIO6) y la estacionalidad de la temperatura (BIO4) resultaron ser determinantes, evidenciando la sensibilidad de *Bituminaria* a temperaturas bajo cero y a marcados contrastes estacionales. Asimismo, las precipitaciones durante el trimestre más frío y seco desempeñaron un papel fundamental, destacando la necesidad de condiciones hídricas adecuadas tanto en invierno como en verano para la persistencia de la especie.

Las proyecciones espaciales del modelo indican una alta probabilidad de presencia en zonas costeras mediterráneas y áreas montañosas cercanas, tanto en Europa como en el norte de África. No obstante, la idoneidad disminuye significativamente en regiones más continentales con mayor estacionalidad térmica anual y condiciones áridas, lo que resalta la dependencia de la especie a climas templados de carácter mediterráneo.

El enfoque basado en agrupaciones de las presencias mediante el algoritmo k-means utilizando las variables más influyentes, ha contribuido a comprender mejor la plasticidad biológica de *Bituminaria* sp. Además, ha permitido identificar clústeres o poblaciones prioritarias para ser prospectadas en futuros programas de domesticación y mejora genética de este género.

7. Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Departamento de Ingeniería Forestal de la ETSIAM de la Universidad de Córdoba por su apoyo técnico y logístico durante el desarrollo de este estudio.

8. Bibliografía

Álvarez Ríos, S., Méndez, P., & Fresno, M. (2018). Effect of feeding goats with leguminous shrubs (*Chamaecytisus proliferus* ssp. *Palmensis* and *Bituminaria bituminosa*) on milk and cheese properties. *Journal of Applied Animal Research*, *46*(1), 1443-1451. https://doi.org/10.1080/09712119.2018.1531762

Barbera, M., Muñoz, M. C., Rodriguez-Ponce, E., & Ventura, M. R. (2019). Potential value of tedera (*B. bituminosa*) as high protein resource for poultry feed. *Tropical Animal Health and Production*, *51*(2), 465-468. https://doi.org/10.1007/s11250-018-1677-5

Fernández-Habas, J., Hidalgo-Fernández, M. T., Leal-Murillo, J. R., Méndez, P., Quero, J. L., Vanwalleghem, T., & Fernández-Rebollo, P. (2022). Effects of two water regimes on morphological traits, nutritive value and physiology of three *Bituminaria bituminosa* varieties from the Canary Islands. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *208*(4), 413-426. https://doi.org/10.1111/jac.12485

Fernández-Habas, J., Real, D., Vanwalleghem, T., & Fernández-Rebollo, P. (2023). LANZA® Tedera Is Strongly Suppressed by Competition from Lolium multiflorum and Is Best Adapted to Light-Textured Soils. *Agronomy*, *13*(4), 965. https://doi.org/10.3390/agronomy13040965

Finlayson, J., Real, D., Nordblom, T., Revell, C., Ewing, M., & Kingwell, R. (2012). Farm level assessments of a novel drought tolerant forage: Tedera (*Bituminaria bituminosa* C.H. Stirt var. albomarginata). *Agricultural Systems*, *112*, 38-47. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.06.001

Foster, K., Lambers, H., Real, D., Ramankutty, P., Cawthray, G. R., & Ryan, M. H. (2015). Drought resistance and recovery in mature *Bituminaria bituminosa* var. *Albomarginata*. *Annals of Applied Biology*, *166*(1), 154-169. https://doi.org/10.1111/aab.12171

Foster, K., Ryan, M. H., Real, D., Ramankutty, P., & Lambers, H. (2013). Seasonal and diurnal variation in the stomatal conductance and paraheliotropism of tedera (*Bituminaria bituminosa* var. *Albomarginata*) in the field. *Functional Plant Biology*, *40*(7), 719. https://doi.org/10.1071/FP12228

García-Verdugo, C., Mairal, M., Tamaki, I., & Msanda, F. (2021). Phylogeography at the crossroad: Pleistocene range expansion throughout the Mediterranean and back-colonization from the Canary Islands in the legume *Bituminaria bituminosa*. *Journal of Biogeography*, *48*(7), 1622-1634. https://doi.org/10.1111/jbi.14100

Hardy, J., Oldham, C., Vercoe, P., Thomas, D., Milton, J., Real, D., Van Burgel, A., & Dobbe, E. (2023). Sheep Preference for Fresh Leaf and Stem of Seven Accessions of Tedera Was Not Influenced by Prior Grazing Experience and Wilting Made No Difference. *Agronomy*, *13*(1), 246. https://doi.org/10.3390/agronomy13010246

Jhariya, M. K., Meena, R. S., & Banerjee, A. (2021). Ecological Intensification of Natural Resources Towards Sustainable Productive System. En M. K. Jhariya, R. S. Meena, & A. Banerjee (Eds.), *Ecological Intensification of Natural Resources for Sustainable Agriculture* (pp. 1-28). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4203-3_1

Martínez-Fernández, D., Walker, D. J., Romero, P., & Correal, E. (2012). *The physiology of drought tolerance in Tedera*. *92*.

Martínez-Fernández, D., Walker, D. J., Romero, P., Martínez-Ballesta, M. C., & Correal, E. (2012). The Response of the Leguminous Fodder Plant *Bituminaria bituminosa* to Water Stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *198*(6), 442-451. https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2012.00515.x

Martínez-Minaya, J., Conesa, D., Bakka, H., & Pennino, M. G. (2019). Dealing with physical barriers in bottlenose dolphin (Tursiops truncatus) distribution. *Ecological Modelling*, *406*, 44-49. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.05.013

Melis, R. A. M., Franca, A., Re, G. A., & Porqueddu, C. (2018). Bio-agronomic characterization and implications on the potential use as forage of *Bituminaria bituminosa* and *B. morisiana* accessions. *Grass and Forage Science*, *73*(2), 284-296. https://doi.org/10.1111/gfs.12342

Méndez, P. (1990). *Variedades de Bituminaria bituminosa (L.) Stirton (Leguminosae) en el archipiélago canario*.

Mondal, S., & Palit, D. (2022). Challenges in natural resource management for ecological sustainability. En *Natural Resources Conservation and Advances for*

Sustainability (pp. 29-59). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822976-7.00004-1

Monsimet, J., Devineau, O., Pétillon, J., & Lafage, D. (2020). Explicit integration of dispersal-related metrics improves predictions of SDM in predatory arthropods. *Scientific Reports*, *10*(1), 16668. https://doi.org/10.1038/s41598-020-73262-2

Oldham, C. M., Wood, D., Milton, J., Real, D., Vercoe, P., & Van Burgel, A. J. (2015). An animal house study on utilisation of fresh tedera (Bituminaria bituminosa var. Albomarginata and crassiuscula) by Merino wethers. *Animal Production Science*, *55*(5), 617. https://doi.org/10.1071/AN13068

Oldham, C., Real, D., Bailey, H. J., Thomas, D., Van Burgel, A., Vercoe, P., Correal, E., & Rios, S. (2013). Australian and Spanish scientists are collaborating in the domestication of tedera: Young Merino sheep grazing a monoculture of tedera in autumn showed preference for certain accessions but no signs of ill health. *Crop and Pasture Science*, *64*(4), 399. https://doi.org/10.1071/CP13059

Parreira, M. R., & Nabout, J. C. (2023). Hydropower Plants as Dispersal Barriers in Freshwater Species Distribution Models: Using Restrictions through Asymmetrical Dispersal Predictors. *Environmental Management*, *72*(2), 424-436. https://doi.org/10.1007/s00267-023-01812-1

Patel, V., Boruff, B., Biggs, E., Pauli, N., & Dixon, D. J. (2023). Temporally stacked bee forage species distribution modeling for flower abundance mapping. *MethodsX*, *11*, 102327. https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102327

Pradhan, A., Besharat, N., Castello, M., Croser, J., Real, D., & Nelson, M. N. (2014). Evidence for Outcrossing in the Perennial Forage Legume Tedera. *Crop Science*, *54*(6), 2406-2412. https://doi.org/10.2135/cropsci2014.02.0163

Raeside, M. C., Nie, Z. N., Clark, S. G., Partington, D. L., Behrendt, R., & Real, D. (2012). Evaluation of tedera [(*Bituminaria bituminosa* (L.) C.H. Stirton var. Albomarginata]) as a forage alternative for sheep in temperate southern Australia. *Crop and Pasture Science*, *63*(12), 1135. https://doi.org/10.1071/CP12293

Real, D. (2022). Critical Agronomic Practices for Establishing the Recently Domesticated Perennial Herbaceous Forage Legume Tedera in Mediterranean-like Climatic Regions in Western Australia. *Agronomy*, *12*(2), 274. https://doi.org/10.3390/agronomy12020274

Real, D., Bennett, R. G., Nazeri, N. K., & Weaver, D. M. (2022). Critical P, K and S Concentrations in Soil and Shoot Samples for Optimal Tedera Productivity and Nodulation. *Agronomy*, *12*(7), 1581. https://doi.org/10.3390/agronomy12071581

Real, D., Dhammu, H., Moore, J., Clegg, D., & Van Burgel, A. (2022). Herbicide Tolerance Options for Weed Control in Lanza® Tedera. *Agronomy*, *12*(5), 1198. https://doi.org/10.3390/agronomy12051198

Real, D., & Kidd, D. (2012). *Forage production of the drought tolerant Mediterranean forage legume tedera (Bituminaria bituminosa var. Albomarginata) in the medium-rainfall zone of south Western Australia as affected by plant density and cutting frequency*. *102*.

Real, D., Oldham, C. M., Nelson, M. N., Croser, J., Castello, M., Verbyla, A., Pradhan, A., Van Burgel, A., Méndez, P., Correal, E., Teakle, N. L., Revell, C. K., & Ewing, M. A. (2014). Evaluation and breeding of tedera for Mediterranean climates in southern Australia. *Crop and Pasture Science*, *65*(11), 1114. https://doi.org/10.1071/CP13313

Real, D., Oldham, C. M., Van Burgel, A., Dobbe, E., & Hardy, J. (2018). Tedera proves its value as a summer and autumn feed for sheep in Mediterranean-like climates. *Animal Production Science*, *58*(12), 2269. https://doi.org/10.1071/AN16432

Ventura, M. R., Bastianelli, D., Hassoun, P., Flores, M. P., Bonnal, L., & González-García, E. (2012). *Nutrient and tannin content of browsing shrub legumes informally used for small ruminant feeding in Canary Islands, Spain*. *102*.

Ventura, M. R., Mendez, P., & Flores, M. P. (2000). *Energy and protein content of Tedera*.

Wang, A., Goslee, S. C., Miller, D. A., Sanderson, M. A., & Gonet, J. M. (2017). Topographic variables improve climatic models of forage species abundance in the northeastern United States. *Applied Vegetation Science*, *20*(1), 84-93. https://doi.org/10.1111/avsc.12284

Ward, P., Ryan, M. H., Real, D., Ramankutty, P., & Lambers, H. (2017). The potential for tedera (*Bituminaria bituminosa* var. *Albomarginata*) in mixed farming systems. *Functional Plant Biology*, *40*(7), 719. https://doi.org/10.1071/FP12228

Wezel, A., Soboksa, G., McClelland, S., Delespesse, F., & Boissau, A. (2015). The blurred boundaries of ecological, sustainable, and agroecological intensification: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *35*(4), 1283-1295. https://doi.org/10.1007/s13593-015-0333-y