



UNIVERSIDAD DE ALMERIA

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR Y
FACULTAD DE CIENCIAS EXPERIMENTALES**



TRABAJO FIN DE GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

Curso 2015-16

Modalidad: trabajo de investigación



**Modelos de distribución y de nicho ecológico
de la flora de los yesos ibéricos**

Miriam García Gámez

**Juan Francisco Mota Poveda
Fabián Martínez Hernández**

ÍNDICE

Resumen o abstract	2
Palabras clave o keywords	3
Introducción	4
Objetivos	13
Material y Métodos	14
Ámbito de estudio	14
Especies vegetales	15
Variables ambientales	16
Software utilizado.....	18
Modelización de especies.....	22
Comparativas cartográficas	24
Gains	26
Resultados	26
Modelización de especies.....	26
Comparativas cartográficas	39
Mapas modelización.....	39
Mapa unificado.....	42
Análisis de Verdaderos Positivos de MaxEnt.....	42
Análisis de Verdaderos Positivos con datos de presencia reales	48
Gains	51
Discusión	59
Modelización de especies.....	59
Comparativas cartográficas	61
Mapas modelización.....	61
Mapa unificado.....	61
Análisis de Verdaderos Positivos de MaxEnt.....	62
Análisis de Verdaderos Positivos con datos de presencia reales	64
Gains	65
Conclusiones	65
Agradecimientos	67
Referencias bibliográficas	67
Anexos	79
Anexo I: Descripción de las especies de estudio	79

RESUMEN O ABSTRACT

El yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) es un mineral habitual de los depósitos geológicos, y se forma por precipitación química a partir de fluidos o masas de agua, originando cristales de yeso en el suelo. Cuando éste se encuentra en grandes cantidades, superiores al 25%, da lugar a la formación de suelos yesíferos o gipsisoles, provocando efectos adversos, como desequilibrios en el balance de nutrientes y disminución de la disponibilidad de agua para las plantas. Los sustratos yesíferos influyen en la vegetación cuanto más árido sea el clima, ya que los climas húmedos producen lluvias que lavan el yeso de la solución del suelo, y las altas temperaturas deshidratan la molécula, transformándola en hemidrato, hasta convertirse de nuevo en yeso, modificando las propiedades del suelo y, por tanto, limitando a la vegetación. Dichas propiedades dan lugar a unas condiciones limitantes que favorecen la aparición de una amplia y heterogénea composición florística con un alto número de endemismos, denominada vegetación gipsófila, que no presenta una convergencia adaptativa uniforme, lo que le confiere de un gran valor a estos ambientes yesíferos con peculiares características, considerándolos como *hotspots* o puntos calientes de biodiversidad. La vegetación característica de los yesos está formada por comunidades arbustivas, principalmente matorrales, así como por plantas anuales y líquenes. Éstos últimos forman la costra líquénica cubriendo la superficie e influyendo en el desarrollo de las plantas vasculares. A pesar de ser considerados como hábitat prioritario 152011-152044, por la Directiva Hábitat europea, por su alto valor ecológico, estos afloramientos, se presentan casi siempre en territorios destinados al uso público y quedan fuera en muchos casos del amparo directo de cualquier figura de protección legal. Como consecuencia, existen amenazas sobre estos ambientes, entre los que destaca la minería, donde España es el productor líder de yeso de Europa con cientos de canteras a cielo abierto, en donde la destrucción de este tipo de hábitat choca con la conservación de su alta biodiversidad. Para preservar este patrimonio natural y reducir los efectos nocivos de las amenazas, con esta investigación se pretendió establecer modelos sobre la distribución geográfica de 6 especies ampliamente distribuidas por los afloramientos de yesos ibéricos mediante el empleo de MaxEnt, creando modelos de distribución y de nicho ecológico, y utilizando variables ambientales y puntos de muestreo. Así mismo, se persigue conocer las variables ambientales que más condicionan la existencia de los yesares ibéricos. Con el empleo de estos modelos se buscó confrontar establecer el valor de las variables climáticas empleadas por MaxEnt a la hora de predecir la distribución de la flora gipsófila teniendo en cuenta que esta última es claramente dependiente de la naturaleza geológica del sustrato, si bien el clima es otro elemento de considerable importancia dado que este tipo de vegetación está favorecida por las condiciones de aridez. Para evaluar la fiabilidad del modelo, además de los parámetros de evaluación que ofrece el software, se emplearon los datos detallados disponibles sobre la distribución de las 6 especies gipsófilas consideradas en toda la Península Ibérica. En general, el modelo obtuvo mejores resultados en los territorios septentrionales de la Península Ibérica.

Abstract

Gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) is a common mineral of geological deposits, and is formed by chemical precipitation from fluids or water volumes, forming gypsum crystals in the soil. When it is found in large amounts, more than 25%, it forms gypsum soils or gypsisols, causing adverse effects, such as imbalances in the balance of nutrients and reduced water availability for plants. Gypsum substrates influence the vegetation when the climate is so arid, due to the rains wash down the gypsum solution of the soil in humid climates and high temperatures dehydrate the water molecule, transforming it into hemihydrate, and then it becomes gypsum again, modifying soil properties and limiting the growth of vegetation. These properties make limiting conditions that stimulate the emergence of a wide and heterogeneous floristic composition with a high number of endemic species, named gypsophile vegetation, which has not got a uniform adaptive convergence, which tacks on a great value to these gypsum environments, with peculiar characteristics, considered as hotspots. Characteristic vegetation from these outcrops of gypsum is integrated for shrub communities, mainly of bushes, as well as annual plants and lichens. These last ones make the lichen crust which cover the surface and influence the growth of the vascular plants. Although this environment is considered a priority habitat 152011-152044, by European Habitat Directive, for its great ecological value, these outcrops are always present in territories destined for public use and they are outside from any figure of legal protection in many cases. As a result, there are risks on these environments, such as mining, where Spain is the main producer of gypsum in Europe with hundreds of open pit quarries, where the destruction of this type of habitat collides with the conservation of its high biodiversity. To preserve this natural heritage and reduce the harmful effects of the risks, this research aimed to establish models of the geographical distribution of 6 species widely distributed by Iberian outcrops using MaxEnt, creating models of distribution and ecological niche, and using environmental variables and presence data. Likewise, we want to know what environmental variables determine the existence of the Iberian gypsum. With the use of these models, we established the value of the climatic variables used by MaxEnt to predict the distribution of the gypsophile flora, considering that the last one is clearly dependent on the geological nature of the soil, although the climate is another element with importance due to this type of vegetation is favored by arid conditions. In order to evaluate the reliability of the model, available detailed data about distribution of the 6 gypsophile species for the Iberian peninsula were used. In general, this model was performed better in the Northern territories of the Iberian peninsula.

PALABRAS CLAVE O KEYWORDS

Afloramiento de yeso, AUC, biodiversidad, especie endémica, gipsisol, gipsófito, MaxEnt, modelización, SIG, variable ambiental, wide gypsophiles.

INTRODUCCIÓN

El yeso, del griego γύψος (*gypsos*), es uno de los minerales más comunes de las rocas sedimentarias y su composición química se denomina sulfato cálcico hidratado, cuya fórmula es $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Se forma por precipitación química a partir de fluidos, o masas de agua, con un alto contenido en sales (Pérez-López et al., 2011). A pesar de que la halita es la fase de precipitación principal en el agua, es rápidamente alterada y, por lo tanto, es poco o nada conservada en los afloramientos (Escavy et al., 2012). Como consecuencia, la formación de los cristales de yeso es debida a la precipitación del sulfato cálcico disuelto en el agua.

La superficie ocupada por los suelos compuestos de yeso en la Tierra posee un valor entre 100 y 150 millones de hectáreas, aproximadamente. España presenta la mayor extensión de Europa de estos afloramientos, con un 7,2 % de la superficie total, es decir, 35.487 Km^2 (Gil de Carrasco & Ramos Miras, 2011). Su distribución abarca fundamentalmente la mitad oriental de la Península Ibérica, con una superficie muy variable, desde grandes extensiones a pequeños afloramientos que salpican el territorio.

La mayoría de los afloramientos son de yeso o sulfato de calcio y halitas. La sedimentación de estos compuestos abarca desde el Triásico hasta la actualidad, tal y como se representa en la Figura 1. Durante el Paleógeno la sedimentación se restringió a los valles situados en la precuenca del valle del Ebro, al sur de los Pirineos y al alto Ebro. Mientras que durante el Neógeno se produjo la sedimentación de evaporitas en los valles del Ebro, Tajo y Duero, junto a las cuencas internas y externas de las cordilleras Béticas. En los sulfatos del Triásico no se conserva el yeso original, sino fases diagenéticas de anhidrita y yeso secundario (Gil de Carrasco & Ramos Miras, 2011). Éste se localiza en las zonas con clima más árido. Aproximadamente el 1% de la superficie corresponde a suelos yesíferos del Pérmico-Triásico, el 29,3% de las unidades mesozoicas, principalmente depósitos del Triásico Superior, y el 69,7% de los materiales cenozoicos, la mayoría de ellos de edad del Neógeno (Escavy et al., 2012).



Figura 1. Localización de los afloramientos de yeso según edad (Escavy et al., 2012).

En la Zona Interna Bética existen rocas del Pérmico-Triásico de yeso, que ocupan 213,1 km² en las provincias de Almería, Murcia y Málaga. Estos tipos de roca se han descrito como masas de yeso irregulares (Aldaya et al., 1979; Egeler et al., 1974; Espinosa et al., 1974a; Espinosa et al., 1974b) en las que el sulfato de calcio aparece bien cristalizado y se produce tanto como yeso y anhidrita. El yeso se presenta asociado con pizarra y cuerpos subvolcánicos. El grosor es muy variable y puede alcanzar varias decenas de metros con una extensión lateral desde el oeste de Sierra Nevada a Cartagena superior a 250 km (Escavy et al., 2012).

Los afloramientos mesozoicos de yeso cubren una superficie total de 6169,3 km². Cerca de 71,2% es triásica de edad, en su mayoría Triásico Superior, el 17,3% está en edad del Jurásico y el 11,5% son rocas del Cretácico.

Por otro lado, la mayoría de los sedimentos se han acumulado en varias cuencas del Paleógeno y Neógeno durante y después de la orogenia alpina en España. La mayoría de estas cuencas han sido sometidas a períodos de intensa evaporación durante estas épocas, con la excepción de la cuenca del Guadalquivir, que estaba conectada con el océano Atlántico durante la mayor parte de este período (Escavy et al., 2012).

La alta solubilidad del yeso (2,6 g/L a 25°C), relaciona su presencia en algunos tipos de suelos con aguas de escorrentía ricas en sulfato cálcico o con aguas subterráneas que ascienden al evaporarse hacia la superficie, dejando cristales de yeso en algunos de los horizontes formadores del suelo. Los depósitos de éste se encuentran presentes fundamentalmente en

zonas áridas y semiáridas, ya que en climas más húmedos el yeso se pierde por lavado (Gil de Carrasco & Ramos Miras, 2011).

En las regiones áridas y semiáridas, en donde el clima es caluroso, el yeso se deshidrata y se transforma en hemidrato o basanita ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), convirtiéndose en yeso de nuevo cuando las condiciones son húmedas. Este proceso puede dar lugar a formaciones de capas densas o costras superficiales en los suelos. Éstas dificultan la germinación, penetración y desarrollo de las raíces, la renovación del aire del suelo y la formación de cristales de yeso. Los suelos con presencia de dichas costras poseen una tasa de infiltración superficial del agua cercana a cero, mientras que en otros casos, la disolución del yeso favorece la aparición de poros o fisuras que facilitan la infiltración. Además, en estas costras se pueden encontrar otra serie de minerales como son el carbonato cálcico (CaCO_3), la anhidrita (CaSO_4), la hexahidrita ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), epsomita ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) y algunos sulfatos de sodio (Gil de Carrasco & Ramos Miras, 2011).

Este mineral es habitual entre los sulfatos, y aparece asociado a depósitos geológicos y como componente de los suelos. En grandes cantidades, su presencia puede provocar efectos adversos sobre las propiedades físico-químicas del suelo (Gil de Carrasco & Ramos Miras, 2011), aunque a veces resulta beneficioso ya que da lugar a un aporte de nutrientes para las plantas, como el calcio o el azufre (Gil de Carrasco & Ramos Miras, 2011). Además, este mineral se utiliza para la recuperación de suelos sódicos, regenerando su estructura e incrementando la permeabilidad (Gil de Carrasco & Ramos Miras, 2011).

El alto contenido de yeso (superior al 25%), provoca desequilibrios en el balance de nutrientes y limita la disponibilidad de fósforo, potasio y magnesio (Gil de Carrasco & Ramos Miras, 2011). Asimismo, la capacidad de intercambio catiónico disminuye conforme aumenta el contenido en yeso (Gil de Carrasco & Ramos Miras, 2011). Los suelos con cantidades altas de yeso o gipsisoles presentan una elevada pobreza de concentración de materia orgánica y nitrógeno, junto con concentraciones asimilables bajas de fósforo y potasio (Gil de Carrasco & Ramos Miras, 2011). Estas propiedades químicas son de vital importancia en las zonas áridas y semiáridas, ya que afectan al crecimiento vegetal y a la productividad, es decir, a la fertilidad, dando lugar a escasa cobertura vegetal y a un insuficiente aporte orgánico. A esto hay que añadirle la abundancia de iones de Ca^{2+} y de carbonato cálcico en la solución del suelo, que dificultan considerablemente los procesos de mineralización y humificación de los restos orgánicos, debido a la afinidad de este elemento por el complejo de cambio, disminuyendo la liberación de nutrientes acumulados en el suelo o que forman parte de las estructuras orgánicas (Mn, Zn, Cu, Fe o P).

Por otro lado, los elevados valores de pH afectan de forma negativa a la disponibilidad de nutrientes y a la precipitación de ciertos elementos, como P y Fe (Pérez-López & et. al, 2011). Otra de las limitaciones de este tipo de suelos es la baja cantidad de agua útil (AU=15%), es decir, la diferencia entre el contenido de agua a capacidad de campo y el suelo seco (Dana & Mota, 2006), que junto con la fina textura de este tipo de suelo, limita el

contenido de agua disponible para ser obtenido por las plantas (Gil de Carrasco & Ramos Miras, 2011).

Estas características descritas sobre los gipsisoles dan lugar a una amplia y heterogénea composición florística que se presenta en los hábitats de yesos. Estas especies vegetales se denominan gipsófitos o yipsófitos, ya que son plantas que crecen exclusivamente en los gipsisoles debido a sus características fisiológicas, que les permiten sobrevivir en este tipo de ambientes. La gipsofilia o yipsofilia se define como la exclusividad (o casi) de las plantas por los hábitats de yeso (Mota et al., 2011b).

Las características específicas de este tipo de sustrato ha podido resultar un factor fundamental para que existan alrededor de 30 gipsófitos endémicos pertenecientes a la flora ibérica (Merlo et al., 1998; Mota et al., 2004). En cambio, las fronteras de la gipsofilia pueden llegar a ser difusas como para tener dificultades a la hora de establecer qué especies de plantas son verdaderos gipsófitos (Drohan & Mekler, 2009). Algo similar ocurre con la flora propia de otros sustratos especiales que causan fenómenos semejantes a los del yeso, como las serpentinas o las dolomías (Mota, 2007; Mota et al., 2009).

Los resultados obtenidos en los estudios realizados por Martínez-Hernández et al. (2015) y Rivas-Martínez et al. (2002) muestran dos grandes áreas de endemismo de la flora gipsícola ibéricos: una en el SE ibérico y la otra en el centro de la península. La primera área coincide con la provincia biogeográfica Murciano-Almeriense y la segunda está dentro de los territorios de la subprovincia Castellana.

Existen muchos factores que pueden dar lugar a áreas restringidas de ciertos taxones (Martínez-Hernández et al., 2015), tales como el aislamiento geográfico, la aridez y la aparición de materiales especiales en el suelo, como es el caso del yeso (Mota et al. 2011).

El área de endemismo es la unidad estándar de la biogeografía histórica, y se define como un área donde las especies presentes en el lugar no se pueden encontrar en ninguna otra parte, donde numerosas especies son endémicas, o zonas de congruencia de distribución no aleatoria entre los diferentes taxones (Morrone, 1994). Por otro lado, la determinación de las áreas de endemismo tiene varios problemas: los patrones biogeográficos están enmascarados por muchos factores, ya sean del pasado o del presente, relacionados con la dispersión, extinción, etc. de las especies; o por variables bioclimáticas (Cañadas et al., 2014; Carvalho et al., 2011; Harold y Mooi, 1994; Linder, 2001; Mendoza-Fernández et al., 2015a).

Respecto a las características generales que representan a los gipsófitos, no existe una convergencia adaptativa uniforme. Por ello, existen especies que pueden crecer tanto sobre suelos salinos como sobre yesos (Mota et al., 2011b). Esta vegetación se puede clasificar en diferentes compartimentos desde el punto de vista nutricional, y según sus adaptaciones morfoanatómicas. Así, algunas especies son acumuladoras y presentan hojas suculentas; otras son micrófilos excretorios o simplemente excretorios; también pueden ser asimiladores o con compuestos secundarios que podrían metabolizar los excesos de azufre; en otros casos,

son plantas oligóforas con bajos contenidos de nutrientes en sus hojas y capaces de vivir en suelos muy pobres (Mota et al., 2011b).

Igualmente, existen plantas ambivalentes, es decir, que sus adaptaciones les permiten vivir sobre yesos y dolomías, presentando estos tipos de suelos propiedades químicas y físicas muy diferentes. Por otro lado, como ya se ha señalado, existen vegetales que pueden vincularse al yeso y a los suelos salinos, denominados gipsihalófitos.

Según Escudero et al. (2015), las plantas que viven en ambientes yesíferos se pueden clasificar en tres categorías: (i) *Wide gypsophiles*, especialistas que pueden penetrar en la corteza física del suelo durante las etapas tempranas de la vida y tienen ajustes fisiológicos para hacer frente a las limitaciones impuestas por los componentes químicos del suelo; (ii) *Narrow gypsophiles*, plantas refugiadas que penetran con éxito en la corteza física del suelo y pueden tolerar las limitaciones químicas pero no muestran adaptaciones específicas para este tipo de suelos; y (iii) *Gypsovags*, especies de yeso no especializadas que sólo pueden prosperar en suelos de yeso cuando la corteza física está ausente o muy reducida.

Esto sugiere que, sustratos distintos, pueden provocar la aparición de hábitats desfavorables debido a la falta de agua y de ciertos iones en el suelo, provocando que dichas especies desarrollen mecanismos adaptativos similares y que incluyan sistemas de ajuste osmótico. Esto podría explicar el hecho de que puedan vivir sobre yesos, suelos salinos, dolomías o serpentinas o una combinación de varios de ellos (Merlo et al., 2011).

Por lo tanto, sobre los suelos de yeso, un sustrato con propiedades singulares, crece una vegetación que parece no compartir una estrategia adaptativa común. Por este motivo, muchos investigadores no consideran a este tipo de flora como especialista, sino refugiada (Merlo et al., 2011). La influencia de los sustratos yesíferos sobre la vegetación es tanto mayor cuanto más árido es el clima. Por el contrario, cuanto más densa sea la cubierta vegetal, menor es la influencia del yeso sobre la misma (Rivas-Martínez, 1970).

La vegetación fruticosa gipsícola comprende un orden (*Gypsophiletalia*) y tres alianzas (*Lepidion subulati*, *Thymo-Teucrion verticillati* y *Gypsophilion hispanicae*) de flora y distribución diferente (Rivas-Martínez, 1970).

El orden *Gypsophiletalia* está formado por veinte asociaciones y treinta especies diagnóstico, aproximadamente (Mota et al., 2010). En la Península Ibérica, este orden presenta una alianza única, *Lepidion subulati*, dividida en cuatro subalianzas (Garrido Becerra et al., 2011): yesos de la Meseta (*Lepidienion subulati*), del Ebro (*Gypsophilenon hispanicae*), del SE (*Gypsophilo-Santolinenion viscosae*) y de Murcia, Alicante y Valencia (*Thymo-Teucrienion verticillati*). En el norte de África aparecen comunidades de gipsófitos similares, desde el punto de vista estructural y de funcionamiento ecosistémico, pero que no pueden adscribirse a *Gypsophiletalia* porque algunos de los elementos más característicos desde el punto de vista sintaxonómico no aparecen allí (Escudero, 2009).

La mayor parte de la vegetación característica de los yesos está formada por comunidades diversas de matorrales. También es posible la existencia de vegetación fruticosa de porte arbustivo o incluso arbóreo, dando lugar en zonas de margas, con naturaleza yesífera, a bosques abiertos de pino carrasco (Merlo et al., 2011). Además, existen comunidades de plantas anuales, formadas por terófitos, que se localizan principalmente por los territorios termo-mesomediterráneos ibéricos con ombrotipo semiárido-seco (provincias Bética, Murciano-Almeriense, Catalano-Provenzal-Balear y Mediterránea Ibérica Central) (Marchal & Lendínez, 2011). También hay presencia de líquenes, en aquellos territorios hostiles con escasas precipitaciones pero con capacidad de generar humedad a partir del rocío (Gutiérrez-Carretero & Casares-Porcel, 2011).

La vegetación de los yesos ibéricos pertenece a un hábitat de interés comunitario recogido en la Directiva Hábitat, y denominado 1520 Vegetación gipsícola mediterránea (*Gypsophiletalia*). Este tipo de hábitat se encuentra presente en las regiones peninsulares con suelos ricos en yesos, fundamentalmente localizadas en la mitad oriental de la Península Ibérica: Valle del Ebro, Valle del Tajo, Cataluña, la Mancha, Andalucía oriental, sureste peninsular y valle del Guadalquivir (www.magrama.gob.es).

La vegetación asociada a este hábitat se compone de matorrales y tomillares dominados por una gran cantidad de especies leñosas, de porte medio o bajo, casi siempre endémicas de determinadas regiones peninsulares. En el sureste ibérico semiárido, las formaciones alcanzan mayor diversidad y riqueza endémica. Las comunidades de yesos pueden variar desde conjunto de caméfitos especialistas agrupados en manchas con costra biológica bien desarrollada y unas comunidades de plantas anuales con abundantes especialistas, así como con costras menos desarrolladas (www.magrama.gob.es).

Por otro lado, las áreas extensas de los ambientes semiáridos, en donde existe ausencia de árboles de gran porte, en España han sido denominadas estepas ibéricas, si bien este concepto fue criticado (Huguet del Villar, 1925). Las estepas están dominadas por pequeños arbustos, algunas especies herbáceas y gramíneas. El factor principal de su ocurrencia tiene que ver con la continentalidad climática y los periodos largos de sequía (Pérez-Collazos & Catalán, 2008). La vegetación de este tipo de ecosistema contiene una gran variedad de especies esteparias vinculadas con la zona Sur del Mediterráneo (Región saharo-síndica). Además, la endemidad vegetal de las estepas ibéricas alcanza un valor del 42%, siendo de gran relevancia los riesgos producidos por procesos antrópicos, como son la intensificación de la agricultura, el abandono del pastoreo, los cambios de uso del suelo y la construcción, causando la degeneración y destrucción de muchas áreas (Pérez-Collazos & Catalán, 2008).

Como consecuencia de las peculiares características que presentan los gipsófitos y los afloramientos de yeso, existe poca información sobre el estado de las poblaciones y la especificidad del hábitat de estas especies en los manchas de yeso del territorio (Queiroz et al., 2012). En consecuencia, los suelos de yeso ibéricos representan un área de gran valor para la realización de estudios específicos relativos a su ecología y conservación.

La Directiva Hábitat mitiga la falta de protección incluyendo las comunidades vegetales y las especies de los afloramientos de yeso (Martínez-Hernández et al., 2013). Se trata de un tipo de hábitat genuinamente ibérico, pese a que los afloramientos de yesos están presentes en buena parte de la Unión Europea. Sin embargo, en la mitad oriental de la Península Ibérica, se combina un sustrato muy específico y las condiciones de baja pluviosidad (Escudero, 2009

Este hábitat está ampliamente representado en España y casi exclusivo del mismo si se exceptúan algunas zonas de Italia en las que se presenta con distribución irregular (Mota et al., 2009) y Chipre (Hand, 2009). Además, este tipo de afloramiento está asociado con tipos especiales de flora que tienen una alta tasa de especies endémicas (Martínez-Hernández et al., 2011), cuyo carácter restringido, da lugar a que muchas de ellas se encuentren incluidas en las listas rojas, bajo las categorías de amenaza UICN (2001) (Mendoza-Fernández et al., 2015a). Además, muchas están protegidas por directivas, leyes internacionales, nacionales o autonómicas, así como decretos (Anónimo 2007; Devesa & Ortega, 2004; Mota et al., 2009). Así, los índices más altos de endemidad sobre los afloramientos de yeso se encuentran en ambientes áridos (Johnston, 1941; Martínez-Hernández et al., 2009 y 2015; Parsons, 1976).

Por la alta biodiversidad de este tipo de hábitats, podrían ser considerados como *hotspots* o puntos calientes regionales, es decir, áreas que presentan concentraciones excepcionales de especies endémicas y que, además, experimentan pérdida de hábitat aunque no la única (Myers et al., 2000).

Dado que la mayoría del territorio ocupado por los afloramientos de yeso es público, existen unos riesgos para las especies gipsófitas. Posee especial importancia la degradación por la gran demanda que produce la extracción minera del yeso, al ser una roca industrial muy utilizada, siendo ésta la mayor amenaza de origen antrópico de este hábitat (Martínez-Hernández et al., 2009).

España, con una producción de 11,5 millones de toneladas de yeso, es el productor líder en Europa, tal y como se recoge en la Figura 2, y el tercero en el mundo, después de China e Irán. Éste se obtiene de 118 canteras, extraído por métodos a cielo abierto (Escavy et al., 2012). El 25% de la extracción de yeso se concentra en las áreas de los afloramientos yesíferos (Junta de Andalucía, 1999). Debido a esto, el conflicto entre conservación y explotación es inevitable. El uso industrial de yeso, ya sea como materia prima para la construcción o como ingrediente del cemento, pone en serio peligro la conservación de estas comunidades de plantas y hace caso omiso de su valor biológico y evolutivo (Parsons, 1976; Peñas et al., 2011; Martínez-Hernández et al., 2015; Meyer, 1986). Además, hay que añadir que, como consecuencia de dicha extracción, se produce un gran impacto visual derivado de las técnicas de explotación de la materia prima, la maquinaria y los explosivos, dando lugar a alteraciones paisajísticas.

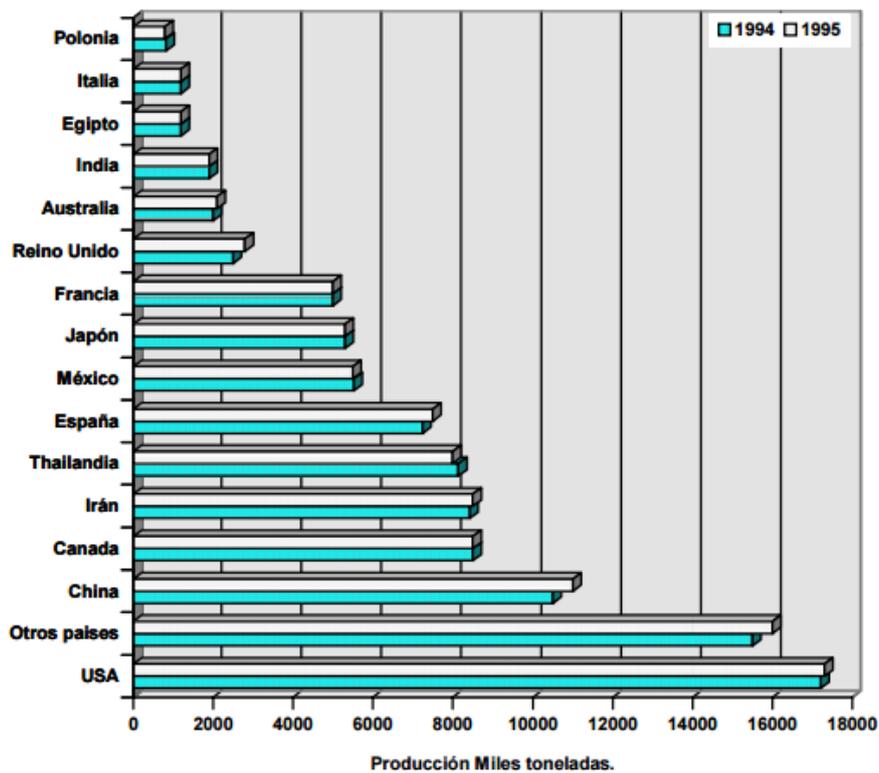


Figura 2. Producción mundial de yeso crudo (Mineral Commodity Summaries, 1996, U.S. Geological Survey and Bureau of Mines).

La legislación española contempla la restauración de cualquier paisaje natural afectado por la minería al aire libre (Real Decreto 2994/14982). La actividad minera, en la situación actual, no está autorizada para su desarrollo, a no ser que exista un plan para impedir, o al menos reducir, los efectos nocivos de las actividades industriales. Sin embargo, la política ambiental española no promueve la restauración ecológica de las comunidades vegetales originales de los afloramientos de yeso (Mota et al., 2004).

Por lo tanto, cualquier política de desarrollo territorial sostenible, para las zonas ricas en yeso, debe implementar tanto la protección de las reservas naturales libres de la minería como las estrategias de restauración adecuados para las canteras cuando las actividades de extracción llegan a su fin (Martínez-Hernández et al., 2011; Mota et al., 2003, 2004a, 2004b).

Otra de las amenazas de los afloramientos de yeso es la provocada por la transformación agrícola, cuando se lleva a cabo empleando la roturación de nuevos campos para la instalación de cultivos agrícolas (Rejos et al., 2011), ocupando extensos territorios y modificando irreversiblemente el uso del suelo. Además, se realizan repoblaciones no exitosas en este tipo de medio, con especies arbóreas que destruyen la estructura de los suelos, y provocan que, en un período de tiempo relativamente corto, las especies utilizadas no se desarrollen debido a las restricciones edáficas y microclimáticas de estos ecosistemas (Rejos et al., 2011).

También hay que tener en cuenta el rápido cambio climático, que deja una huella clara sobre la biodiversidad global (Gregory et al., 2009) y localmente es un reto importante para los conservacionistas (Peterson et al. 2002; Thomas et al., 2004). Este cambio está produciendo un aumento de las temperaturas globales, y en especial, en las regiones mediterráneas semiáridas. El aumento de la aridez del clima, aumenta el efecto de la desertificación (Vicente-Serrano et al., 2012), y a su vez, la disminución de la cobertura vegetal de los matorrales localizados en los yesos. La degradación de este ecosistema es consecuencia principal de la sobreexplotación humana a la que está sometido, pero el aumento de la aridez, relacionado con el calentamiento global, puede desencadenar y/o acelerar los procesos de degradación (Vicente-Serrano et al., 2012).

Por otro lado, existen riesgos procedentes de amenazas generales, como son el uso de vehículos fuera de las carreteras, los proyectos de construcción, la extracción de energía y transmisión, entre otros (Queiroz et al., 2012). El desarrollo urbano y las nuevas infraestructuras también son importantes factores negativos (Martínez-Hernández et al., 2011), que arrasa y divide la superficie formada por afloramientos de yeso, convirtiéndola en un mosaico de parcelas aisladas debido a la fragmentación del paisaje, y variando la supervivencia de las especies (Rejos et al., 2011).

Todo esto ha llevado a la respuesta de la comunidad científica en el avance de nuevos enfoques y metodologías que sirvan para establecer científicamente la prioridad de proteger unos enclaves frente a otros. (Pérez García et al., 2011). Esto ha fomentado el desarrollo de disciplinas científicas destinadas a comprender y evaluar los "mecanismos" que rigen las pautas de la diversidad biológica.

La biología de la conservación trata de responder a la pérdida de la biodiversidad actual desde un punto de vista científico. Para ello, identifica las regiones y los hábitats más amenazados e interesantes debido a sus altos índices de biodiversidad y endemismo (Martínez-Hernández et al., 2009). Además, de la pérdida de biodiversidad se produce la alteración del ciclo de vida de las especies, mediante variaciones de la precipitación, y principalmente de los regímenes de temperatura, afectando al tiempo de floración en las plantas, la migración y el momento de la reproducción en los animales, las interacciones bióticas y un desajuste entre los niveles tróficos (Carrillo-Angeles et al., 2016; Parmesan y Yohe, 2003; Rosenzweig et al., 2008).

El estudio de la modelización de la distribución geográfica de plantas es un serio problema en la biología de la conservación, ya que para salvar a las especies amenazadas es necesario conocer dónde prefieren vivir, y qué requerimientos necesitan para ello (Hutchinson, 1957; Phillips & Dudík, 2004). En virtud de los elementos florísticos únicos, con patrones de distribución y rasgos peculiares autoecológicos, y las condiciones de aislamiento que experimentan, los afloramientos de yeso representan laboratorios naturales de indudable interés (Phillips & Dudík, 2008).

Una de las disciplinas de la biología, Biogeografía de la Conservación, se ha convertido en una herramienta clave para la interpretación de la distribución espacial de la biodiversidad y la promoción de estrategias de conservación más eficientes (Grehan, 1993; Lodle y Whittaker, 2011; Mendoza-Fernández et al., 2015a; Schmeller et al., 2014; Whittaker et al., 2005).

Para preservar este patrimonio natural, caracterizado por un alto valor ecológico, y reducir los efectos nocivos de las amenazas, es esencial no sólo tener información precisa sobre la distribución de estos hábitats y sus especies asociadas, sino también conocer los patrones ecológicos y biogeográficos que condicionan su distribución y abundancia (Cerrillo et al., 2002; Merlo et al., 1998, 2009; Mota et al., 1998, 2003, 2004a, 2004b, 2009, 2010; Garrido-Becerra et al., 2004; Martínez-Hernández et al., 2009, 2011). Por ello, en el presente estudio, se llevan a cabo modelos de distribución espacial, empleando variables ambientales para ello, de 6 especies gipsófitas, siendo éstas las más adecuadas ya que han sido reconocidas históricamente desde el primer listado realizado en el siglo XIX por Willkomm hasta la actualidad y por ser “wide gypsophiles”, es decir, gipsófitos de distribución amplia.

Así, una conservación adecuada no sólo requiere de un conocimiento detallado de una especie, de su historia natural o su biología, sino también información sobre la disponibilidad de hábitats adecuados en el presente y de futuros escenarios climáticos (Hu et al., 2010), y los efectos del cambio climático en la especie y de la idoneidad del hábitat (Araújo et al., 2004; Hoyo et al., 2009; Rocha et al., 2012).

Mediante estas nuevas disciplinas científicas se puede ayudar a promover, con base científica, una selección de reservas y de puntos calientes de biodiversidad o *hotspots*. Esta estrategia se ha propuesto como una de las maneras más eficaces para la protección de la biodiversidad (Margules & Pressey, 2000), mediante la gestión adaptativa. Sin embargo, el diseño de las reservas naturales se ha basado en la intuición de los gerentes, que implica criterios que son ajenos a la conservación como la política, la economía o características estéticas (Martínez-Hernández et al., 2009; Pressey et al., 1996).

Sin embargo, las fuentes de información de datos sobre las localidades de presencia de especies presentan incongruencias. Así mismo, existe poca información y disponibilidad de datos sobre el estado de las poblaciones y de los hábitats de las plantas relacionadas con los suelos de yeso (Queiroz et al., 2012). Además, la calidad, cantidad y precisión de los datos sobre dichas especies suele ser deficiente.

A menudo, los datos de presencia se encuentran disponibles solamente en colecciones de museos de historia natural y herbarios, que son las fuentes principales de localidades de ocurrencia (Ponder et al., 2001 y Stockwell & Peterson, 2002). Normalmente, dichas colecciones no tienen información sobre la presencia de una especie en un lugar determinado debido a que no se ha estudiado.

Por otro lado, el número de muestreos y observaciones realizados a menudo es muy pequeño (Phillips & Dudík, 2004). Por tanto, la baja disponibilidad de estos datos es un problema científico.

Los registros de presencia de especies se ven afectados por muchos de los factores que afectan a los registros de ausencias. Si una especie está ausente en una zona ambientalmente adecuada para su existencia, dicha señal de ausencia se incluye en el registro de presencias dando como valor nulo de presencia para la especie en cuestión (Elith et al., 2011).

Por tanto, los modelos predictivos de distribución geográfica de especies son importantes para una gran variedad de aplicaciones en ecología y conservación (Graham et al., 2004), como puede ser el estudio de la propagación de especies invasoras (Thuiller et al., 2005), los impactos del cambio climático (Thomas et al., 2004), o los patrones espaciales de la diversidad de especies (Graham et al., 2006). La creciente disponibilidad de cantidades de datos sobre la presencia, ha impulsado el uso de estos métodos, que no requieren datos sobre la ausencia de especies (Phillips & Dudík, 2008).

OBJETIVOS

El principal objetivo de este estudio es el empleo de modelos de nicho ecológico, con 6 especies gipsófitas, contruidos a partir de variables climáticas para predecir la distribución geográfica de dichas especies estrechamente vinculadas, de cuerdo con la información disponible, a un sustrato edáfico especial (yeso). El modelado de distribución de las especies (es decir, nicho o hábitat potencial de distribución) se utiliza como una herramienta eficaz para evaluar las distribuciones geográficas probabilísticas de las especies.

Además, se pretende evaluar la validez de los modelos empleando parámetros estadísticos y comparándolos con la información cartográfica disponible sobre la flora y los hábitats de yeso, ya que este tipo de modelos no han sido usados con este propósito sobre este tipo de edafismo, al menos en nuestro país, hasta ahora. La hipótesis de partida es que por el carácter estepárico de este tipo de flora y, por lo tanto, vinculada a condiciones climáticas (clima continental y seco), este tipo de modelos podría resultar de utilidad. Sin embargo, la estrecha relación que la flora gipsófila mantiene con el suelo, podría distorsionar el carácter predictivo de estos modelos.

Como tercer objetivo, se construye un mapa combinando los modelos obtenidos, para las 6 especies, que pueda servir para comparar con las cartografías previamente disponibles e identificar *hotspots* o zonas de máxima viabilidad o potencialidad para la flora de yesos, de manera que pueda compararse con análisis previos que se han realizado para seleccionar los territorios más aptos para su conservación (selección de reservas, endemismos, riqueza, amenazas, etc.). Esto se consigue mediante el empleo de tecnologías digitales, como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), que permiten integrar y analizar datos de localizaciones georreferenciadas.

Por último, se pretenden establecer las variables ambientales con mayor importancia y contribución al modelo utilizado, es decir, aquellas variables que permitan predecir mejor la distribución de cada una de las 6 especies estudiadas y del conjunto de las mismas.

MATERIAL Y MÉTODOS

Por un lado, la metodología consta de métodos de modelización, empleando diferentes softwares y utilizando una serie de variables ambientales. Además, se realizaron análisis estadísticos de los datos obtenidos.

Ámbito de estudio

El área de estudio se corresponde con el territorio español, especialmente aquellas zonas donde se encuentran localizados los afloramientos de yeso, dentro de la Península Ibérica.

Estos afloramientos se encuentran en ubicaciones diversas y muy fragmentadas, distribuyéndose mayoritariamente en la parte oriental, cuya climatología es más seca, correspondiendo a condiciones áridas o semiáridas (Dana & Mota, 2006). Presentan una superficie total de 35,487 km², con una flora especialmente adaptada dentro del continente europeo (Rivas Goday, 1956; Loidi & Costa, 1997). En su conjunto ocupan aproximadamente el 7 % del territorio español (Mota et al., 2009).

La distribución que presentan estos afloramientos es muy variable, ya que se pueden encontrar grandes extensiones de yeso continuas, junto con pequeñas manchas que salpican la superficie. Una de las características más importantes de estos yesares o aljezares es su carácter discontinuo (Merlo et al., 1998). Esto da lugar a una perspectiva biogeográfica que los considera como islas edáficas, representadas en la Figura 3.

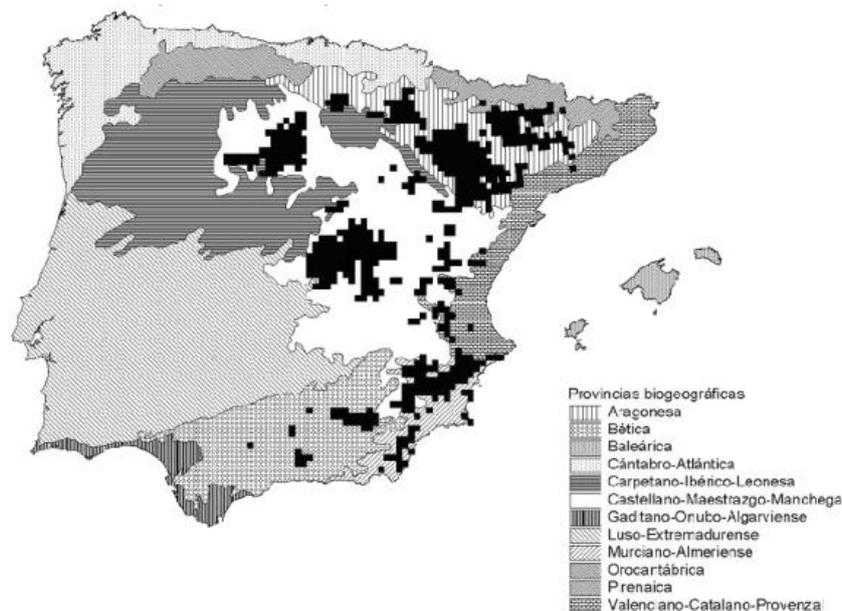


Figura 3. Provincias biogeográficas y distribución de la flora y la vegetación gipsófila (zonas en negro) (Mota et al., 2009).

Abarcan desde el valle del Duero y del Ebro, en el norte, el Valle del Tajo y zonas cercadas de la Mancha y la Comunidad de Madrid, hasta el valle del Guadalquivir con algunas localizaciones al pie de las sierras Subbéticas y otros territorios aledaños, en el sur de Andalucía, que se extienden también hacia zonas litorales y prelitorales de Valencia y Murcia (Gil de Carrasco & Ramos Miras, 2011).

La capa del territorio de estudio, junto con el número de cuadrículas donde se encuentran presentes los yesos ibéricos, recogidas en la Tabla 1, se obtuvo en formato vectorial y en el sistema de coordenadas UTM, cuyas cuadrículas o píxeles son de tamaño 1x1 km (Mendoza-Fernández et al., 2015b).

Especie	Nº Cuadrículas1x1
<i>Gypsophila struthium</i> subsp. <i>hispanica</i>	162
<i>Gypsophila struthium</i> subsp. <i>struthium</i>	159
<i>Helianthemum squamatum</i>	473
<i>Herniaria fruticosa</i>	417
<i>Lepidium subulatum</i>	302
<i>Ononis tridentata</i> subsp. <i>tridentata</i>	443

Tabla 1. Número de cuadrículas o presencias por especie.

Especies vegetales

Las especies vegetales empleadas en el presente estudio fueron 6 gipsófitos que cumplían las siguientes condiciones:

- Ser perennes
- Poseer distribución amplia
- Aparecer en los listados clásicos (Merlo et al., 1998; Rivas-Martínez et al., 2002; Willkomm, 1852)

Teniendo en cuenta dichas características, se obtuvieron 6 gipsófitos o *wide gypsophiles*, descritos detalladamente en el anexo 1, a partir del listado recogido en Mota (2009), con un total de 1956 puntos de muestreo. Estas plantas se indican en la Tabla 2, junto con los valores de media y mediana obtenidos para cada una de las especies, mediante la valoración de 12 expertos de la flora gipsícola sobre el grado de gipsofilia utilizando una escala cuantitativa que va desde la preferencia absoluta (se considera que la especie en cuestión siempre crece sobre yeso) hasta su ausencia absoluta en los afloramientos yesíferos (o presencia anecdótica) (Mota et al., 2011b). Es decir, los valores cercanos a 5 expresan la restricción absoluta de los afloramientos de yeso (Martínez-Hernández et al., 2011).

En el estudio realizado por Mota (2009), los expertos valoraron solamente 4 taxones (*Lepidium subulatum* L., *Helianthemum squamatum* (L.) Dum. Cours., *Herniaria fruticosa* L. y *Ononis tridentata* L. subsp. *tridentata*) con un valor de mediana de 5, siendo las especies con mayor grado de gipsofilia. Sólo *Lepidium subulatum* fue valorado por los 12 expertos como

un gipsófito estricto (valor 5) (Mota et al., 2009). A dichas especies valoradas, hay que añadir otros dos taxones que obtuvieron el valor máximo para la mediana y que se han tenido en cuenta en el presente estudio: *Gypsophila struthium* subsp. *hispanica* y *Gypsophila struthium* subsp. *struthium*.

Abreviatura	Nombre científico	Media	Mediana
Gyp_his	<i>Gypsophila struthium</i> subsp. <i>hispanica</i>	4.69	5
Gyp_str	<i>Gypsophila struthium</i> subsp. <i>struthium</i>	4.77	5
Hel_squ	<i>Helianthemum squamatum</i>	4.87	5
Her_fru	<i>Herniaria fruticosa</i>	4.05	4
Lep_sub	<i>Lepidium subulatum</i>	4.91	5
Ono_tri	<i>Ononis tridentata</i> subsp. <i>tridentata</i>	4.43	4.5

Tabla 2. Especies de gipsófitos de estudio.

Para cada una de las especies se utilizó una capa con las presencias descritas en el territorio de la Península Ibérica (Mendoza-Fernández et al., 2015b) en formato ráster y cuyo sistema de coordenadas se encuentra en UTM, con tamaño de cuadrícula o pixel de 1x1 km. Es decir, se obtuvo un conjunto de capas que contienen puntos de muestreo que representan las localidades donde se encuentran registradas cada una de las presencias de las diferentes especies (Phillips & Dudík, 2004). Tras esto, se transformaron dichas capas a formato vectorial para cada especie, con la ayuda de las herramientas del programa ArcView GIS v3.2.

Estas capas creadas se georreferenciaron en el sistema de coordenadas UTM ("x" e "y"), al sistema de referencia (WGS 84), calculando la geometría, y se exportaron en el formato de salida ".csv", que posteriormente fueron utilizados como archivo de entrada en el programa informático MaxEnt.

Variables Ambientales

Por otro lado, se utilizó un conjunto de variables ambientales, cuyo fin es la caracterización y descripción de algunos de los factores que probablemente influyen en la idoneidad del medio ambiente para las especies. Dichas variables ambientales se descargaron en forma de capas informáticas en formato "ESRI grid" del conjunto de datos de WORLDCLIM (www.worldclim.org). Las variables ambientales se encuentran recogidas a continuación en la Tabla 3.

Temperatura	Tmin = Media mensual de la temperatura mínima (°C*10)
	Tmax = Media mensual de la temperatura máxima (°C*10)
	Tmean = Media mensual de la temperatura media (°C*10)
Precipitación	PP01 = Media mensual de la precipitación del mes de enero (mm)
	PP02 = Media mensual de la precipitación del mes de febrero (mm)
	PP03 = Media mensual de la precipitación del mes de marzo (mm)
	PP04 = Media mensual de la precipitación del mes de abril (mm)
	PP05 = Media mensual de la precipitación del mes de mayo (mm)

	PP06 = Media mensual de la precipitación del mes de junio (mm)
	PP07 = Media mensual de la precipitación del mes de julio (mm)
	PP08 = Media mensual de la precipitación del mes de agosto (mm)
	PP09 = Media mensual de la precipitación del mes de septiembre (mm)
	PP10 = Media mensual de la precipitación del mes de octubre (mm)
	PP11 = Media mensual de la precipitación del mes de noviembre (mm)
	PP12 = Media mensual de la precipitación del mes de diciembre (mm)

	Altitud = Elevación sobre el nivel del mar (m)
--	---

Bioclimáticas	BIO1 = Temperatura media anual
	BIO2 = Rango media diurna (Media mensual (temperatura máx. – temperatura min.))
	BIO3 = Rango isotérmico (BIO2 / BIO7) (* 100)
	BIO4 = Temperatura estacional (desviación estándar * 100)
	BIO5 = Temperatura máxima del mes más cálido
	BIO6 = Temperatura mínima de BIO6 = Mes más frío
	BIO7 = Rango de temperatura anual (BIO5-BIO6)
	BIO8 = Temperatura media del trimestre más húmedo
	BIO9 = Temperatura media del trimestre más seco
	BIO10 = Temperatura media del trimestre más cálido
	BIO11 = Temperatura media del trimestre más frío
	BIO12 = Precipitación anual
	BIO13 = Precipitación del mes más húmedo
	BIO14 = Precipitación del mes más seco
	BIO15 = Precipitación de estacionalidad (coeficiente de variación)
	BIO16 = Precipitación del trimestre más húmedo
	BIO17 = Precipitación del trimestre más seco
	BIO18 = Precipitación del trimestre más caliente
	BIO19 = Precipitación del trimestre más frío

Tabla 3. Variables ambientales.

Estas capas cubren el área global de la Tierra, exceptuando la Antártida. Se encuentran en el sistema de referencia (no proyectado) de coordenadas de latitud y longitud, y el Datum, es decir, el conjunto de parámetros que proporciona el marco de referencia para la medida de las localizaciones sobre el elipsoide, definiendo el origen y la orientación de las líneas latitud y longitud, es WGS84.

Hay cuatro variables mensuales: mínima, media y máxima temperatura y las precipitaciones. También hay 18 variables bioclimáticas. Los datos están disponibles en una resolución especial de 30 segundos ($0.93 \times 0.93 = 0.86 \text{ km}^2$ en el ecuador), es decir, aproximadamente 1x1 km de lado de píxel.

Cada capa consta de dos archivos: un archivo con los datos reales, en formato “.bil”; y un archivo con texto acompañante, en formato “.HDR”. Los archivos “.bil” son archivos binarios

secuenciales en los que se almacenan los valores linealmente de la parte superior izquierda hasta la esquina inferior derecha. Cada celda o pixel es un valor entero de 2 bytes con signo.

Las variables bioclimáticas (desde BIO1 hasta BIO19) derivan de los valores mensuales de temperatura y precipitación, con el fin de generar biológicamente variables más significativas. Éstas representan tendencias anuales, estacionalidad y limitación de los factores ambientales (www.worldclim.org).

Las capas de variables bioclimáticas proporcionan información a escala global. Por ello, fueron recortadas dejando solamente la información necesaria, es decir, aquella que se encuentra en la región de interés, empleando una capa del territorio peninsular como máscara, y usando diferentes herramientas del programa ArcGIS. Esto disminuyó el peso de los archivos y facilitó la fluidez del trabajo. Tras esto, se convirtieron dichas capas a formato de extensión ASCII (".asc"), empleando las herramientas de ArcGIS. Además, se georreferenciaron y proyectaron cada una de las capas al sistema de referencia geográfico WGS 84, para la zona UTM 30N, mediante las herramientas de ArcGIS.

Software utilizados

En este apartado se describen cada uno de los programas utilizados para los análisis realizados en el estudio.

- MaxEnt v3.3.3k

Recibe este nombre debido a sus siglas en inglés: "Maximum Entropy Species Distribution". Éste se descargó de la página web oficial (<https://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/>).

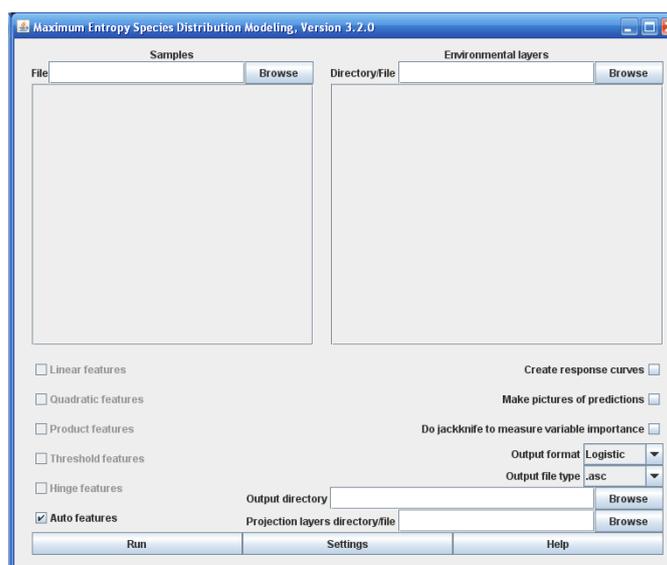


Figura 4. Ventana principal de MaxEnt.

La mayoría de los métodos de modelado de distribución de especies son sensibles al tamaño de muestra (Wisn et al., 2008), y no pueden predecir con precisión los

patrones de distribución de hábitat para especies amenazadas y en peligro de extinción. Por lo que la distribución de especies de modelado un procedimiento desafiante (Elith y Leatwick, 2007; Guisan y Thuiller, 2005; Guisan y Zimmermann 2000; Murphy y Lovett-Doust, 2007; Randin et al., 2009; Rocha et al., 2012).

MaxEnt (Figura 4) es un programa para el modelado de la distribución de especies con datos de presencia (Elith et al., 2011), que utiliza la función de máxima distribución de entropía de probabilidad, es decir, la más restringida (Jaynes, 1957), para predecir la localización de las especies basándose en las variables ambientales (Rocha et al., 2012). Sólo se requiere de datos de presencia para crear un modelo que asigna a cada cuadrícula de la celda una probabilidad de presencia de especies, en base a la idoneidad del medio ambiente (Phillips et al., 2006; Phillips y Dudík, 2008). El resultado del modelo expresa el valor de conveniencia del hábitat para la especie como una función de las variables ambientales. Un valor alto de la función de distribución en una celda determinada indica que esta presenta condiciones muy favorables para la presencia de la especie. MaxEnt puede utilizar variables cualitativas, otorgando a cada entidad un peso en función del número total de puntos de presencia que contiene (De Pando & De Giles, 2006).

Los modelos de distribución de especies (SDM) estiman la relación entre los registros de especies en los sitios y el medio ambiente y/o las características espaciales de esos sitios (Franklin, 2009). Por ello, son ampliamente utilizados para muchos propósitos en biogeografía, biología de la conservación y la ecología (Elith & Leathwick, 2009; Elith et al., 2011). Trabajos previos han descrito MaxEnt como la estimación de una distribución a través del espacio geográfico (Phillips et al, 2006; Phillips y Dudík, 2008). Según Elith (2011), MaxEnt presenta una caracterización diferente (pero equivalente) que se centra en la comparación de las densidades de probabilidad en el espacio de covarianza. La probabilidad de ocurrencia de las especies oscila entre los valores 0 y 1, donde 0 es la más baja y la más alta probabilidad 1 (Rocha et al., 2012).

En la estimación de máxima distribución de entropía, la verdadera distribución de una especie se representa como una distribución de probabilidad “p” sobre el conjunto “X” de sitios en el área de estudio. Por lo tanto, “p” asigna un valor no negativo para todos los sitios de “X” y los valores de $p(X)$ suman uno (Phillips & Dudík, 2008).

MaxEnt utiliza los datos de covarianza a partir de los datos de ocurrencias y la muestra de fondo (cuadrículas de presencia) para estimar la relación $f_1(z)/f(z)$. Para ello, al hacer una estimación de $f_1(z)$, muchas de estas distribuciones son posibles, pero elige la que está más cerca de $f(z)$, ya que $f(z)$ es un modelo nulo para $f_1(z)$: sin datos sobre su presencia, no existe ninguna razón para esperar que la especie prefiera las condiciones ambientales particulares sobre las demás. Utilizando los datos de presencias, el programa informa sobre el modelo de $f(z)$, la densidad de las covariables en la región, y proporciona la base para la comparación con la densidad

de covariables ocupadas por la especie, es decir, $f_1(z)$ (Elith et al., 2011). La distribución en bruto (Phillips et al. 2006), es la probabilidad de que se encuentre presente en un pixel, una determinada especie. Maximizar la entropía de la distribución en bruto es equivalente a minimizar la entropía relativa de f_1 .

De los algoritmos de modelado de distribución de especies disponibles, MaxEnt se ha demostrado que el mejor rendimiento, especialmente cuando algunos registros de presencia están disponibles, mientras que también es el menos afectado por errores de ubicación de las ocurrencias (Graham et al., 2007; Zhang et al., 2014).

- ArcGIS v10.3.1

Este software es un Sistema de Información Geográfica (SIG), empleado para describir zonas geográficas del planeta, con el objetivo de mostrar y analizar la información a la que se hace referencia espacialmente, utilizando mapas principalmente.

Éstos representan colecciones lógicas de información geográfica como capas de mapas. Constituyen una metáfora eficaz para modelar y organizar la información geográfica en forma de capas temáticas (<http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n000000t00000.htm>).

ArcGIS es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica (<http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n0000001400000000.htm>). También, permite publicar la información geográfica haciendo posible que la información geográfica esté disponible para cualquier usuario.

Otra de las características es la capacidad de ensamblar datos de diversas fuentes, siendo de gran utilidad cuando la información está sujeta a constantes cambios. ArcGIS también permite crear fácilmente datos geográficos mediante digitalización inteligente, con la que es posible dibujar entidades directamente en un mapa y almacenarlas en la base de datos geográfica del sistema (<http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n0000001400000000.htm>).

- ArcView GIS v3.2

Este programa es una herramienta de Sistema de Información Geográfica (SIG), desarrollada por ESRI, que permite crear, editar, imprimir y guardar bases de datos geográficos. Arcview utiliza un lenguaje de programación llamado Avenue. Este software contiene la posibilidad de crear cientos de guiones escritos en Avenue para llevar a cabo diferentes tareas cuando el programa base no los contiene (Carlson, 2003).

Además, tiene la capacidad de representar datos georreferenciados, analizar las características y patrones de distribución de esos datos y generar informes con los resultados de dichos análisis. Es un programa diseñado de forma modular, permitiendo añadir, según las necesidades de análisis, extensiones ofreciendo optimización de los recursos (Lienlaf). Este sistema utiliza archivos con formato "shapefile", es decir, aquellos que son vectoriales, y el contenido de dichos archivos se encuentra almacenado en una tabla, donde puede ser visualizado.

El formato shapefile utilizado por ArcView no posee topología y, por lo tanto, su estructura es más simple, lo cual es una ventaja (Lienlaf), permitiendo su visualización de manera más rápida. Esta estructura de archivo además permite definir propiedades espaciales para los elementos que lo componen y además realizar análisis de naturaleza espacial.

Además, Arcview tiene una extensión llamada Spatial Analyst (SA) que le permite trabajar con datos ráster, en donde la información espacial se registra en una cuadrícula de píxeles dispuestos en filas y columnas (Carlson, 2003). Cada píxel contiene un número que representa una característica geográfica.

- QGIS v2.16.0

Quantum GIS es un Sistema de Información Geográfica de código abierto. Su objetivo principal es proporcionar un visor de datos GIS (www2.pr.gov/agencias/gis/seccioneducativa/Documents/Tutoriales/Tutorial_QGIS_2.6_Brighton.pdf). QGIS soporta tanto formatos de ráster como de datos vectoriales.

Algunas de las funciones de este programa son la visualización de datos geoespaciales, exploración de datos y diseño de mapas, crear, editar, manejar y exportar nuevos datos, analizar datos y publicar mapas online.

Modelización de especies

Para la realización de los modelos de las 6 especies se empleó el software MaxEnt, descrito anteriormente.

En primer lugar, se introdujo la capa con las localidades de presencia de la especie en cuestión, cuyo formato de entrada es ".csv". Además, se introdujeron las capas de las variables ambientales descritas en el apartado anterior, en formato ".asc", previamente recortadas con ayuda de herramientas de ArcGIS, para que solamente posean información del área de estudio. En este caso, se emplearon las capas ambientales recogidas en la Tabla 4, debido a la redundancia de información en algunas capas.

Precipitación	ppspain02 = Media mensual de la precipitación del mes de febrero (mm)
	ppspain03 = Media mensual de la precipitación del mes de marzo (mm)
	ppspain04 = Media mensual de la precipitación del mes de abril (mm)
	ppspain05 = Media mensual de la precipitación del mes de mayo (mm)

	ppspain06 = Media mensual de la precipitación del mes de junio (mm)
	ppspain07 = Media mensual de la precipitación del mes de julio (mm)
	ppspain08 = Media mensual de la precipitación del mes de agosto (mm)
	ppspain09 = Media mensual de la precipitación del mes de septiembre (mm)
	ppspain10 = Media mensual de la precipitación del mes de octubre (mm)
	ppspain11 = Media mensual de la precipitación del mes de noviembre (mm)
	ppspain12 = Media mensual de la precipitación del mes de diciembre (mm)

Altitud	= altspain = Elevación sobre el nivel del mar (m)
----------------	---

Bioclimáticas	biospain04 = Temperatura estacional (desviación estándar * 100)
	biospain05 = Temperatura máxima del mes más cálido
	biospain06 = Temperatura mínima de BIO6 = Mes más frío
	biospain07 = Rango de temperatura anual (BIO5-BIO6)
	biospain08 = Temperatura media del trimestre más húmedo
	biospain09 = Temperatura media del trimestre más seco
	biospain10 = Temperatura media del trimestre más cálido
	biospain11 = Temperatura media del trimestre más frío
	biospain12 = Precipitación anual
	biospain13 = Precipitación del mes más húmedo
	biospain14 = Precipitación del mes más seco
	biospain15 = Precipitación de estacionalidad (coeficiente de variación)
	biospain16 = Precipitación del trimestre más húmedo
	biospain17 = Precipitación del trimestre más seco
	biospain18 = Precipitación del trimestre más caliente
	biospain19 = Precipitación del trimestre más frío

Tabla 4. Variables ambientales usadas en MaxEnt.

Es de especial interés la concordancia del sistema de coordenadas en todas las capas utilizadas. Por ello, en todas las capas se transformó, con ayuda del programa ArcView, el Datum desde World Geodetic System 1984 (WGS84) a European Datum 1950 (ED50). En este caso, se utilizaron la longitud (“x”) y la latitud (“y”) como referencia. También se debe tener en cuenta que los límites geográficos y los tamaños de celda o píxel sean idénticos para todas las capas.

En la ventana principal de MaxEnt, se marcaron las siguientes opciones para la realización del modelo de idoneidad de hábitat:

- “Create response curve”: Creación de un gráfico que muestre cómo predecir la probabilidad relativa de ocurrencia de los valores de cada variable ambiental.
- “Make picture of prediction”: Creación de un archivo en formato “.png” para cada grid de salida.

Este software permite la elección del formato de salida del archivo creado nuevo. Éste se corresponde con la salida logística (“logistic”), que viene determinada por defecto en el programa. Proporciona una estimación entre cero y uno de probabilidad de presencia, ya

que ésta depende de detalles del diseño de muestro, como el tamaño de la parcela o el tiempo de observación. Es una aproximación a la verdadera probabilidad de presencia de la especie, asumiendo que el diseño de muestreo es tal que las localidades de presencia típicas tienen una probabilidad de presencia de 0.5 (Phillips et al., 2006).

Para el modelo, se utilizó el análisis “jackknife” basado en el área bajo la curva (AUC) de una curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*) para cada especie, permitiendo evaluar la utilidad de cada variable como predictora. Este gráfico representa la razón de cantidad de verdaderos positivos en cuanto a la razón de falsos positivos, es decir, cuántas localidades de presencia MaxEnt determina que son ciertas, y la relación de localidades en las que no hay ocurrencia de especies, y MaxEnt determina que existe probabilidad de presencia.

La curva ROC viene definida por las razones de Verdaderos positivos (eje x) y de Falsos positivos (eje y), midiendo hasta qué punto una prueba es capaz de detectar los casos positivos correctamente, de entre todos los casos positivos disponibles, y cuántos resultados positivos son incorrectos de entre todos los casos negativos disponibles (Fawcett, 2004).

La razón de Verdaderos positivos es equivalente a la sensibilidad de la prueba, mientras que los Falsos positivos determinan la especificidad. Cuando la muestra presenta valores de 100% de sensibilidad (ningún falso negativo) y especificidad (ningún falso positivo), la curva se sitúa en la esquina superior izquierda del gráfico, denominado como clasificación perfecta (Concejero, 2004). Por el contrario, una clasificación totalmente aleatoria da lugar a un punto a lo largo de la línea diagonal.

Para ello, el 25% de las localidades de cada especie empleada en el estudio se establecieron al azar, utilizándolas como una muestra de ensayo, y el modelo se realizó con el 75% restante de los datos. Usando este método, un valor de AUC por encima de 0,75 se considera como potencialmente útil (Elith et al., 2006).

Cuando los datos son sólo de presencia, como en el presente estudio y en el realizado por Phillips & Dudík (2008), el AUC se calcula mediante el uso de datos de referencia elegidos de manera uniforme al azar de la zona de estudio. Tras esto, el valor de AUC se interpretó como la probabilidad de que un sitio de presencia elegido esté clasificado por encima de un sitio aleatorio de fondo. Una clasificación aleatoria tiene en promedio una AUC de 0,5, y una clasificación perfecta logra valores cercanos a 1, es decir, tiene una interpretación intuitiva en la que el valor máximo alcanzable de AUC es 1 obteniendo la mayor probabilidad de presencia (Wiley et al., 2003).

La gráfica de omisión se caracteriza por poseer una línea recta que describe la tasa de omisión, definida por el formato de salida logístico, mientras que las otras dos líneas (roja y azul) se corresponden con la fracción de fondo predicha y la omisión de las muestras, respectivamente. En las gráficas de omisión, las predicciones se compararon usando las tasas de omisión, es decir, la fracción de localidades del modelo que no predicen la

probabilidad actual (Phillips & Dudík, 2004). La tasa de omisión indica el rendimiento del modelo.

Como resultado de la modelización se obtiene una imagen en formato “.png” de la distribución probabilística del hábitat idóneo, junto con una gráfica ROC (Receiver Operating Characteristic, o Característica Operativa del Receptor) y una gráfica de omisión. Este proceso se realiza para las 6 especies de estudio.

Comparativas cartográficas

En primer lugar, se llevó a cabo el proceso de modelización mediante MaxEnt. Para ello, se utilizaron las capas de cuadrículas UTM 10x10, recogidas en la Tabla 5, que hacen referencia a la corología real de las especies estudiadas.

Especie	Nº Cuadrículas 10x10
<i>Gypsophila struthium</i> subsp. <i>hispanica</i>	182
<i>Gypsophila struthium</i> subsp. <i>struthium</i>	162
<i>Helianthemum squamatum</i>	345
<i>Herniaria fruticosa</i>	335
<i>Lepidium subulatum</i>	228
<i>Ononis tridentata</i> subsp. <i>tridentata</i>	643

Tabla 5. Número de cuadrículas de las especies vegetales.

Los puntos de muestreo, o cuadrículas 1x1, de cada una de las 6 especies, se transformaron desde el formato ráster hasta el vectorial, y se realizó un cambio de datum de dichas capas desde World Geodetic System 1984 (WGS84) al sistema de referencia European Datum 1950 (ED50).

Se seleccionaron únicamente el 5% de los datos, ya que para el 100% de los datos de la solución saldría representada la totalidad del hábitat para cada cuadrícula UTM de un kilómetro de lado, tanto las que tienen poca hasta de mayor idoneidad de hábitat, y no habría ninguna distinción. De esta manera, se seleccionó el 5% de las UTM 1x1, obteniendo una representación espacial robusta de las soluciones de MaxEnt. Tras ello, se superpusieron en una única solución o mapa unificado.

Posteriormente, se superpusieron diferentes capas de información, proporcionadas por el Grupo de Investigación RNM344 “Biología de la Conservación”, con ArcView y ArcGIS. Dichas capas fueron las siguientes:

- Capa de UTM 10x10 de la Península Ibérica de 71 gipsófitos propuestos por Martínez-Hernández et al. (2013) e incluidos en *el Listado de la flora vascular gipsófila española* de Mota et al. (2011).
- Capa de UTM 1x1 de la Península Ibérica de los gipsófitos que aparecen en Martínez-Hernández (2013).
- Mapa de yesos de Escavy et al. (2012).

- Cartografía de vegetación gipsófila ofrecida por Garrido-Becerra et al. (2011).

Con estas capas se realizaron análisis de Verdaderos Positivos, es decir, una comparación entre el número de cuadrículas que ocupan los gipsófitos con el conjunto de cuadrículas de cada una de las capas citadas, anotando el número de cuadrículas o polígonos de cada capa en total (N), el número de cuadrículas que coinciden con las cuadrículas de la distribución de los gipsófitos (N seleccionadas) junto con sus porcentajes (%), y el número de cuadrículas que no coinciden entre las capas comparadas (N No Seleccionadas) junto con los porcentajes correspondientes (%).

Además, el mapa unificado se utilizó también para realizar un análisis de Verdaderos Positivos. Para ello, se dividió en dos zonas geográficamente bien diferenciadas (Norte y Sur), analizando el número de cuadrículas totales, el número de cuadrículas coincidentes entre las capas comparadas, las cuadrículas que no coincidieron y los porcentajes.

Con objeto de obtener mayor información sobre la efectividad del modelo de distribución, se realizó el análisis anterior para la biogeografía peninsular, segmentando el territorio en unidades biogeográficas, empleando el software ArcView. Así, las 4 capas de información empleadas se dividieron según las provincias biogeográficas, obteniendo 9 unidades (Bajoaragonesa, Bética, Carpetano-Leonesa, Castellana, Catalana-Valenciana, Luso-Extremadurese, Murciano-almeriense, Oroibérica y Pirenaica), ya que son las que afectan a las zonas de distribución de los 6 gipsófitos, anotando para cada una de las 4 capas citadas anteriormente los datos de número de cuadrículas totales (N), número de cuadrículas que coinciden (N Seleccionadas), el porcentaje de éstas (%) y el número de cuadrículas que no coinciden (N No Seleccionadas) y los porcentajes (%).

Estos tres análisis realizados se repitieron empleando los datos de presencia de los 6 gipsófitos de estudio.

Gains

El programa MaxEnt permite rastrear cuáles son las variables ambientales que contribuyen en mayor medida al modelo (Phillips et al., 2006). Para ello, se seleccionó la opción de medida de la importancia de las variables (“Do jackknife to measure variable importance”) del software. Se crea un conjunto de modelos y para cada dato se excluye una variable dando lugar a un modelo con las restantes, obteniéndose gráficas comparativas del comportamiento de las variables ambientales.

El método seguido para evaluar la variable de importancia fue el enfoque “jackknife” de MaxEnt, siguiendo la metodología descrita en Rocha et al., 2012. Éste se puede utilizar para evaluar la fuerza relativa de cada variable predictora (Yost et al., 2008). La contribución de la muestra (“training gain”) se calcula para cada variable, de forma individual, y la permutación

de la importancia de la muestra se obtiene cuando se omite la variable del modelo completo (Phillips et al., 2006).

RESULTADOS

Modelización de especies

Para cada una de las especies gipsófitas de estudio, se obtuvo un mapa logístico de distribución potencial en el territorio peninsular junto con una gráfica de curva de respuesta ROC y una gráfica de omisión.

En los mapas obtenidos de distribución potencial, identificados como Figuras 5, 8, 11, 14, 17 y 20, se representa la distribución mediante una escala de colores de menor a mayor probabilidad de existencia, en la que los colores azules indican baja probabilidad, el verde indica condiciones típicas de los lugares en donde la especie se encuentra, y los colores más cercanos al rojo, indican alta probabilidad ya que son zonas que presentan condiciones adecuadas para el desarrollo de la especie.

Por otro lado, las gráficas de curva de respuesta, identificadas como Figuras 6, 9, 12, 15, 18 y 21, o curva operada por el receptor (ROC, por sus siglas en inglés), representan mediante una línea roja, el ajuste del modelo a los datos de muestreo y la capacidad que tiene el modelo de estimar el hábitat potencial. Además, esta gráfica proporciona el área bajo la curva (AUC, en inglés "Area Under the Curve"). La línea negra recta representa el ajuste del modelo. Por otro lado, la precisión se mide por el área bajo la curva, es decir, un área con un valor de 1 representa una prueba perfecta, y un área de valor 0,5 representa una prueba de valor bajo.

La curva ROC se obtiene mediante el trazado de la sensibilidad en el eje "y" y la especificidad en el eje "x". Para una predicción continua, la curva ROC contiene típicamente un punto por cada presencia. El área bajo la curva (AUC) se determina normalmente mediante la unión de los puntos dando lugar a líneas rectas, empleando el método trapezoidal (en oposición a los métodos paramétricos, que se ajustan a una curva a los puntos).

Además, se obtuvieron gráficas de omisión para cada especie. Éstas se corresponden con las Figuras 7, 10, 13, 16, 19 y 22, expuestas a continuación. La matriz de "Omission and Predicted Area" consta de 3 líneas, con especial importancia la línea de "Omission on training samples" (línea azul), que muestra las fracciones de los puntos de presencia ubicados por fuera del área potencial con base en el modelo de MaxEnt (Fraction value) por los valores del umbral de probabilidad (de bajo a alto) que limita el área predicha (Cumulative threshold).

Gypsophila struthium subsp. *hispanica*

Las zonas de idoneidad de hábitat para la especie *Gypsophila struthium* subsp. *hispanica* son los yesos localizados en la zona noreste de la Península, es decir, el distrito Bardenero, los yesos monegrinos (valle del Ebro), yesos del anticlinal Barbastro-Balaguer a los Pirineos, yesos de las sierras de Cucalón-Montalbán y sierras marginales maestracenses, yesos de Alfambra, Vilel y Alvarracín, yesos de las cuencas de los ríos Arcos y Torrijas-Manzanera y los territorios colindantes.

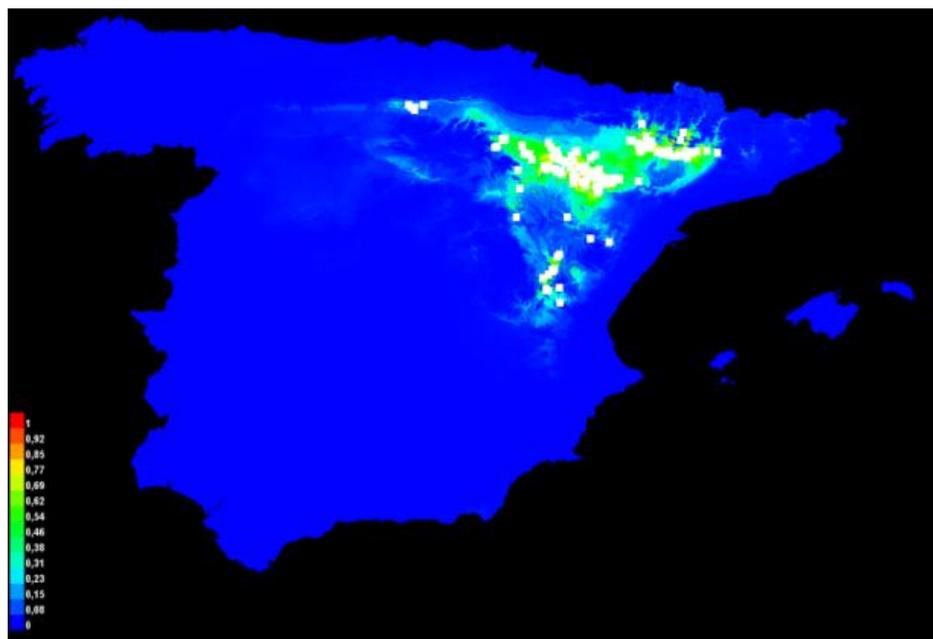


Figura 5. Mapa de distribución potencial de *Gypsophila struthium* subsp. *hispanica*.

La curva ROC del taxón *Gypsophila struthium* subsp. *hispanica*, que se puede apreciar en la Figura 6, presenta un dato de AUC de 0,981, lo que revela un buen ajuste al modelo, siendo el valor más alto obtenido para todas las especies estudiadas.

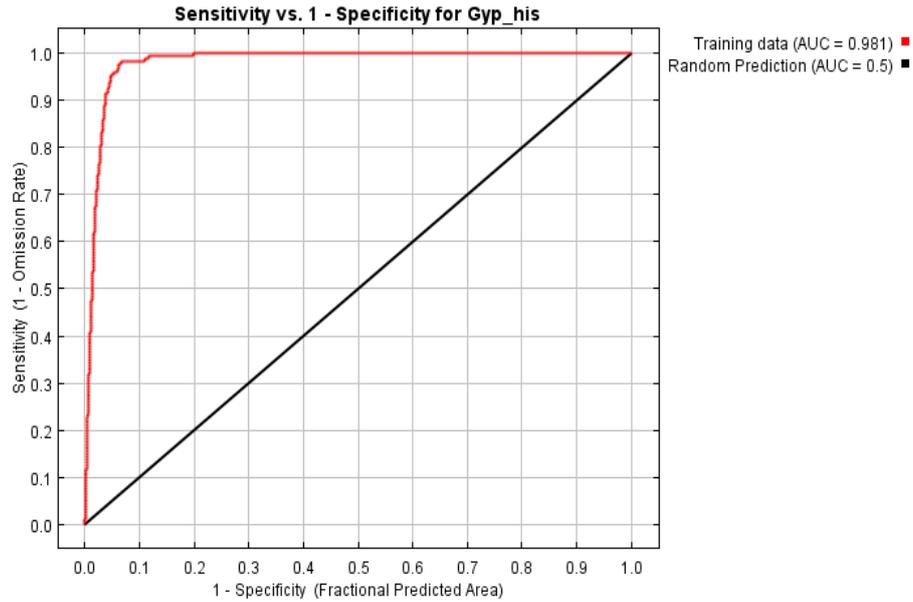


Figura 6. Curva ROC de *Gypsophila struthium* subsp. *hispanica*.

Teniendo en cuenta la Figura 7, la omisión de las muestras se ajusta prácticamente a la totalidad de la predicción de omisión del modelo para la especie ya que las líneas presentan una alta coincidencia a lo largo de toda la longitud.

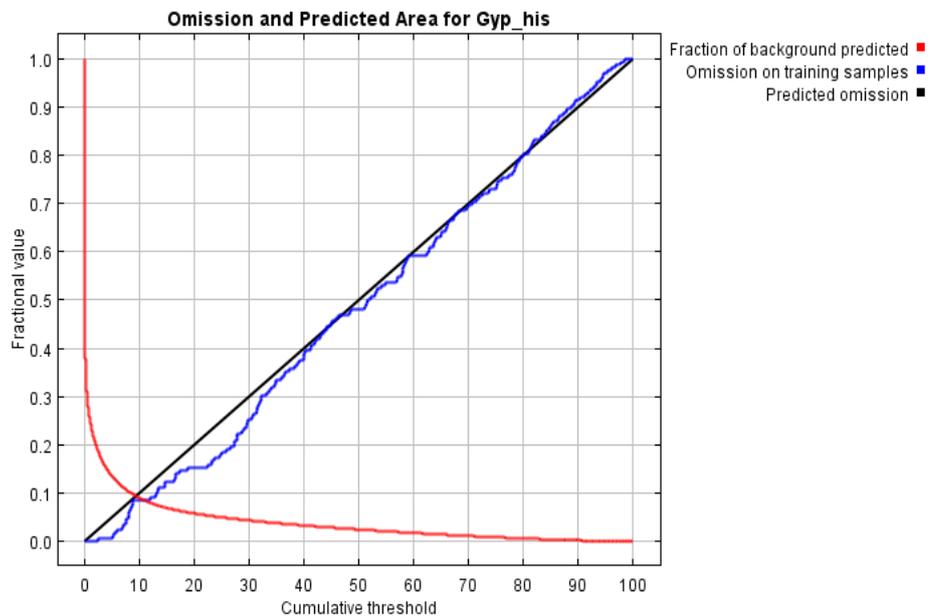


Figura 7. Gráfica de omisión de *Gypsophila struthium* subsp. *hispanica*.

Gypsophila struthium subsp. *struthium*

Las localidades de probabilidad de hábitat para el taxón *Gypsophila struthium* subsp. *struthium* se corresponden con los yesos del centro de la Península y aquellos localizados en el sur-este. Dichos yesos son los siguientes: yesos paleógenos de la vertiente meridional del Sistema Central (Cuencas de los ríos Jarama, Sorbe y Henares), Conquenses (Madrid, Toledo, Guadalajara y Cuenca), yesares Setabenses, yesos de La Manchuela albacetense, yesos sudalicantinos, yesos subbéticos orientales, yesos murcianos septentrionales y manchegos meridionales, yesos de las sierras aledañas del valle del Guadalentín, yesos almerienses orientales (levante de Almería y suroeste de Murcia) y los yesos de Los Barrancos de Topares.

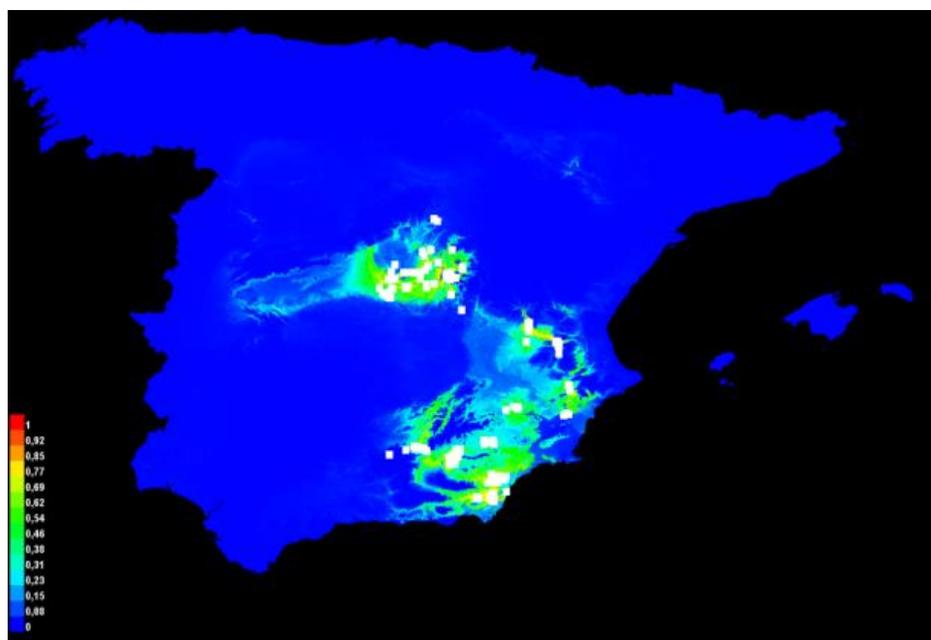


Figura 8. Mapa de distribución potencial de *Gypsophila struthium* subsp. *struthium*.

Con respecto al dato del área bajo la curva (AUC) obtenido para el taxón *Gypsophila struthium* subsp. *struthium*, es un valor muy elevado (0,978), muy cercano a la unidad. Dicho valor obtenido sólo es superado por el resultado del taxón *Gypsophila struthium* subsp. *hispanica*.

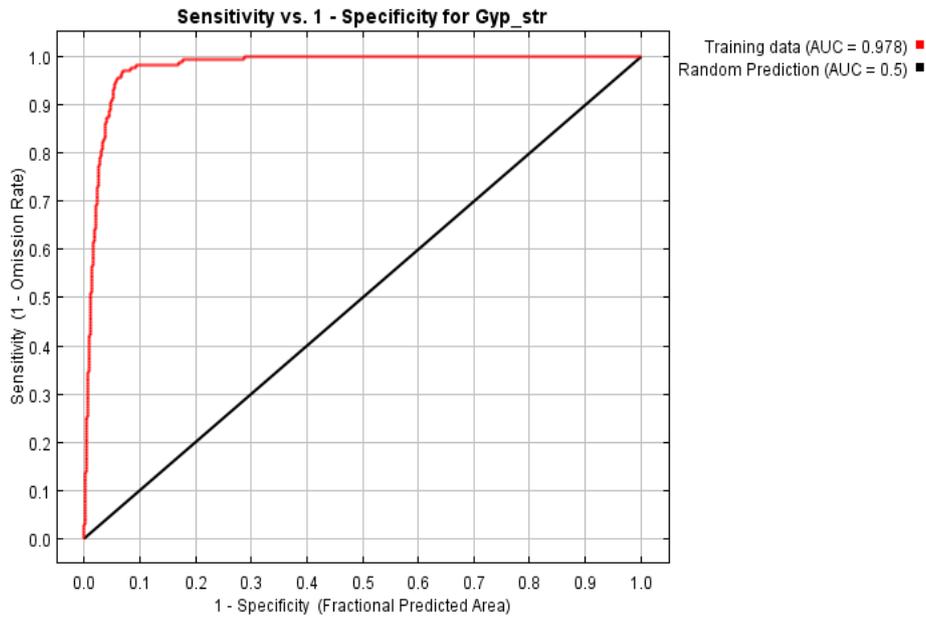


Figura 9. Curva ROC de *Gypsophila struthium* subsp. *struthium*.

Para este mismo taxón, la omisión de las muestras se obtuvo muy cercana a la tasa de omisión del modelo, quedando ambas líneas cercanas entre sí. Sin embargo, aún siendo un resultado bastante bueno, las líneas mostraron la mayor lejanía al compararlas con las de los gipsófitos estudiados.

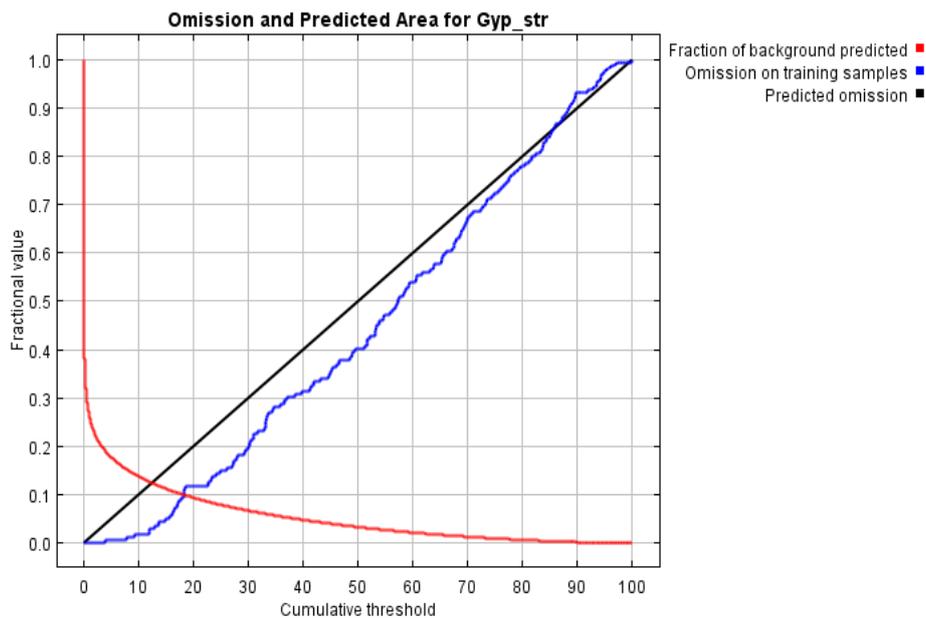


Figura 10. Gráfica de omisión de *Gypsophila struthium* subsp. *struthium*.

Helianthemum squamatum

La especie *Helianthemum squamatum* presenta una amplia distribución por la Península Ibérica, localizándose principalmente en el sur-este, centro y noreste. Esta distribución se corresponde con los yesos monegrinos (Valle del Ebro), yesos del anticlinal Barbastro-Balaguer a los Pirineos, yesos de las sierras de Cucalón-Montalbán y sierras marginales maestracenses, yesos de las cuencas de los ríos Arcos y Torrijas-Manzanera, Conquenses (Madrid, Toledo, Guadalajara y Cuenca), yesos setabenses, yesos de La Manchuela albacetense, yesos de La Marina Baixa, yesos subalicantinos, yesos subbéticos orientales, yesos murcianos septentrionales y manchegos meridionales, yesos manchego-espunenses continentales, yesos murcianos meridionales, yesos de las sierras aledañas del Valle del Guadalentín, yesos litorales y prelitorales del sur de Murcia, yesos almerienses orientales (levante de Almería y suroeste de Murcia), yesos de Los Barrancos de Topares, yesos del Guadiana Menor, yesos del Temple, yesos de Sorbas y territorios colindantes y los yesos almerienses occidentales (Almería, Tabernas y Yesón alto).

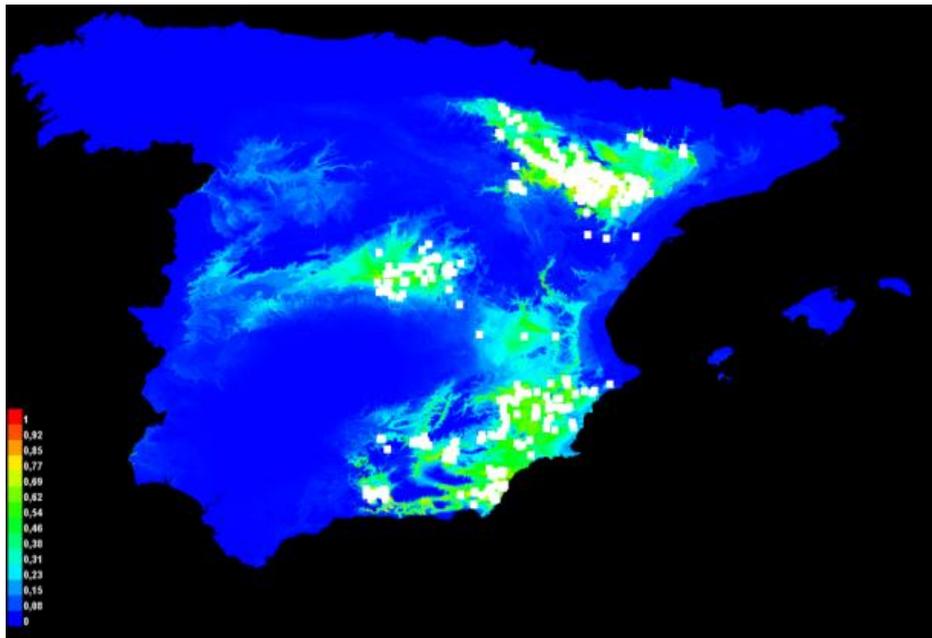


Figura 11. Mapa de distribución de *Helianthemum squamatum*.

En cuanto al valor de AUC obtenido para la especie *Helianthemum squamatum*, de 0,946, indica que la exactitud del modelo es muy elevada, al igual que para el resto de gipsófitos estudiados. Sin embargo, es el segundo valor más bajo obtenido, sólo superado por el resultado del taxón *Ononis tridentata* subsp. *tridentata*.

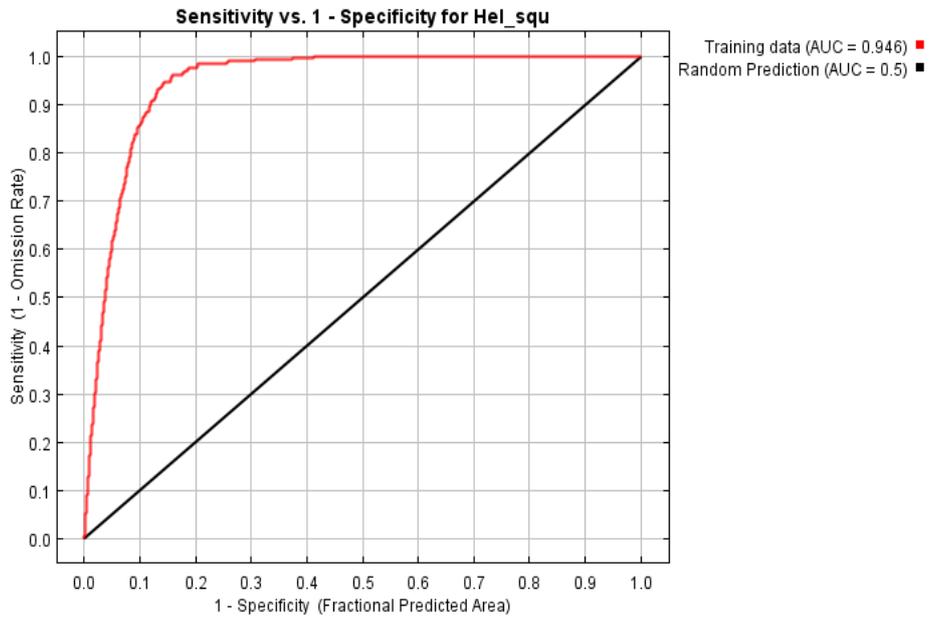


Figura 12. Curva ROC de *Helianthemum squamatum*.

La omisión de las muestras para esta especie también presenta gran coincidencia con la tasa de omisión definida por el modelo, presentando el mayor ajuste entre las líneas de todas las especies vegetales estudiadas.

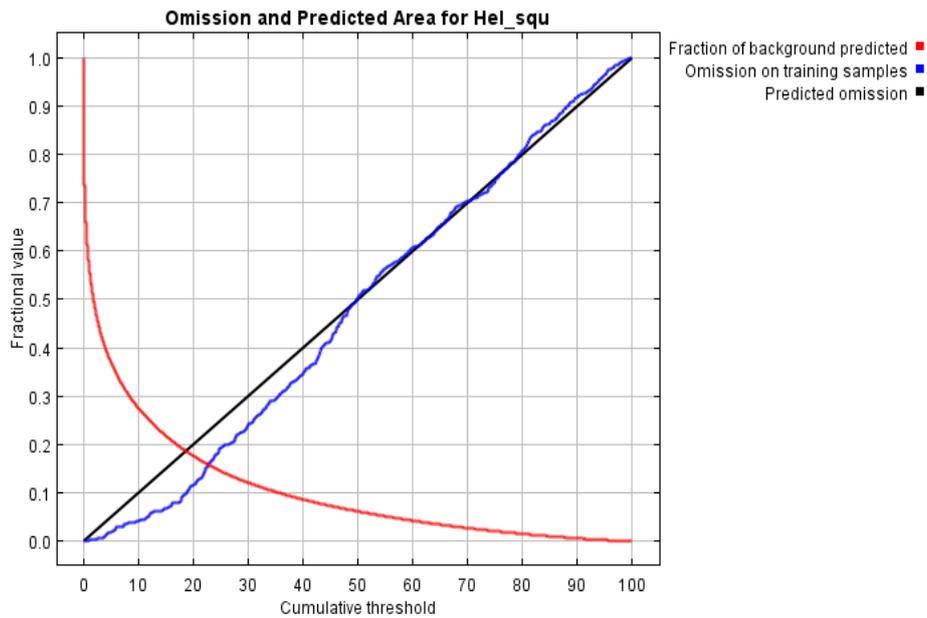


Figura 13. Gráfica de omisión de *Helianthemum squamatum*.

Herniaria fruticosa

Al igual que la especie anterior, *Herniaria fruticosa* se localiza en el Centro peninsular, la zona noreste y este, es decir, abarca los yesos monegrinos (Valle del Ebro), yesos del anticlinal Barbastro-Balaguer a los Pirineos, yesos de las sierras de Cucalón-Motalbán y sierras marginales maestracenses, yesos de Alfambra, Vilel y Albarracín, yesos paleógenos de la vertiente meridional del Sistema Central (Cuencas de los ríos Jarama, Sorbe y Henares), conquenses (Madrid, Toledo, Guadalajara y Cuenca), yesares Setabenses, yesos de La Machuela albacetense, yesos de La Marina Baixa, yesos sudalicantinos, yesos subbéticos orientales, yesos murcianos septentrionales y manchegos meridionales, yesos manchego-espunenses continentales, yesos murcianos meridionales, yesos de las sierras aledañas del valle del Guadalentín y los yesos litorales y prelitorales del sur de Murcia.

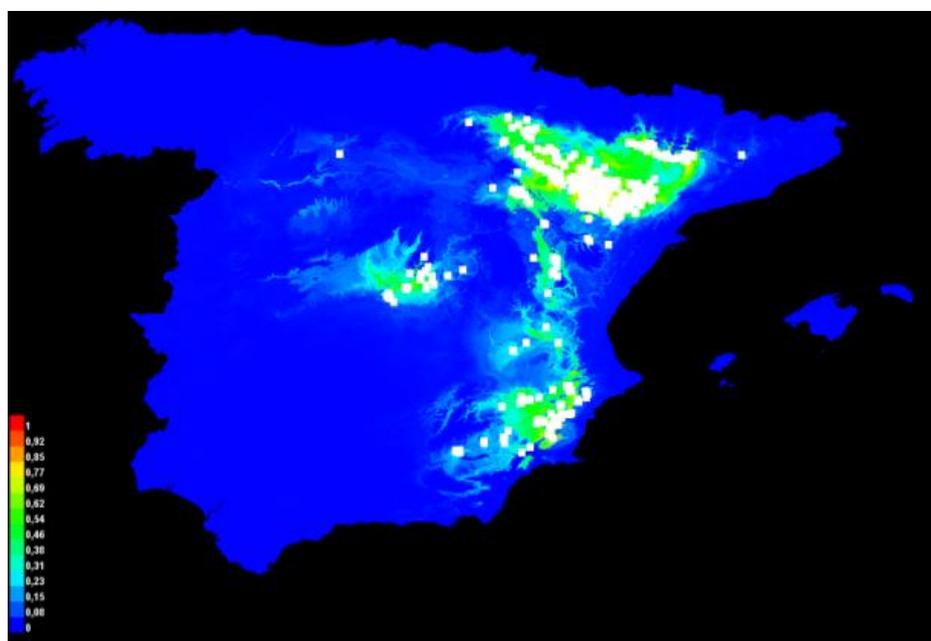


Figura 14. Mapa de distribución de *Herniaria fruticosa*.

Para *Herniaria fruticosa*, el valor de AUC es de 0,955, muy próximo a la unidad, al igual que el resto de valores obtenidos. Este resultado muestra un valor de ajuste intermedio, en comparación con los resultados obtenidos para la totalidad de las especies estudiadas, siendo bastante similar al de la especie *Lepidium subulatum*.

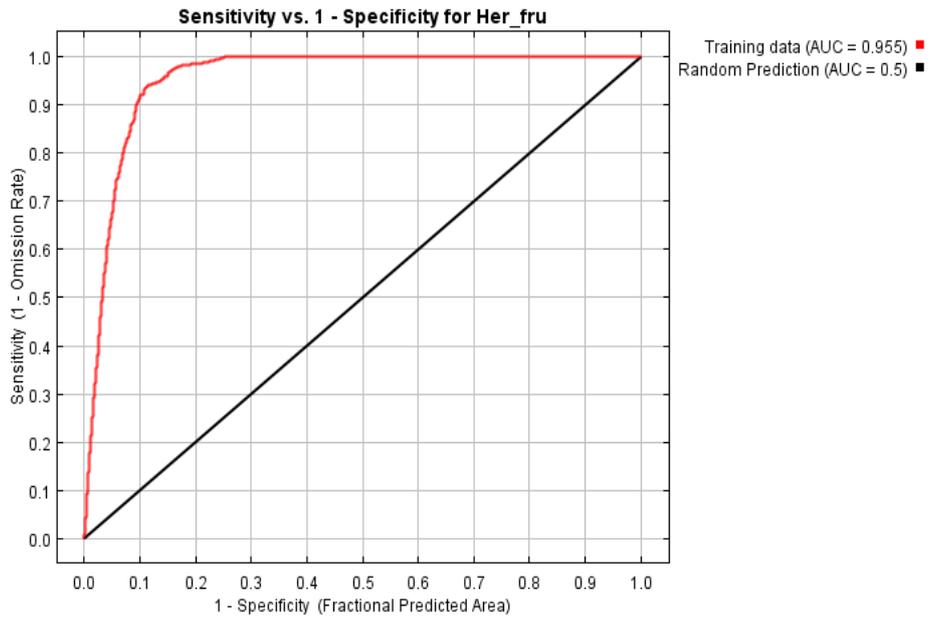


Figura 15. Curva ROC de *Herniaria fruticosa*.

En este caso, prácticamente la totalidad de la línea de omisión de las muestras coincide con la línea de tasa de omisión del modelo. Así, dichas líneas de omisión son las que se representan más próximas de todas las especies estudiadas.

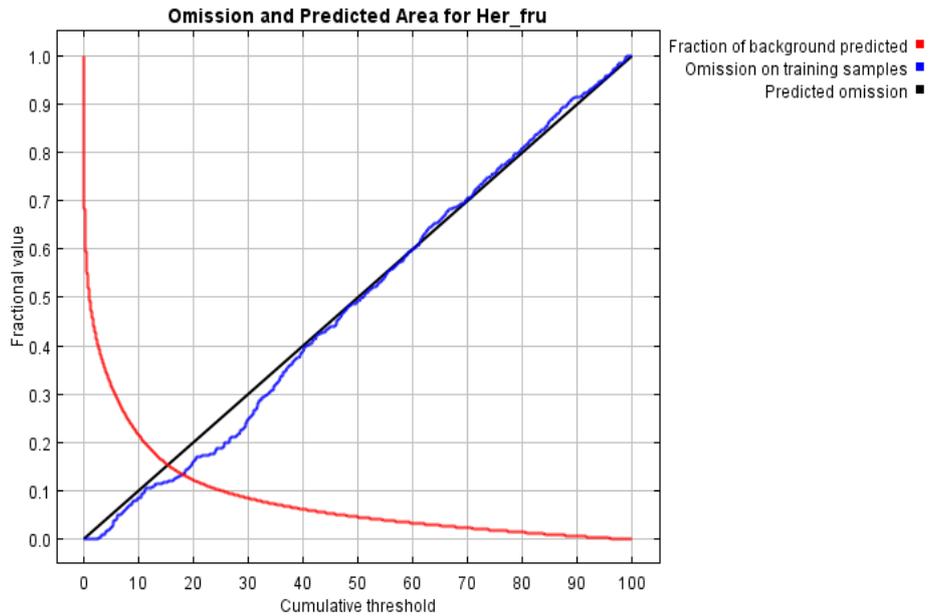


Figura 16. Gráfica de omisión de *Herniaria fruticosa*.

Lepidium subulatum

La especie *Lepidium subulatum* se extiende ampliamente por todo el territorio español peninsular, abarcando las zonas del centro, norte y sureste. Éstas se refieren a los yesos del valle medio del Duero, yesos del distrito Bardenero y territorios aledaños, yesos monegrinos y territorios colindantes (Valle del Ebro), yesos del anticlinal Barbastro-Balaguer a los Pirineos, yesos de Alfambra, Vilel y Albarracín, yesos paleógenos de la vertiente meridional del Sistema Central (Cuencas de los ríos Jarama, Sorbe y Henares), Conquenses (Madrid, Toledo, Guadalajara y Cuenca), yesares Setabenses, yesos de transición Maestrazgo-Manchego-Setabenses, yesos de La Manchuela albacetense, yesos subbéticos orientales, yesos murcianos septentrionales y manchegos meridionales, yesos manchego-espunenses continentales, yesos de las sierras aledañas del valle del Guadalentín, yesos almerienses orientales (levante de Almería y suroeste de Murcia), yesos de Los Barrancos de Topares, yesos del Guadiana Menor, yesos Subbéticos (Base de Mágina, Jaén), yesos de Sorbas y territorios colindantes y yesos almerienses occidentales (Almería, Tabernas y Yesón alto).

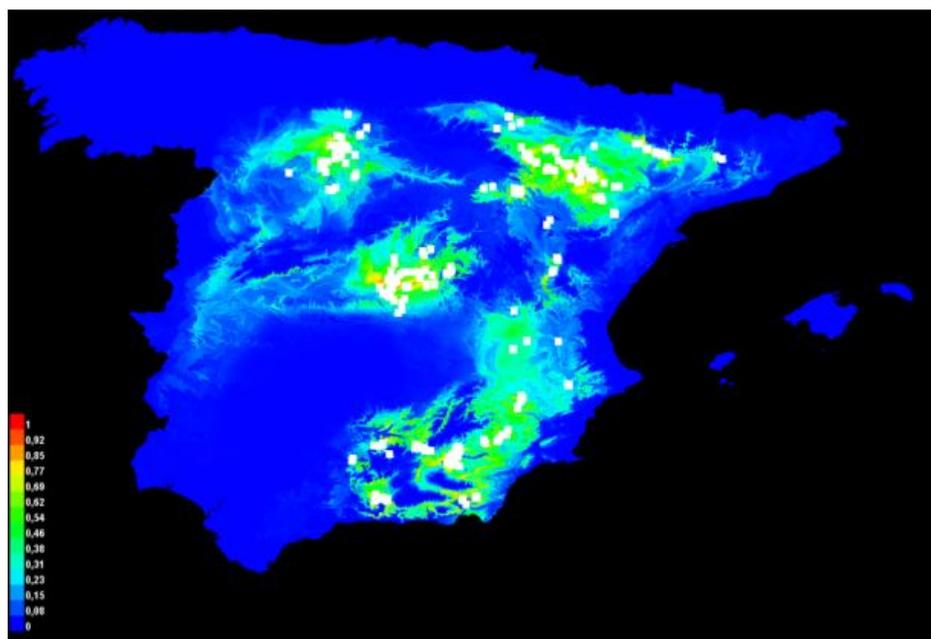


Figura 17. Mapa de distribución de *Lepidium subulatum*.

Para la especie *Lepidium subulatum*, al igual que el resto, se obtuvo un valor de AUC muy alto, de 0,952, superior al valor de referencia de 0,75 y muy cercano a la unidad. Esto revela un gran ajuste al modelo.

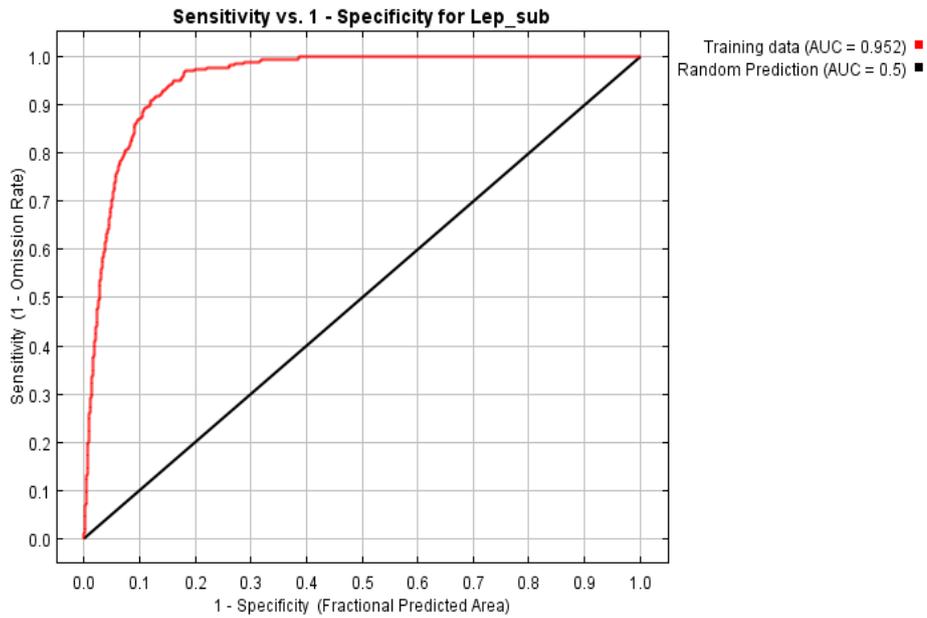


Figura 18. Curva ROC de *Lepidium subulatum*.

La línea de omisión de las muestras para esta especie se encuentra muy próxima a la línea de tasa de omisión del modelo, al igual que en el resto de gipsófitos. Así, existe un pequeño tramo de ambas líneas en donde coinciden y se superponen. En cambio, al igual que para el taxón *Gypsophila struthium* subsp. *struthium*, los resultados de omisión mostraron la mayor lejanía entre las líneas para las especies estudiadas.

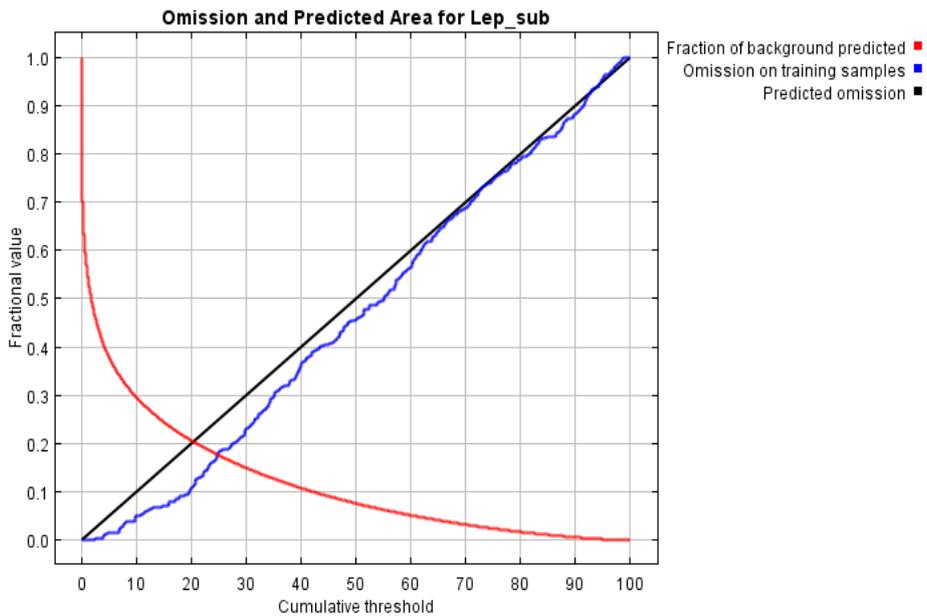


Figura 19. Gráfica de omisión de *Lepidium subulatum*.

Ononis tridentata subsp. *tridentata*

Ononis tridentata subsp. *tridentata*, es una especie que presenta una amplia distribución. Se extiende por el Centro de la Península Ibérica, el norte y el sureste. Las localidades que se encuentran en dichas distribuciones son las siguientes: yesos del valle medio del Duero, yesos monegrinos (Valle del Ebro) y territorios colindantes, yesos del anticlinal Barbastro-Balaguer a los Pirineos, yesos de las sierras de Cucalón-Montalbán y sierras marginales maestracenses, yesos de Alfambra, Vilel y Albarracín, yesos de las cuencas de los ríos Arcos y Torrijas-Manzanera, yesos peolégénos de la vertiente meridional del Sistema Central (Cuencas de los ríos Jarama, Sorbe y Henares), Conquenses (Madrid, Toledo Guadalajara y Cuenca), yeseras setabenses, yesos de La Manchuela albacetense, yesos de La Marina Baixa, yesos sudalicantinos, yesos subbéticos orientales, yesos murcianos septentrionales y manchegos meridionales, yesos manchego-espunenses continentales, yesos murcianos meridionales, yesos de las sierras aledañas del valle del Guadalentín, yesos litorales y prelitorales del sur de Murcia, yesos almerienses orientales (levante de Almería y suroeste de Murcia), yesos de Los Barrancos de Topares, yesos de Sorbas y territorios colindantes y yesos almerienses occidentales (Almería, Tabernas y Yesón alto).

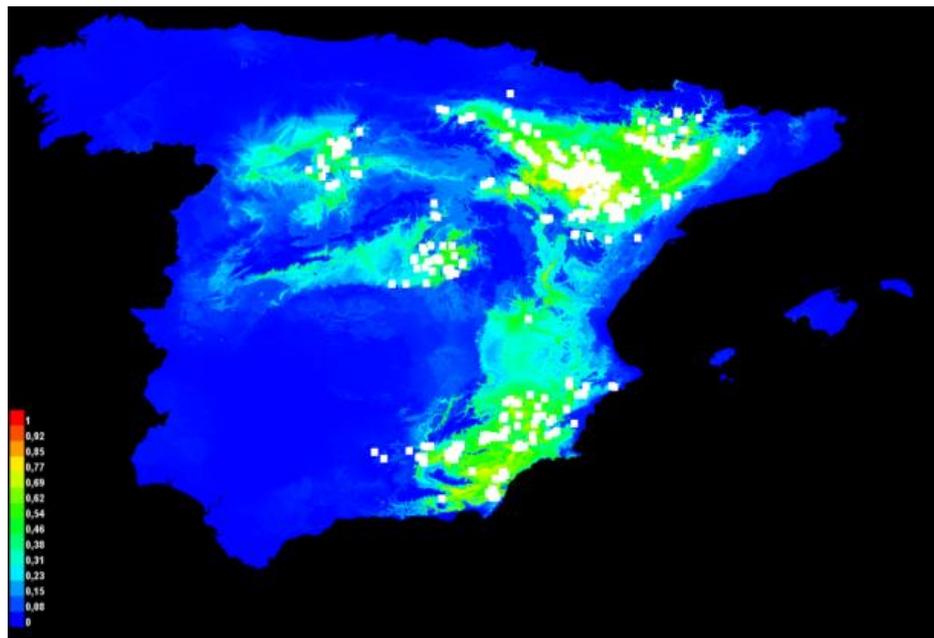


Figura 20. Mapa de distribución de *Ononis tridentata* subsp. *tridentata*.

Al igual que el resto de especies, *Ononis tridentata* subsp. *tridentata* presenta un valor de AUC muy elevado, de 0,925, superior al valor de referencia de 0,75. A pesar de ser un valor alto, es el resultado más bajo obtenido en la modelización de MaxEnt para las especies estudiadas.

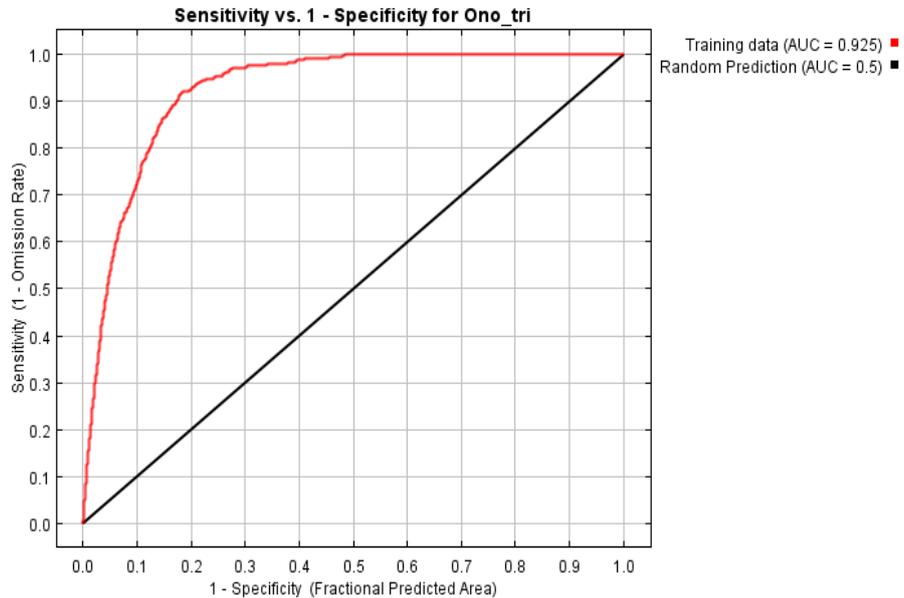


Figura 21. Curva ROC de *Ononis tridentata* subsp. *tridentata*.

La línea de omisión de las muestras coincide en ciertas zonas del trazado con la línea del modelo de la tasa de omisión. Además, es relevante la cercanía de ambas líneas en todos los valores.

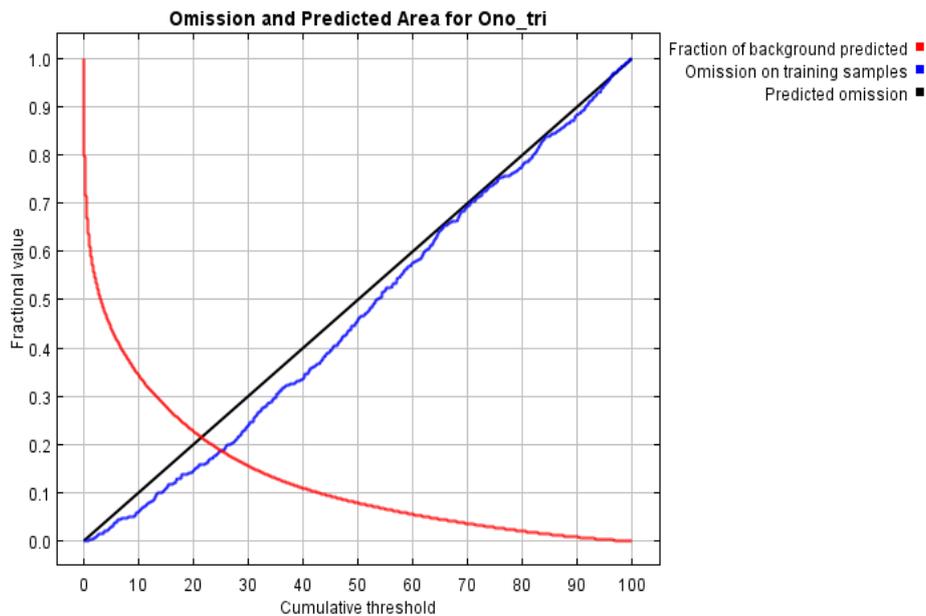


Figura 22. Gráfica de omisión de *Ononis tridentata* subsp. *tridentata*.

Comparativas cartográficas

Mapas de modelización

En primer lugar, se obtuvieron 6 mapas en los que se representaron las soluciones de MaxEnt (color rojo) de cada especie, junto con las cuadrículas UTM 10x10 y las presencias o cuadrículas 1x1 (color verde). Todas estas capas citadas se visualizaron sobre las provincias de la Península Ibérica, en las Figuras desde la 23 hasta la Figura 28.

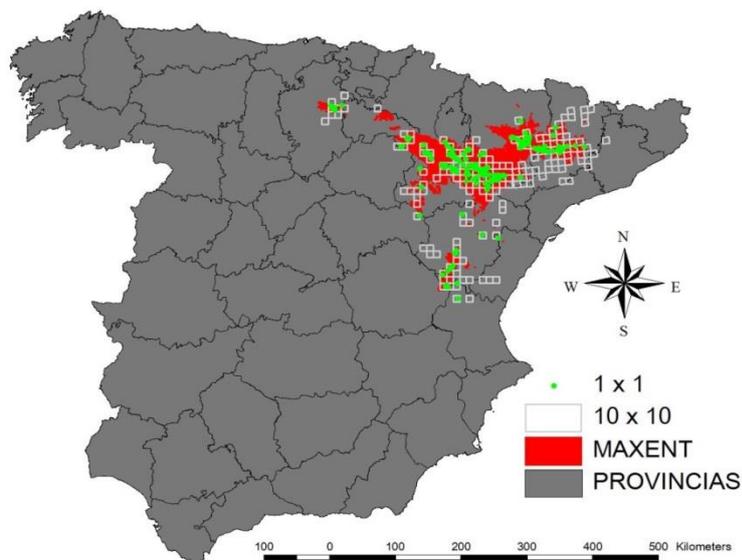


Figura 23. Mapa de yesos de *Gypsophilia struthium* subsp. *hispanica*.

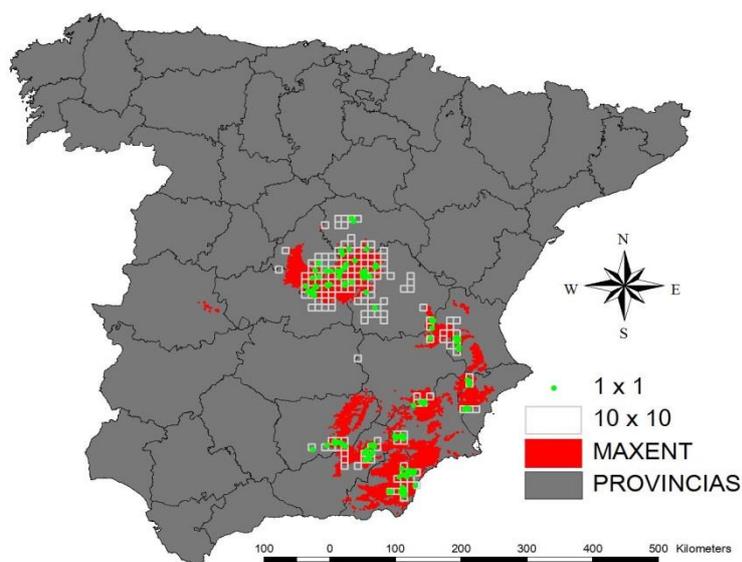


Figura 24. Mapa de yesos de *Gypsophilia struthium* subsp. *struthium*.

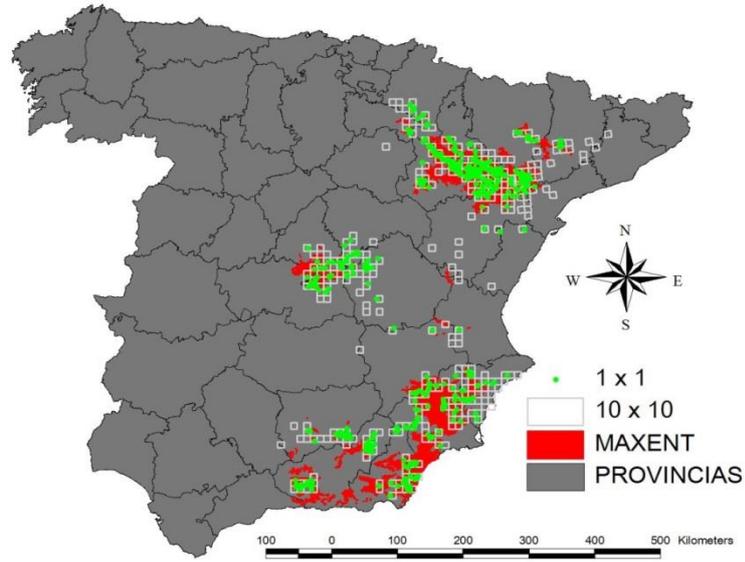


Figura 25. Mapa de yesos de *Helianthemum squamatum*.

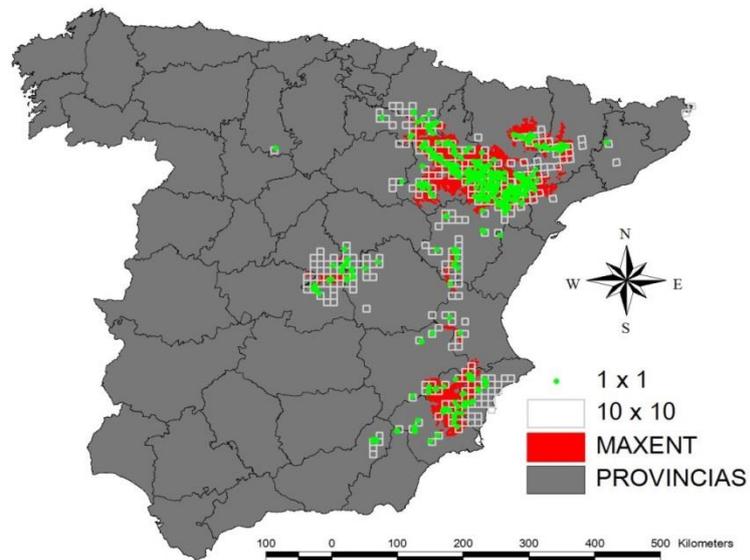


Figura 26. Mapa de yesos de *Herniaria fruticosa*.

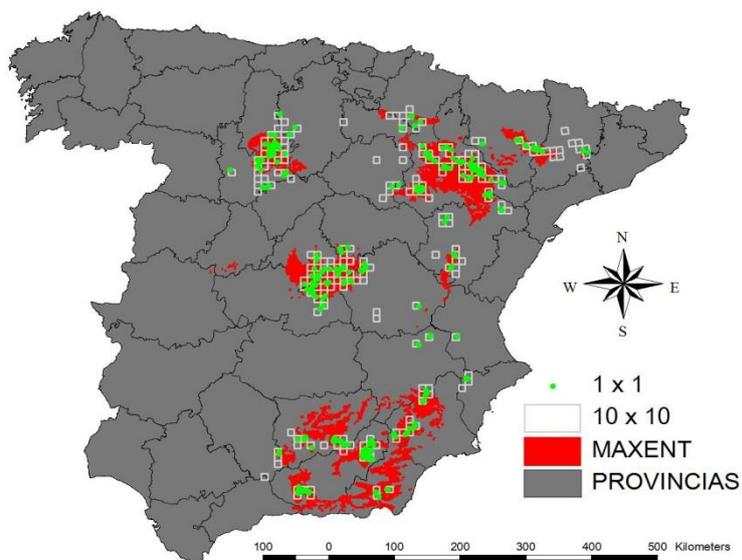


Figura 27. Mapa de yesos de *Lepidium subulatum*.

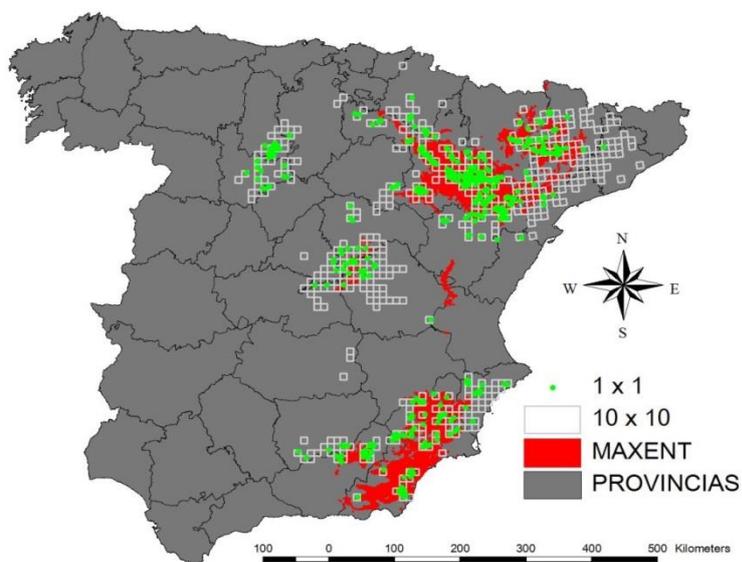


Figura 28. Mapa de yesos de *Ononis tridentata* subsp. *tridentata*.

Mapa unificado

Tras esto, se superpusieron los mapas anteriormente obtenidos, dando como resultado un sólo mapa unificado, Figura 29, en el que se representa la distribución de los 6 gipsófitos mediante una graduación de colores de menor a mayor superposición, es decir, los tonos más oscuros indican mayor concentración y presencia de gipsófitos, y los tonos más claros indican menor presencia.

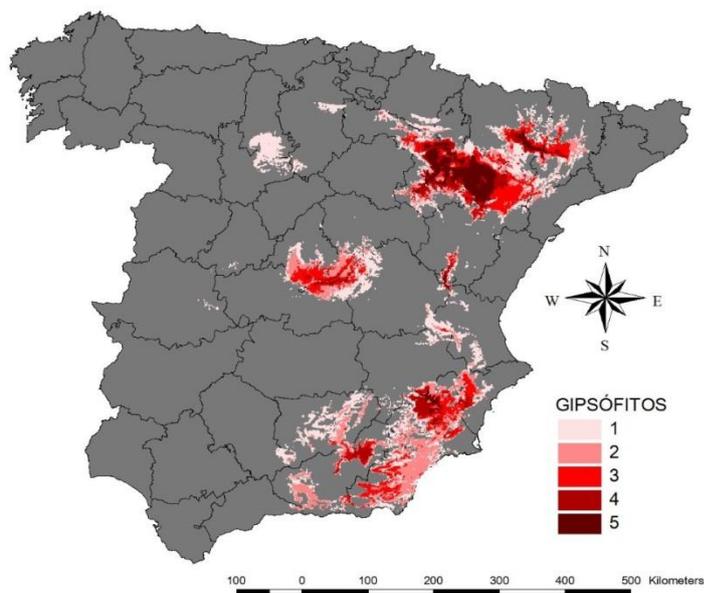


Figura 29. Mapa unificado de los gipsófitos.

Análisis de Verdaderos Positivos de MaxEnt

Se obtuvieron 4 mapas derivados del cruce del mapa de yesos, representado en la Figura 29, con las 4 capas de información, proporcionadas por el Grupo de Investigación (UTM 10x10, UTM 1x1, yesos de Escavy et al. (2012) y cartografía gipsófila Garrido-Becerra et al. (2011)), empleando los datos recogidos en la Tabla 6, obtenidos de dichos cruces.

Capa	N	N Seleccionadas	%	N No Seleccionadas	%
10x10	1174	732	62,35	442	37,65
1X1	2870	2182	76,03	688	23,97
ESCAVY	1029	317	30,81	712	69,19
YESOS	5821	3250	55,83	2571	44,17

Tabla 6. Datos del análisis de superposición.

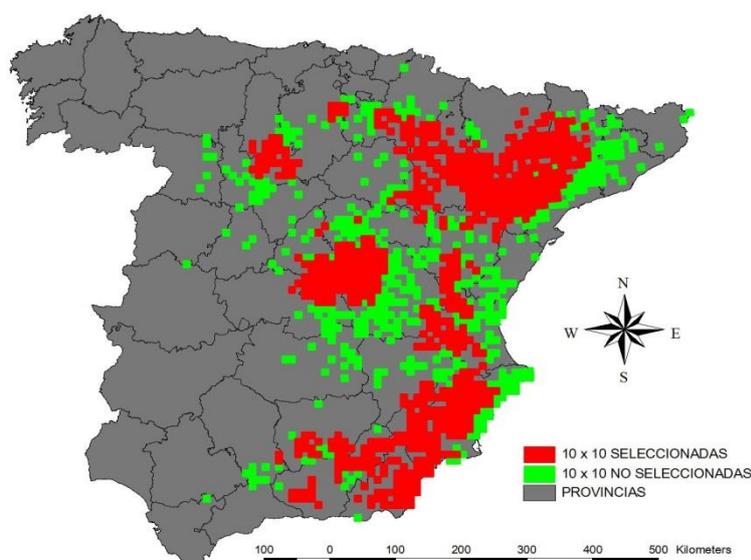


Figura 30. Cruce con la capa de 10x10 km.

En el mapa de la Figura 30, se representa la información sobre la distribución elaborada con la combinación de las áreas obtenidas en el modelo para las 6 especies (color rojo) junto con el 5 % de las cuadrículas de la capa 10x10 km (color verde).

Se obtuvo que 732 de las 1174 cuadrículas totales de la capa de 10x10 coincidieron con las cuadrículas de distribución de los 6 gipsófitos de estudio. Esto supone el 62,35 % de la capa de 10x10, un valor que está por debajo del 75% que se impone MaxEnt para evaluar positivamente el ajuste de sus curvas ROC, tal y como se ha señalado en el apartado de Material y Métodos.

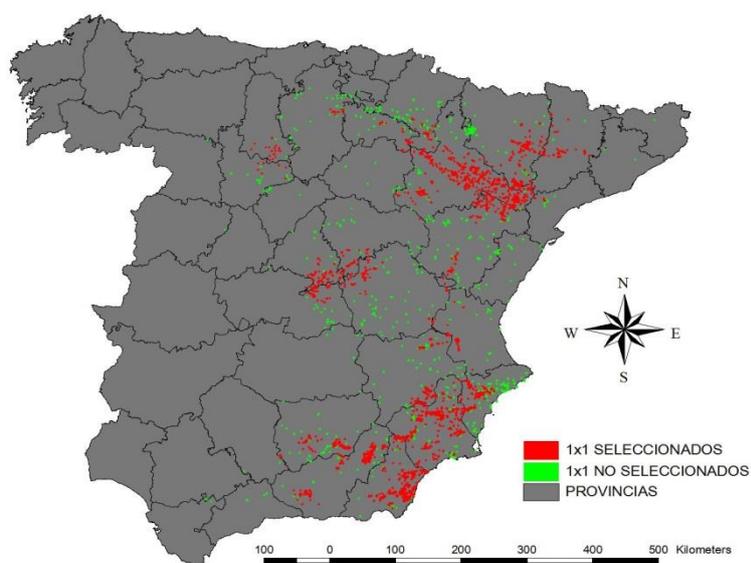


Figura 31. Cruce con la capa 1x1 km.

La Figura 31 representa tanto la distribución generada por el modelo para el conjunto de las 6 especies estudiadas (color rojo) como el 5% de las cuadrículas de la capa 1x1 km (color verde). Como resultado se obtuvieron 2182 cuadrículas de las 2870 de la capa 1x1 que coincidieron con la distribución peninsular del modelo para las especies vegetales de estudio, es decir, el 76,03 % de la capas coinciden.

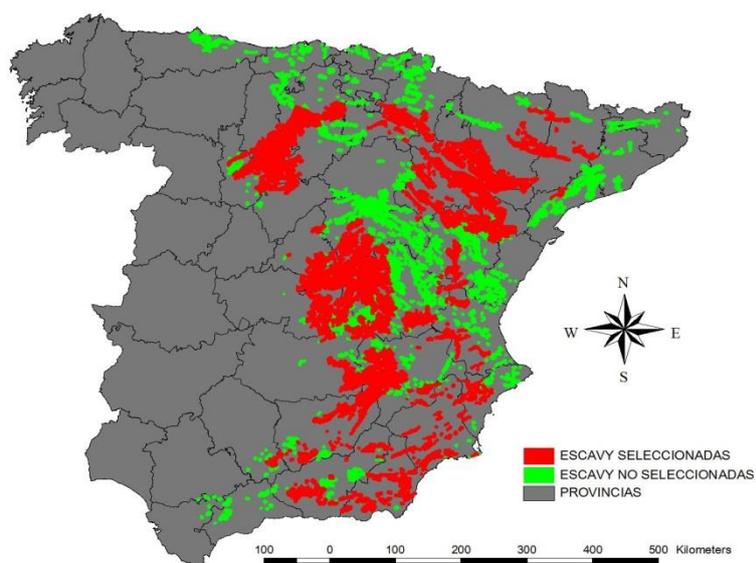


Figura 32. Cruce con la capa de Escavy et al. (2012).

En cuanto a la comparación entre la capa de distribución de los gipsófitos (color rojo) y la de yesos de Escavy (color verde), representada en la Figura 32, se obtuvo que 317 de los 1029 polígonos coinciden, o lo que es lo mismo, el 30,81 % de las capas presentó concordancia.

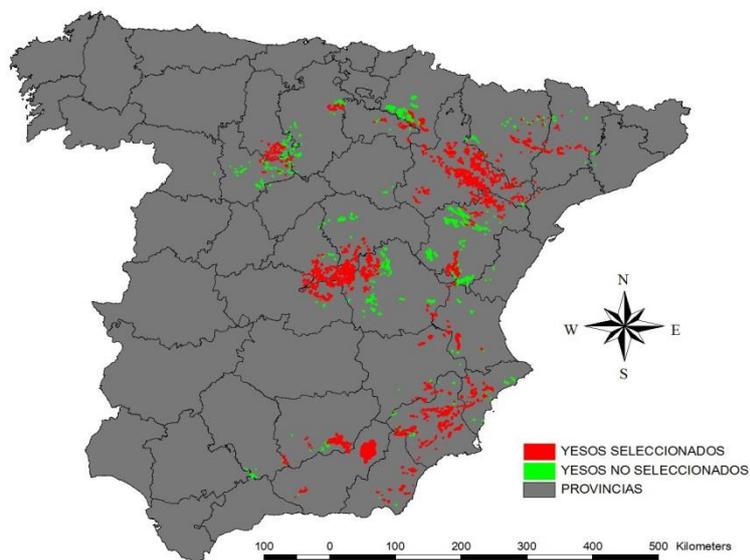


Figura 33. Cruce con la capa de vegetación gipsófila de Garrido-Becerra et al. (2011).

Por último, la Figura 33, tras el cruce con la capa de vegetación gipsófila de Garrido-Becerra et al. 2011 (color verde), el 55,83 % de los afloramientos encajan, es decir, un total de 3250 de 5821 de los polígonos se encontraron dentro de la distribución de los gipsófitos de estudio.

Tras la obtención de los mapas anteriores, los afloramientos de yeso de la Península Ibérica se dividieron en dos zonas, norte y sur, tal y como se señaló en el apartado de material y métodos. Esta partición se puede ver representada en el mapa de la Figura 34.

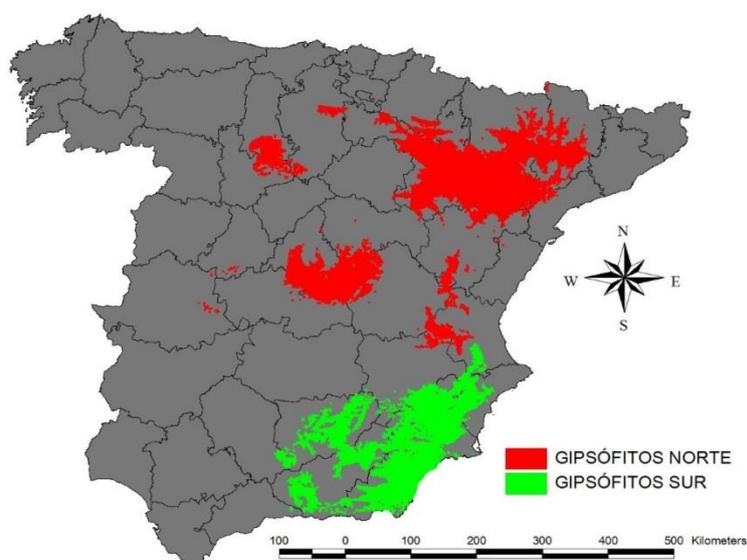


Figura 34. Zonificación Norte y Sur de los gipsófitos.

En las tablas 7 y 8 se recogen los datos correspondientes al número de cuadrículas de las zonas divididas (N Norte y N Sur) de la distribución de los gipsófitos, el número de éstas que intersectan a la capa de yesos de la Figura 30 (N Seleccionadas) y los porcentajes correspondientes.

Capa	N Norte	N Seleccionadas	%	N No Seleccionadas	%
10x10	883	506	57,30	377	42,70
1X1	1550	1117	72,06	433	27,94
ESCAVY	737	153	20,76	584	79,24
YESOS	5077	2658	52,35	2419	47,65

Tabla 7. Datos de la zona Norte.

Capa	N Sur	N Seleccionadas	%	N No Seleccionadas	%
10x10	291	226	77,66	65	22,34
1X1	1320	1065	80,68	255	19,32
ESCAVY	296	164	55,41	132	44,59
YESOS	744	592	79,57	152	20,43

Tabla 8. Datos de la zona Sur.

Por otro lado, se realizó un análisis de Verdaderos positivos empleando las unidades biogeográficas de la Península Ibérica y las soluciones del área de distribución modelizada por MaxEnt para las 6 especies estudiadas, obteniendo para cada una de las 4 capas de información, datos sobre el número de cuadrículas totales que forman cada unidad biogeográfica (N), el número de éstas que coinciden con las cuadrículas de las capas (N seleccionadas), el número de cuadrículas no coincidentes entre las capas (N No Seleccionadas) y los porcentajes (%). Todos estos datos quedan recogidos en las Tablas 9, 10, 11 y 12

Unidad	N 10x10	N Seleccionadas	%	N No Seleccionadas	%
BAJOARAGONESA	309	257	83,17	52	16,83
BETICA	103	78	75,73	25	24,27
CARPETANOLEONESA	37	6	16,22	31	83,78
CASTELLANA	441	253	57,37	188	42,63
CATALANA VALENCIANA	158	68	43,04	90	56,96
LUSOEXTREMADURENSE	9	0	0,00	9	100,0
MURCIANOALMERIENSE	151	122	80,79	29	19,21
OROIBERICA	162	81	50,00	81	50,00
PIRENAICA	50	25	50,00	25	50,00

Tabla 9. Análisis de las unidades biogeográficas de la capa 10x10.

Respecto a la capa de 10x10, las unidades biogeográficas Bajo-Aragonesa y Murciano-Almeriense obtuvieron un mayor porcentaje de coincidencia, con 83,17 % y 80,79%, respectivamente. En cambio, las unidades que menos coincidencias obtuvieron fueron Luso-Extremadurenses (100%) y Carpetano-Leonesa (83,78%).

Unidad	N 1x1	N Seleccionadas	%	N No Seleccionadas	%
BAJOARAGONESA	892	771	86,43	121	13,57
BETICA	294	230	78,23	64	21,77
CARPETANOLEONESA	9	0	0,00	9	100,0
CASTELLANA	703	500	71,12	203	28,88
CATALANA VALENCIANA	160	89	55,63	71	44,38
LUSOEXTREMADURENSE	2	0	0,00	2	100,0
MURCIANOALMERIENSE	696	595	85,49	101	14,51
OROIBERICA	185	60	32,43	125	67,57
PIRENAICA	23	15	65,22	8	34,78

Tabla 9. Análisis de las unidades biogeográficas de la capa 1x1.

Al igual que en la tabla anterior, se obtuvieron los porcentajes más altos de intersección de la capa de 1x1 con las unidades Bajo-Aragonesa (86,43 %) y Murciano-Almeriense (85,49 %). Los porcentajes mayores de divergencia de cuadrículas entre la capa de presencias reales y las unidades biogeográficas, se dieron para Carpetano-Leonesa (100%) y Oroibérica (67,57%).

Unidad	N Escavy	N Seleccionadas	%	N No Seleccionadas	%
BAJOARAGONESA	94	66	70,21	28	29,79
BETICA	110	47	42,73	63	57,27
CARPETANOLEONESA	18	4	22,22	14	77,78
CASTELLANA	378	101	26,72	277	73,28
CATALANA VALENCIANA	140	30	21,43	110	78,57
LUSOEXTREMADURENSE	5	2	40,00	3	60,00
MURCIANOALMERIENSE	93	81	87,10	12	12,90
OROIBERICA	208	50	24,04	158	75,96
PIRENAICA	29	6	20,69	23	79,31

Tabla 101. Análisis de las unidades biogeográficas de la capa de Escavy et al., 2012.

En cuanto a la comparativa de la capa de Escavy con las unidades biogeográficas, las que obtuvieron mayor porcentaje de coincidencia siguen siendo las anteriormente citadas: Murciano-Almeriense (87,10 %) y Bajo-Aragonesa (70,21 %). Respecto al grado de discordancia entre las capas, los valores de todas las capas se aproximan al 70%, destacando las unidades Pirenaica (79,31%) y Catalana-Valenciana (78,57%).

Unidad	N Yesos	N Seleccionadas	%	N No Seleccionadas	%
BAJOARAGONESA	3276	1939	59,19	1337	40,81
BETICA	182	135	74,18	47	25,82
CARPETANOLEONESA	5	0	0,00	5	100,0
CASTELLANA	1148	740	64,46	408	35,54
CATALANA VALENCIANA	60	36	60,00	24	40,00
LUSOEXTREMADURENSE	0	0	0,00	0	0
MURCIANOALMERIENSE	390	330	84,62	60	15,38
OROIBERICA	772	80	10,36	692	89,64
PIRENAICA	40	20	50,00	20	50,00

Tabla 112. Análisis de las unidades biogeográficas de la capa de Garrido-Becerra et al., 2011.

Por último, la superposición de la capa de yesos de Garrido-Becerra et al. (2011) obtuvo los mayores porcentajes de coincidencia de cuadrículas con las unidades biogeográficas Murciano-Almeriense y Bética, con valores de 84,62 % y 74,18 %, respectivamente. En cuanto a los porcentajes de discordancia, la unidad Carpetano-Leonesa presentó el valor más alto (100%), seguido de la unidad Oroibérica (89,64%).

Análisis de Verdaderos Positivos con datos de presencias

Posteriormente, se analizaron las presencias reales de los 6 gipsófitos de estudio con las presencias de las capas de información del grupo de investigación. Para ello, las cuadrículas de tamaño 1x1, con las presencias reales muestreadas de las 6 especies de gipsófitos, se superpusieron unas sobre otras, dando como resultado una capa con un total de 163765 cuadrículas 1x1. Ésta se añadió a las 4 capas de información empleadas anteriormente, con el objetivo de conocer el número de cuadrículas que intersectan ambas capas (N Seleccionadas), el número de cuadrículas que no coinciden (N No Seleccionadas) y sus porcentajes (%), recogidos en la Tabla 13.

Capa	UTM 1X1	N Seleccionadas	%	N No Seleccionadas	%
10x10	163765	134003	81,83	29762	18,17
1X1	163765	18929	11,56	144836	88,44
ESCAVY	163765	81066	49,50	82699	50,50
YESOS	163765	27743	16,94	136022	83,06

Tabla 13. Datos del análisis de Verdaderos positivos.

Los resultados de dicho análisis manifestaron que el 81,83% de la capa de 10x10 coincidieron respecto a la capa creada con la superposición de las presencias de las 6

especies, un 11,56% de la capa de cuadrículas 1x1, un 49,50% de la capa de Escavy et al. (2012), y un 16,94 % de la capa de vegetación gipsófila proporcionada por Garrido-Becerra et al. (2011). Sin embargo, las capas de 1x1 y la capa de Garrido-Becerra et al. (2011), presentaron unos porcentajes muy altos de cuadrículas no coincidentes, siendo de 88,44% y 83,06%, respectivamente. A éstas le siguió la capa de Escavy et al. (2012), con un casi igual número de coincidencias y discordancias de cuadrículas (50,50%). Por último, la capa de 10x10 es la que mayor número de coincidencias presentó, ya que solamente el 18,17% de las cuadrículas no se superpusieron.

Además de esto, se realizó el análisis de Verdaderos positivos para diferenciación de las zonas peninsular en Norte y Sur, obteniendo como resultados los recogidos en las tablas 14 y 15.

Capa	1x1 Norte	N Seleccionadas	%	N No Seleccionadas	%
10x10	109301	93302	85,36	15999	14,64
1X1	109301	11709	10,71	97592	89,29
ESCAVY	109301	64975	59,45	44326	40,55
YESOS	109301	20646	18,89	88655	81,11

Tabla 12. Datos del análisis de Verdaderos positivos en la zona Norte.

En la zona de distribución norte de los gipsófitos la capa con mayor similitud fue la de cuadrículas 10x10, con un 85,36%. Mientras que el resto de las capas presentaron porcentaje altos de divergencias de cuadrículas.

Capa	1x1 Sur	N Seleccionadas	%	N No Seleccionadas	%
10x10	54464	40701	74,73	13763	25,27
1X1	54464	7220	13,26	47244	86,74
ESCAVY	54464	16091	29,54	38373	70,46
YESOS	54464	7097	13,03	47367	86,97

Tabla 135. Datos del análisis de Verdaderos positivos en la zona Sur.

Al igual que en la zona norte, en el sur la capa que mayor semejanza presentó fue la de 10x10, aunque con un porcentaje de coincidencias más bajo (74,73%). El resto de capas obtuvieron porcentajes muy elevados de diferencias respecto al número de cuadrículas, siendo la capa de yesos de Garrido-Becerra et al. (2011), con un 86,97%, la que menos concordancia obtuvo, seguida, con un valor muy parecido, de la capa de 1x1 (86,74%) y de la capa de Escavy et al. (2012), con un valor de 70,46%.

Para finalizar, se obtuvo una serie de resultados, recogidos en las Tablas 16, 17, 18 y 19, correspondientes al análisis de Verdaderos positivos, realizado con la capa resultante de la superposición de las localidades de presencia reales de los 6 gipsófitos segmentadas en unidades biogeográficas y comparándolas con las 4 capas de información del grupo de investigación. En total, la capa obtenida con las unidades biogeográficas contiene en total 163765 polígonos.

Unidad	N 10x10	N Seleccionadas	%	N No Seleccionadas	%
BAJOARAGONESA	80070	69001	86,18	11069	13,82
BÉTICA	15118	8018	53,04	7100	46,96
CARPETANOLEONESA	2132	238	11,16	1894	88,84
CASTELLANA	31095	27642	88,90	3453	11,10
CATALANA VALENCIANA	523	523	100,00	0	0,00
LUSOEXTREMADURENSE	328	0	0,00	328	100,00
MURCIANOALMERIENSE	29584	24095	81,45	5489	18,55
OROIBERICA	4964	3577	72,06	1387	27,94
PIRENAICA	833	604	72,51	229	27,49

Tabla 14. Comparativa unidades biogeográficas y capa de 10x10.

Como se puede apreciar en la tabla anterior, para la unidad biogeográfica Catalana-Valenciana se obtuvo la totalidad de puntos de coincidencia (100%) respecto a la capa de 10x10. La unidad Castellana coincidió en un 88,90% de polígonos. En cambio, las unidades Luso-Extremadurenses y Carpetano-Leonesa fueron las que más discordancia presentaron, con 100% y 88,94%, respectivamente.

Unidad	N 1x1	N Seleccionadas	%	N No Seleccionadas	%
BAJOARAGONESA	80070	9362	11,69	70708	88,31
BÉTICA	15118	1517	10,03	13601	89,97
CARPETANOLEONESA	2132	0	0,00	2132	100,00
CASTELLANA	31095	3249	10,45	27846	89,55
CATALANA VALENCIANA	523	257	49,14	266	50,86
LUSOEXTREMADURENSE	328	0	0,00	328	100,00
MURCIANOALMERIENSE	29584	4292	14,51	25292	85,49
OROIBERICA	4964	313	6,31	4651	93,69
PIRENAICA	833	39	4,68	794	95,32

Tabla 15. Comparativa unidades biogeográficas y capa 1x1.

En cuanto a la comparativa con la capa de 1x1, la unidad biogeográfica que mayor porcentaje de polígonos coincidentes obtuvo fue la Catalana-Valenciana con un 49,14%. Todas las unidades presentaron valores bajos de correlación, por lo que las capas se pueden considerar totalmente diferentes en cuanto a la localización de la geografía yesífera.

Unidad	N Escavy	N Seleccionadas	%	N No Seleccionadas	%
BAJOARAGONESA	80070	45592	56,94	34478	43,06
BÉTICA	15118	4573	30,25	10545	69,75
CARPETANOLEONESA	2132	11	0,52	2121	99,48
CASTELLANA	31095	18577	59,74	12518	40,26
CATALANA VALENCIANA	523	509	97,32	14	2,68
LUSOEXTREMADURENSE	328	118	35,98	210	64,02
MURCIANOALMERIENSE	29584	9228	31,19	20356	68,81
OROIBERICA	4964	2274	45,81	2690	54,19
PIRENAICA	833	122	14,65	711	85,35

Tabla 16. Comparativa unidades biogeográficas y capa de Escavy et al., 2012.

La comparativa con la capa de Escavy et al. (2012) mostró que solamente la unidad biogeográfica Catalana-Valenciana presenta coincidencias de polígonos (97,32%). El resto de unidades se caracterizaron por poseer mayor número de discrepancias entre las capas, destacando las unidades Carpetano-Leonesa, con un 99,48%, y Pirenaica, con un 85,35% de desigualdad.

Unidad	N Yesos	N Seleccionadas	%	N No Seleccionadas	%
BAJOARAGONESA	80070	14190	17,72	65880	82,28
BÉTICA	15118	2876	19,02	12242	80,98
CARPETANOLEONESA	2132	0	0,00	2132	100,00
CASTELLANA	31095	6720	21,61	24375	78,39
CATALANA VALENCIANA	523	523	100,00	0	0,00
LUSOEXTREMADURENSE	328	0	0,00	328	100,00
MURCIANOALMERIENSE	29584	3087	10,43	26497	89,57
OROIBERICA	4964	630	12,69	4334	87,31
PIRENAICA	833	50	6,00	783	94,00

Tabla 17. Comparativa unidades biogeográficas y capa de Garrido-Becerra et al., 2011.

Al igual que en la comparación anterior, la unidad Catalana-Valenciana es la única que poseyó un alto porcentaje de ajuste entre los polígonos de ambas capas (100%). El resto de unidades biogeográficas obtuvieron valores altos de discordancias entre las capas, como las unidades Carpetano-Leonesa y Luso-Extremadurensis, con un 100%.

Gains

En este apartado se obtuvieron como resultados 6 imágenes en donde se representan la importancia de cada variable en la modelización para la obtención de la distribución más probable de cada una de las 6 especies, mediante el empleo de gráficos de barras horizontales de diferentes tonos de color. Aunque el estudio se centra en las variables ambientales y su importancia, también se obtuvieron datos sobre la permutación de la importancia para cada variable.

Esta importancia o *gain*, se representa mediante barras horizontales, en donde el color azul oscuro se corresponde con la contribución de una determinada variable al modelo de idoneidad de hábitat, es decir, la variable será más importante para la modelización cuanto mayor barra de color azul oscuro presente. En cambio, el color azul más claro se refiere a la contribución de una variable ambiental al resto de las mismas, aislando la variable para la que se está calculando la importancia.

Estos resultados permiten un análisis visual y objetivo de los datos obtenidos, y se recogen en las Figuras 35, 36, 37, 38, 39 y 40.

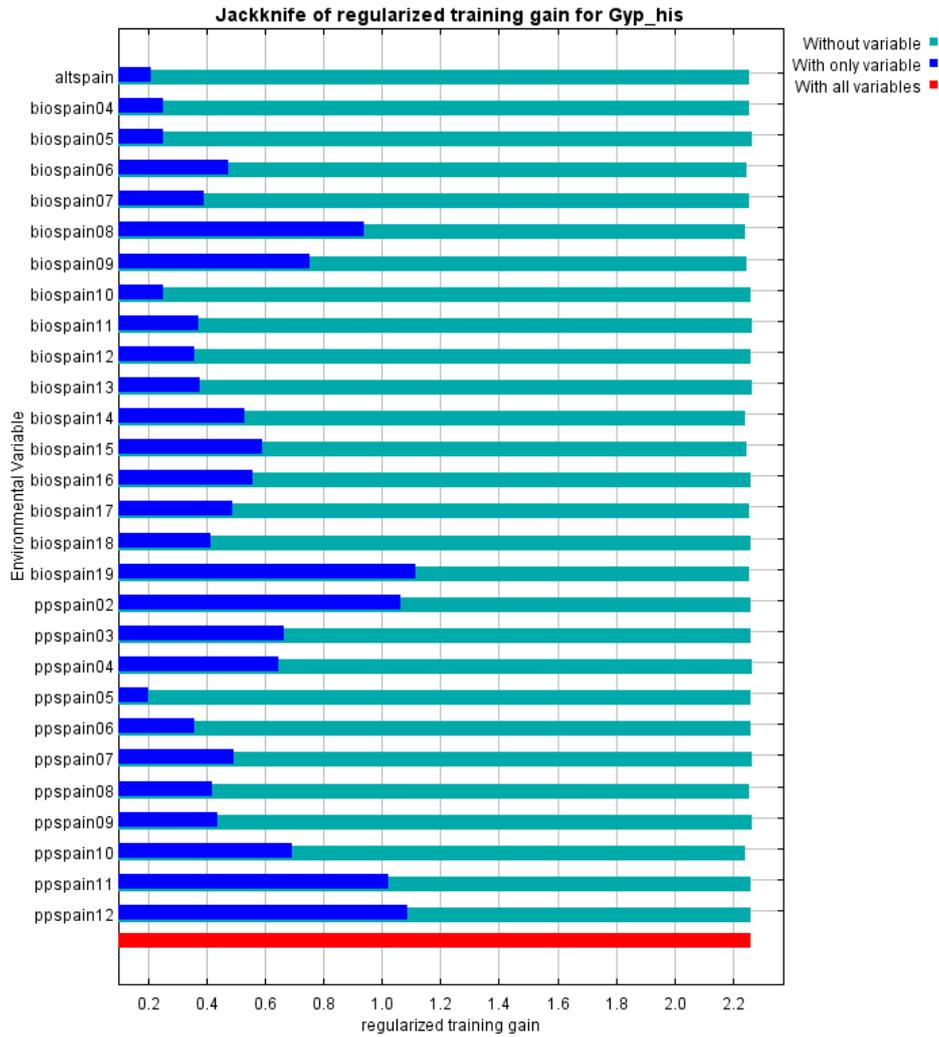


Figura 355. Gain de la especie *Gypsophila struthium* subsp. *hispanica*.

Para el taxón *Gypsophila struthium* subsp. *hispanica*, la variable ambiental que más contribuyó al modelo de idoneidad de hábitat, según la Figura 35, fue la precipitación del trimestre más frío (biospains19), seguida muy de cerca por la media mensual de la precipitación del mes de diciembre (ppspain12).

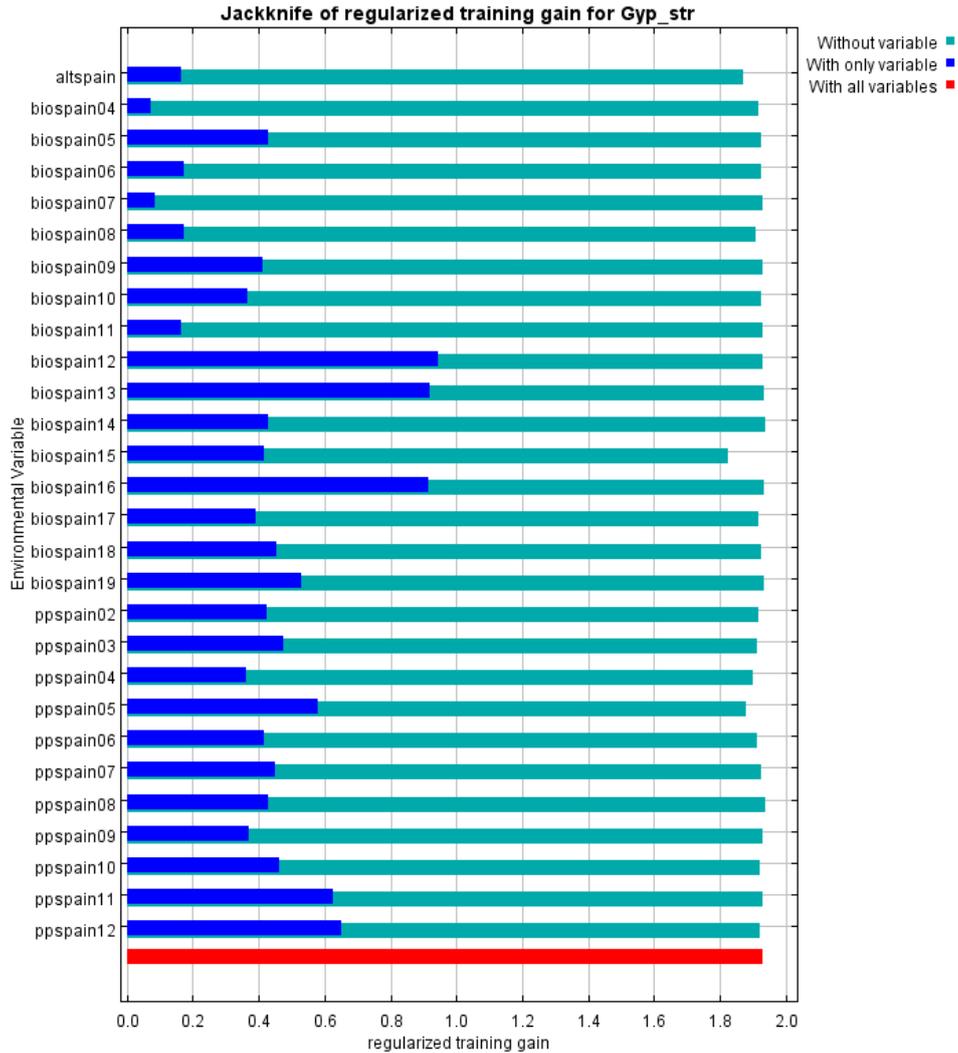


Figura 36. *Gain* de la especie *Gypsophila struthium* subsp. *struthium*.

En cambio, para el taxón *Gypsophila struthium* subsp. *struthium*, la variable ambiental que más contribuyó al modelo fue la precipitación del trimestre más húmedo del año (biospain16), junto con la media mensual de precipitación del mes de agosto (ppspain08), tal y como se aprecia en la Figura 36.

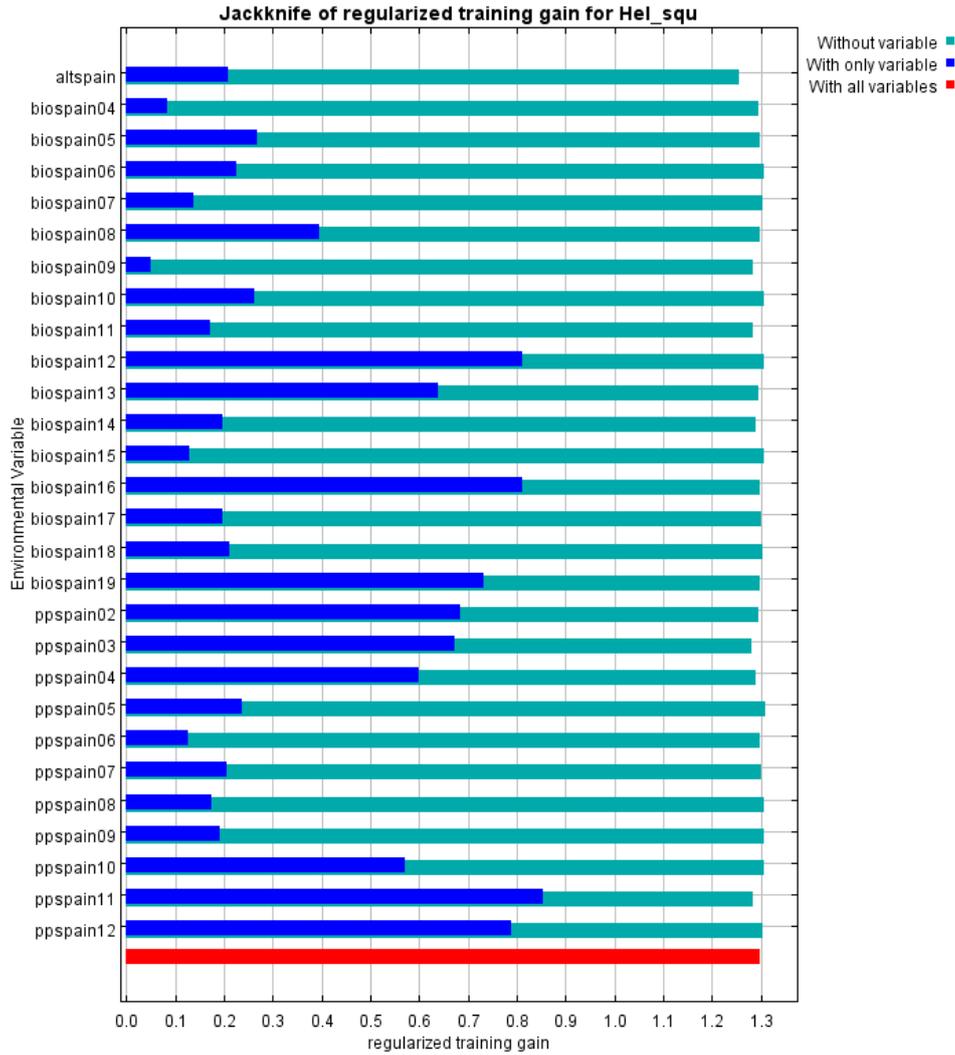


Figura 377. Gain de la especie *Helianthemum squamatum*.

La media mensual de precipitación del mes de mayo (ppspain05) fue la variable ambiental con más importancia para el modelo de idoneidad de hábitat para la especie *Helianthemum squamatum*, seguida por la variable de precipitación de estacionalidad (biospain15), es decir, el coeficiente de variación de la precipitación.

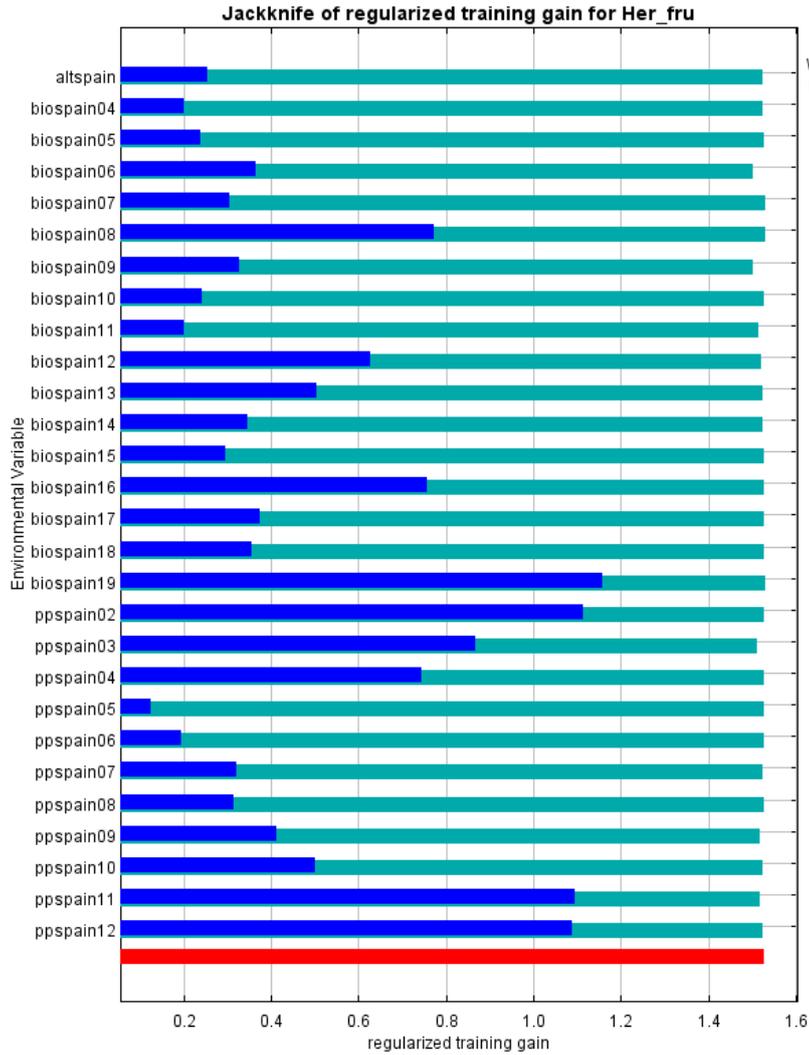


Figura 388. *Gain* de la especie *Herniaria fruticosa*.

Con respecto a *Herniaria fruticosa*, la precipitación del trimestre más frío (biospain19) y la media mensual de la precipitación del mes de febrero (ppspain02), fueron las variables ambientales que más contribuyeron al modelo, observando la Figura 38.

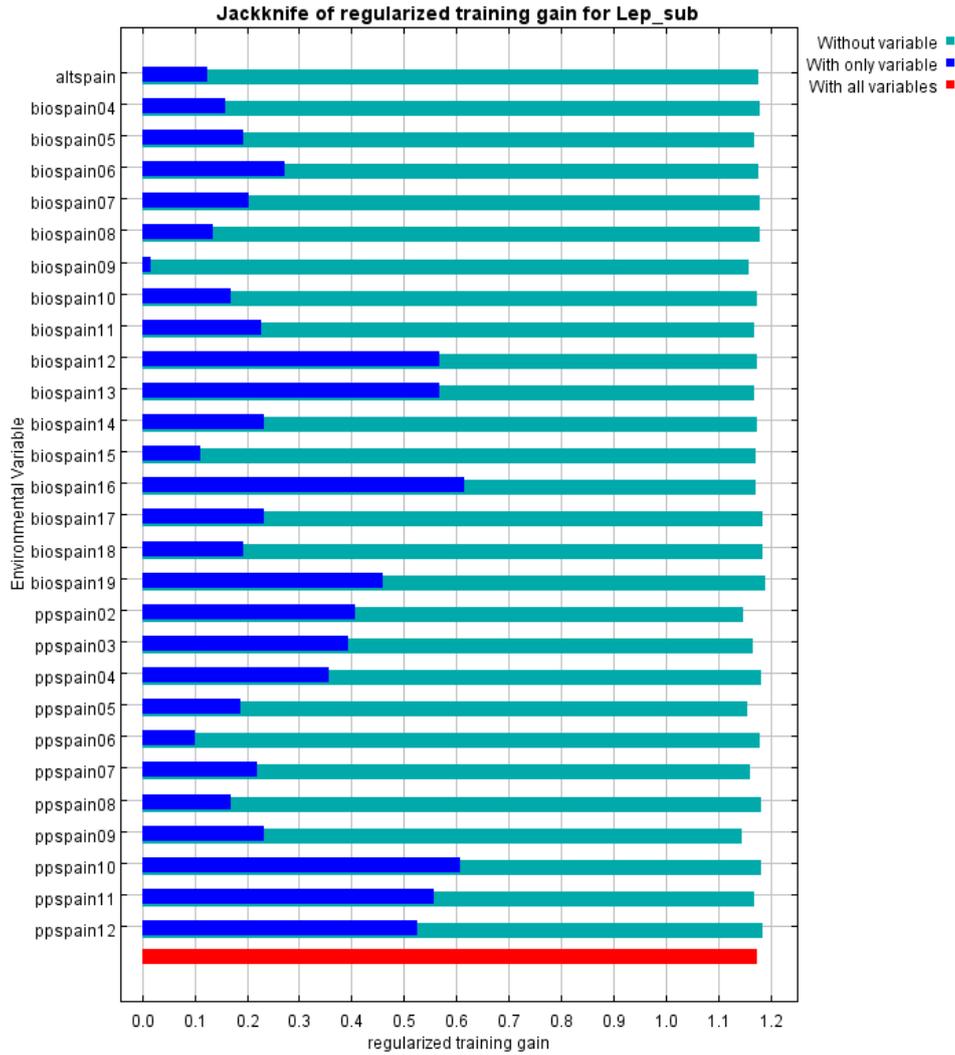


Figura 39. *Gain* de la especie *Lepidium subulatum*.

Al igual que para la especie *Lepidium subulatum*, la precipitación del trimestre más frío (biospain19), según la Figura 39, fue la variable con mayor contribución al modelo. Además, la precipitación del trimestre más caliente (biospain18) obtuvo gran importancia.

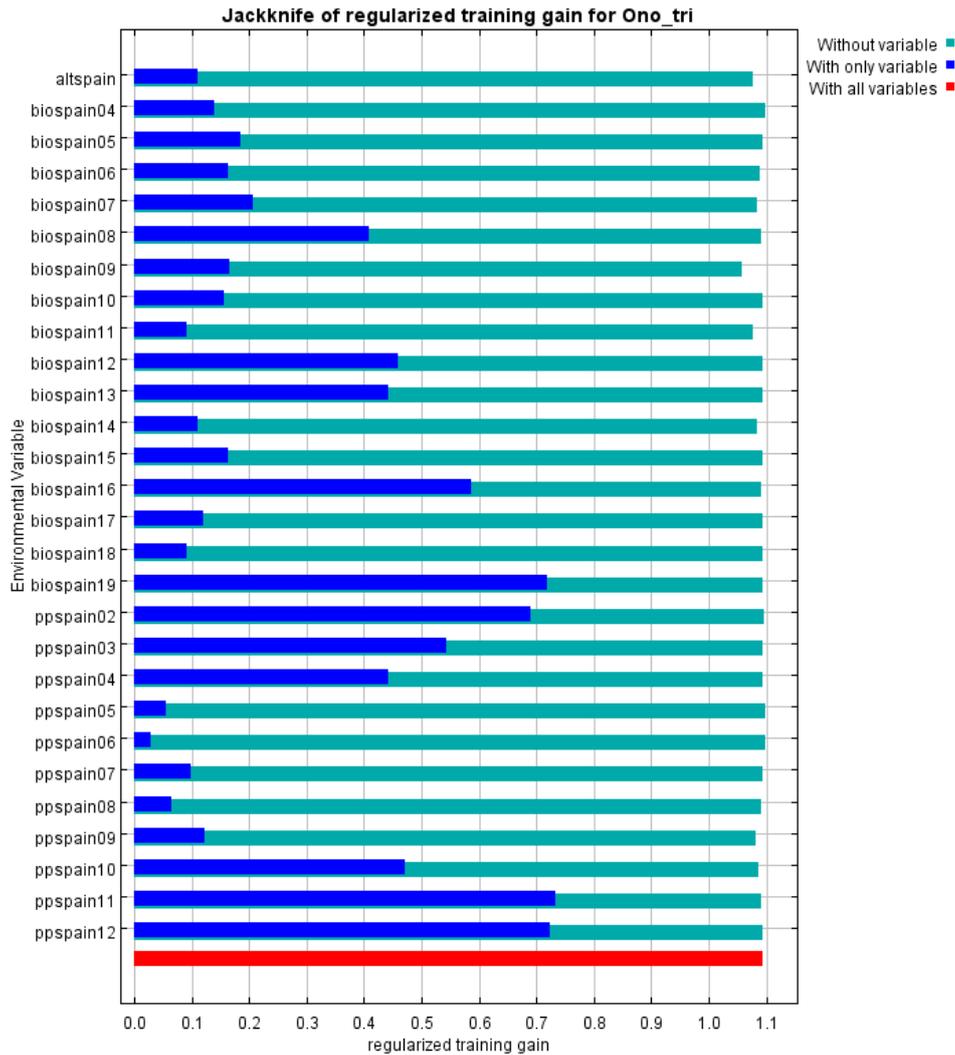


Figura 400. Gain de la especie *Ononis tridentata* subsp. *tridentata*.

En el modelado del taxón *Ononis tridentata* subsp. *tridentata*, se obtuvieron como variables ambientales que más contribuyen al modelo la precipitación media del mes de junio (ppspain06) y la temperatura estacional (biospain04).

Tras esto, se realizó el promedio de los porcentajes de Contribución, es decir, se calculó el porcentaje de contribución al modelo de idoneidad de hábitat de cada variable ambiental por sí sola.

Las estimaciones de las contribuciones relativas de las variables ambientales en el modelo de MaxEnt se determinan añadiendo el aumento del *gain* regularizado a la contribución de la variable correspondiente, o se resta de ella si el cambio en el valor absoluto de lambda es negativo. Para la segunda estimación, para cada variable ambiental, se permutan los valores de dicha variable con datos al azar del total de variables. El modelo vuelve a evaluar los datos permutados, y los resultados se normalizan a porcentajes, quedando recogidos en la Tabla 20.

Contribución (%)		
Variable ambiental	Abreviatura	Promedio
Media mensual de la precipitación del mes de noviembre	ppspain11	16.68
Temperatura media del trimestre más seco	biospain09	9.10
Rango de temperatura anual (BIO5-BIO6)	biospain07	8.80
Precipitación de estacionalidad (coeficiente de variación)	biospain15	6.97
Precipitación del trimestre más frío	biospain19	6.57
Temperatura media del trimestre más húmedo	biospain08	5.18
Precipitación anual	biospain12	4.27
Temperatura estacional (desviación estándar * 100)	biospain04	4.18
Temperatura máxima del mes más cálido	biospain05	4.17
Temperatura mínima de BIO6 = Mes más frío	biospain06	3.97
Media mensual de la precipitación del mes de febrero	ppspain02	3.77
Elevación sobre el nivel del mar	altspain	3.72
Media mensual de la precipitación del mes de septiembre	ppspain09	3.03
Precipitación del trimestre más húmedo	biospain16	2.85
Temperatura media del trimestre más cálido	biospain10	2.45
Media mensual de la precipitación del mes de diciembre (mm)	ppspain12	2.30
Media mensual de la precipitación del mes de octubre (mm)	ppspain10	2.00
Temperatura media del trimestre más frío	biospain11	1.87
Media mensual de la precipitación del mes de abril	ppspain04	1.57
Media mensual de la precipitación del mes de marzo	ppspain03	1.55
Media mensual de la precipitación del mes de mayo	ppspain05	1.33
Media mensual de la precipitación del mes de agosto	ppspain08	0.58
Precipitación del trimestre más caliente	biospain18	0.58
Precipitación del mes más húmedo	biospain13	0.57
Media mensual de la precipitación del mes de julio	ppspain07	0.55
Precipitación del mes más seco	biospain14	0.50
Media mensual de la precipitación del mes de junio	ppspain06	0.40
Precipitación del trimestre más seco	biospain17	0.25

Tabla 18. Porcentajes de la contribución de las variables ambientales.

A continuación, se realizó un diagrama de barras con los datos de la tabla anterior, para una mejor visualización de las variables que más contribuyen al modelo de idoneidad de hábitat, en la Figura 41.

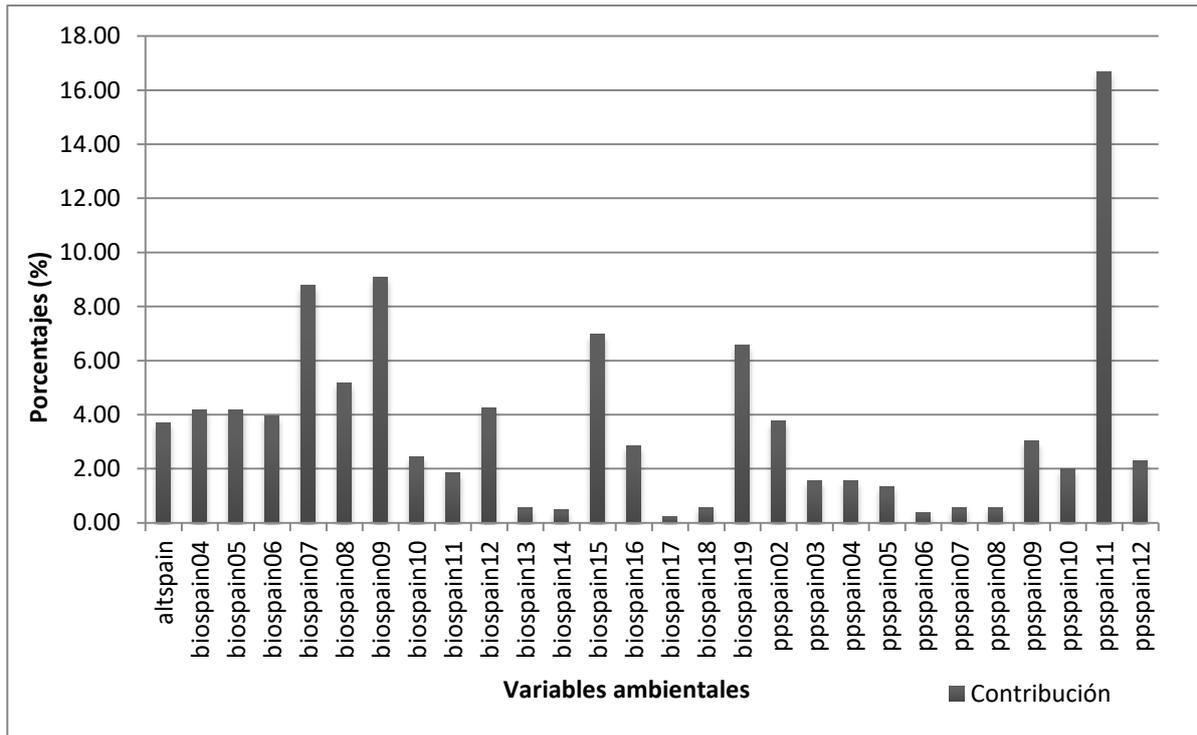


Figura 411. Contribución de las variables ambientales al modelo.

Observando la gráfica de barras verticales de la Figura 41, la variable que más contribuye, en gran diferencia de las demás, al modelo de idoneidad de hábitat para los 6 gipsófitos de estudio es la precipitación media mensual del mes de noviembre (ppspain11). Tras ella, la segunda variable que más contribuye es la temperatura media del trimestre más seco (biospain09).

DISCUSIÓN

Modelización de especies

En primer lugar, los mapas de distribución de las especies estudiadas, correspondientes a las Figuras 5, 8, 11, 14, 17 y 20, mostraron cómo el modelo empleado en MaxEnt se ajusta con bastante precisión, al menos de acuerdo con las gráficas de omisión y las curvas ROC, a la distribución de los puntos de muestreo de las plantas empleadas. Los puntos de presencia introducidos para cada una de las especies de estudio, coincidieron en gran medida con los puntos de mayor probabilidad de presencia y de idoneidad de hábitat descritos por MaxEnt, es decir, los puntos de presencia, de color blanco, se localizaron sobre las zonas de tonos rojizos, ya que los modelos generados por MaxEnt tienen una interpretación natural probabilística, dando lugar a una graduación de colores dependiendo de las condiciones de hábitat más a menos adecuadas (Phillips & Dudík, 2004). Esta circunstancia se cumplió para la totalidad de las especies de estudio. Por tanto, los puntos Verdaderos positivos, es decir, aquellos que están presentes realmente y que son predichos como presentes, obtuvieron un alto porcentaje de concordancia.

En cambio, en estos modelos también se observó la existencia de puntos incongruentes en los que, aún habiendo datos de ocurrencia introducidos para las especies, el modelo niega la probabilidad de hábitat en dicha localización, dichos puntos son denominados Falsos negativos. En algunos casos, dichos puntos aparecen en zonas de color azul oscuro, en las que la probabilidad de presencia tiende a cero. Este hecho ocurrió para todas las plantas estudiadas, apreciándose visualmente mejor en los mapas obtenidos para las especies *Helianthemum squamatum* y *Herniaria fruticosa* (Figuras 11 y 14).

La causa de estos errores, en cuanto a los puntos de muestreo con nula probabilidad de presencia (Falsos negativos), puede deberse a que MaxEnt contrasta las presencias con los datos de fondo donde la presencia no es medida (Phillips & Dudík, 2008). De forma predeterminada, MaxEnt supone que las especies presentan la misma probabilidad de estar en toda el área de estudio, suponiendo que cada pixel tiene la misma probabilidad de ser seleccionado como dato de fondo. MaxEnt predice una distribución de máxima difusión espacial, por tanto, localiza las probabilidades de idoneidad de hábitat en zonas donde existe un conjunto de datos de alta probabilidad con un gran tamaño geográfico (Merow et al., 2013).

En cuanto a las gráficas de las curvas ROC de los gipsófitos, mostradas en las Figuras 6, 9, 12, 15, 18 y 21, se representaron los valores de sensibilidad y especificidad de las muestras de cada especie de gipsófito. Mediante dichos parámetros se obtuvo junto con las gráficas los valores AUC correspondientes. Cada especie presentó un número de AUC diferente pero de similar valor, variando éstos entre 0,925 y 0,981, y presentando comportamientos de las curvas muy semejantes, acercándose a la parte superior de la gráfica.

Tal y como se expone en Fawcett (2004), cuanto más cerca se encuentra la curva ROC de la esquina superior izquierda de la gráfica, mejor será el método empleado. Por tanto, todas las especies se clasificaron como muestras perfectas debido a la posición de las curvas. Además, cuanto mayor distancia haya entre la línea de estimación aleatoria y las curvas ROC, mejor será el poder predictivo del modelo. Así, los modelos obtenidos para las 6 especies, mostraron una alta capacidad de predicción para el software MaxEnt.

Como ya se ha citado anteriormente, la curva ROC tiene en cuenta los valores Falsos negativos y Falsos positivos. Las pruebas realizadas mostraron más del 90% de sensibilidad y especificidad, lo que significa, que prácticamente no se obtuvieron datos de Falsos positivos ni Falsos negativos. Sin embargo, la comprobación visual de los mapas procedentes de la modelización de las especies mostraron justo lo contrario: existen puntos de presencia reales proporcionados por el grupo de investigación RNM344 que no fueron definidos por MaxEnt como localidades de probabilidad (falsos negativos) y puntos de los que no se tenía constancia de la existencia de las especies, y MaxEnt los define como localidades de hábitat probabilístico (falsos positivos).

Por último, en relación a las gráficas de omisión, las predicciones obtenidas se compararon usando las tasas de omisión, es decir, la fracción de localidades del modelo que no predicen

la probabilidad actual (Phillips & Dudík, 2004). Se considera un error de omisión cuando la especie se encuentra en una localidad de presencia, y el modelo predice que está ausente en dicho punto.

Todas las especies, como aparece reflejado en las distintas gráficas, mostraron un comportamiento semejante. En las Figuras 7, 10, 13, 16, 19 y 22, se puede observar como las líneas de omisión se acercaron, y en bastantes ocasiones coincidieron, con las líneas de omisión predichas por el modelo. Ya se ha señalado que, una mayor cercanía de la recta de tasa de omisión a la línea que ofrece el modelo, refleja un mejor ajuste en la distribución de las especies o, para ser más precisos, de la idoneidad de hábitats para las mismas. Teniendo en cuenta lo expuesto, los resultados de las gráficas de omisión afirmaron la precisión del modelo empleado.

Sin embargo, el examen detallado de la distribución real de las especies mostró que el modelo ofreció lagunas en cuanto a su capacidad predictiva para todos los puntos. Las imágenes de los mapas de la modelización evidenciaron la existencia de errores por la existencia de localidades con Falsos negativos, por lo que las líneas de las curvas obtenidas exageran, desde nuestro punto de vista, la capacidad de predicción del modelo.

Comparativas cartográficas

Mapas modelización

En primer lugar, en los mapas de las Figuras 23, 24, 25, 26, 27 y 28, se observó que las soluciones obtenidas del modelo de MaxEnt se ajustaban a la distribución de las cuadrículas 10x10 y 1x1 UTM. Al seleccionar únicamente el 5% de los datos de las soluciones de MaxEnt, el área predicha de distribución de las especies se ajustó con alta correlación a las demás capas, tal y como se apreció para los taxones *Gypsophila struthium* subsp. *hispanica* y *Gypsophila struthium* subsp. *struthium*. En cambio, el resto de especies gipsófitas (*Helianthemum squamatum*, *Herniaria fruticosa*, *Lipidium subulatum* y *Ononis tridentata* subsp. *tridentata*) no obtuvieron concordancia entre determinados puntos de muestreo reales y algunas localidades predichas de hábitat.

Esto demostró que la predicción de distribución probabilística de los gipsófitos de estudio no se corresponde totalmente con la distribución real de dichas especies, debido a los valores Falsos Negativos obtenidos, es decir, aquellas localidades en las que existe certeza de presencia de la especie en cuestión pero el modelo muestra como localidad de ausencia.

Mapa unificado

Por otro lado, en el mapa obtenido de la superposición de las soluciones de MaxEnt de los gipsófitos de estudio (Figura 29), se observó que dichas especies se localizan en

concentraciones mayores sobre los yesos del noreste de la Península Ibérica como se puede apreciar por la mayor intensidad del color rojo. Otro de los focos con alta densidad de estas especies se corresponde con los yesos localizados en el sureste peninsular, pero también en zonas continentales. Teniendo en cuenta que las 6 especies estudiadas se pueden considerar “wide gypsophiles” en el sentido de Escudero et al. (2015) estos resultados apoyan la idea que relaciona este tipo de flora con las zonas secas y continentales de manera que, hasta cierto punto, justifica el que se la haya relacionado con zonas de estepa verdadera. Sería por lo tanto de gran interés elaborar un mapa conjunto, utilizando este mismo modelo, para los denominados “narrow gypsophiles” y contrastar si existe coincidencia o no entre ambos. Sin embargo, si atendemos a lo que ha avanzado hasta el momento la investigación sobre la distribución de los endemismos gipsófilos (Martínez-Hernández et al., 2011), probablemente no exista una gran coincidencia entre ambos tipos de gipsófitos. Aunque es arriesgado sacar alguna conclusión al respecto, la no coincidencia entre los territorios con mayor número de especies endémicas con aquellos más ricos en elementos ampliamente distribuidos por los afloramientos de yeso ibérico, podría apuntar a fenómenos de extinción, por los barridos glaciares, durante las glaciaciones. Esta idea se apoya en el estudio de Martínez-Hernández et al. (2011), en el que obtuvo que la mayor concentración de especies gipsófilas raras se localiza en la provincia de Almería, indicando claramente que dichos afloramientos de yeso tienen un elevado número de plantas estenócoras, es decir, especies endémicas exclusivas. En contraste con lo anterior, algunos de los valores más altos de número de especies (riqueza) se encuentran en las zonas del centro de España, el valle del río Ebro y el sureste ibérico. Dicho de otra forma, mientras que en las zonas continentales la riqueza de la flora gipsófila se debe a los endemismos de área amplia, en las zonas cálidas y oceánicas, la diversidad de la flora gipsófila se debe a los endemismos locales y regionales.

Tal y como expone Escavy et al. (2012), los yesos se localizan en mayor concentración en la parte oriental de la Península Ibérica, debido principalmente a la formación de grandes cuencas en las que se depositaron cantidades de yeso de grueso tamaño, derivadas de los eventos tectónicos producidos en la costa mediterránea española. Dichas condiciones, junto con las características xéricas actuales, con condiciones climáticas extremas, provocan el aumento de la concentración de yeso por evaporación, haciendo que estas regiones mantengan los depósitos yesíferos actuando como zonas que experimentan condiciones de aislamiento para los elementos florísticos que en ellas se albergan (Dana & Mota, 2006).

Análisis de Verdaderos Positivos de MaxEnt

Como resultado de la comparación del mapa unificado, de las soluciones de MaxEnt de los gipsófitos, con las capas de información proporcionadas por el Grupo de Investigación (UTM 10x10, UTM 1x1, yesos de Escavy et al., 2012 y cartografía gipsófila Garrido-Becerra et al., 2011), se obtuvieron porcentajes con valor superior al 50% de concordancia entre las capas, tal y como se muestra en las Figuras 30, 31 y 33. Sin embargo, la comparación con la capa de

yesos de Escavy et al. (2012), mostró mayor porcentaje de discordancias (69,19%) que de concordancias, según la Figura 32.

Como dicha capa de yesos se creó mediante la digitalización de los afloramientos de yeso definidos en el estudio de Escavy et al. (2012), el alto valor de discordancias puede deberse a que éstos abarcan mayor cantidad de territorio peninsular, lo que da lugar a que un menor número de cuadrículas coincidan. Por otra parte, hay que recordar que MaxEnt modeliza la distribución de especies, es decir, de entidades vivas y no de capas geológicas inertes. Sin embargo, los resultados obtenidos ayudan a comprender mejor que existe un importante vínculo entre el clima actual y los yacimientos de yeso. Expresado de una manera más directa podríamos decir que aunque los afloramientos de yeso se generaron en épocas geológicas muy distintas a las actuales, buena parte de ellos se concentran en territorios que pueden ser identificados por su clima actual, árido y, con frecuencia, frío.

Por otro lado, en la comparativa entre el mapa unificado de las soluciones de MaxEnt, dividido en distribución Norte y Sur (Figura 34), y las capas cartográficas empleadas en esta investigación, se observó que la distribución conjunta modelizada de las 6 especies abarcaron la práctica totalidad de los afloramientos yesíferos peninsulares. Destaca que los porcentajes más altos de concordancia entre las capas se obtuvieron en la zona Sur, mientras que la zona norte presentó datos más bajos cercanos al 50% o incluso menores, para la capa de Escavy et al. (2012), con un 20,6%.

Los resultados obtenidos coinciden en buena medida con los análisis realizados por Martínez-Hernández et al. (2009), en los que, según la riqueza gipsófito, los afloramientos de mayor diversidad se ubican en la Meseta Central, seguidos de los situados en el sureste semiárido en el sector almeriense y posteriormente en el Valle del río Ebro.

Además, si se tiene en cuenta la rareza, la principal área gípsica se localiza en el sureste semiárido, y en el Valle del Ebro. A pesar de tener menos superficie de afloramientos de yeso, la provincia Murciano-Almeriense exhibe una extraordinaria densidad de gipsófitos (Martínez-Hernández et al., 2015), presentando un gran número de centros de endemidad. En cambio, según Martínez-Hernández et al. (2015), la zona del Valle del río Ebro presenta menor concentración de especies endémicas. Este hecho está en concordancia con los resultados obtenidos al unificar la modelización de las 6 especies estudiadas, ya que pone de manifiesto que en estas áreas los denominados “wide gypsophiles” son fundamentales en la configuración de las comunidades vegetales de la al. *Gypsophilion hispanicae*.

El análisis de Verdaderos Positivos resultado de la comparación del mapa unificado de las soluciones de MaxEnt, dividido en unidades biogeográficas, con las 4 capas de información del Grupo de Investigación, mostró que del total de las 8 unidades, la Murciano-almeriense y la Bajoaragonesa coincidieron en mayor porcentaje con la predicción de distribución de los “wide gypsophiles”. Dichas unidades se corresponden con las zonas de mayor presencia de gipsófitos según la Figura 29. Éstas se localizan en el sureste y noreste peninsular, donde

existe mayor número de afloramientos yesíferos con datos de presencias reales y en donde las características ambientales son favorables para la predicción del hábitat.

En cambio, las unidades biogeográficas con menor porcentaje de coincidencias de cuadrículas, fueron la unidad Carpetano-Leonesa y la Luso-Extremadureña. Dichas unidades se encuentran localizadas en la zona Oeste de la Península Ibérica, tal y como recoge Alcaraz Ariza (2011). Esto corroboró que en el occidente peninsular, la presencia de vegetación gipsófila está más condicionada debido a la práctica inexistencia de afloramientos de yeso y a unas condiciones climáticas muy diferentes a las mayoritariamente predominantes en los afloramientos de yeso ibéricos.

Análisis de Verdaderos Positivos de presencias reales

En el análisis de Verdaderos positivos realizado con la totalidad de presencias 1x1 de las especies gipsófitas, se obtuvo un único porcentaje con valor alto (81,83%), para la comparativa con la capa de cuadrículas 10x10 UTM. El resto de comparaciones fueron valoradas con datos inferiores al 50%. Este elevado porcentaje de afinidad con la capa 10x10 es debido a que las cuadrículas de ésta son de mayor tamaño, es decir, ocupan mayor superficie de territorio, dando lugar a mayor número de coincidencias.

Al igual que el análisis de Verdaderos Positivos realizado con las soluciones de MaxEnt divididas en Norte y Sur, la capa con mayor porcentaje de concordancia de elementos fue la de cuadrículas 10x10 UTM en ambas distribuciones. Esto demostró estadísticamente la posibilidad de crear un mapa de distribución de afloramientos yesíferos a partir de cartografía de vegetación basada en presencias.

Al contrario que en la comparativa con las soluciones de MaxEnt divididas en norte y sur, en esta comparación, se obtuvieron porcentajes más altos de correlación en la zona norte, usando la capa 10x10, aunque no con demasiada diferencia de valores. Esto se debe a que los afloramientos yesíferos del Norte de la Península son de mayor tamaño y tienen una mayor continuidad y conexión unos y otros. En cambio, en la zona sur, los yesos se encuentran más dispersos por el territorio y son de menor tamaño, dando lugar a pequeñas islas para las especies gipsófitas.

Tras la comparación del resultado de la superposición de las presencias reales 1x1 de las 6 especies vegetales con las cuatro capas del grupo de investigación, se obtuvo que las unidades biogeográficas con mayor coincidencia de cuadrículas se correspondían con la unidad Catalana-Valenciana y la Castellana. La primera se corresponde con la zona situada entre las provincias de Valencia y Barcelona, mientras que la segunda incluye los afloramientos yesíferos de las zonas del norte de las provincias de Granada y Almería. Como ya se ha expuesto anteriormente, ambos territorios quedan englobados en las zonas con valores de idoneidad de hábitats más elevados para los seis "wide gypsophiles" en todo el territorio peninsular.

Si se examinan las discordancias de las cuadrículas entre las capas, se obtuvo el mismo resultado que para el análisis de Verdaderos positivos realizado con las soluciones de MaxEnt. Es decir, las unidades biogeográficas con menor presencia de las especies vegetales estudiadas fueron la unidad Carpetano-Leonesa y la Luso-Extremadurensis. Como ya se ha dicho, este resultado no es más que la consecuencia evidente de que en la zona occidental de la Península no existen afloramientos de yeso y que, aunque puedan darse puntualmente condiciones climáticas favorables, no apenas si hay presencias de especies consideradas gipsófilas y, desde luego, nunca ninguna de las 6 estudiadas aquí (Martínez-Hernández et al., 2011).

Gains

Con respecto a las variables que mayor importancia tuvieron para el modelo de idoneidad de hábitat, los resultados de cada uno de los 6 gipsófitos de estudio, mostrados en las Figuras 35, 36, 37, 38, 39 y 40, concordaron en que el condicionante principal era la precipitación de los meses más fríos y húmedos, excepto para *Ononis tridentata* subsp. *tridentata*, para la que la variable ambiental de más importancia fue la precipitación media del mes de junio.

Los meses más fríos y húmedos se corresponden, en la zona del mediterráneo, con los meses de diciembre, enero y febrero, según el Atlas Climático Digital de la Península Ibérica, en los que las temperaturas se encuentran más bajas y el volumen de precipitación aumenta.

Además, el efecto conjunto del aumento de la precipitación y una todavía atemperada disminución de las temperaturas (otoñada) podría provocar cierto desarrollo vegetativo de las especies vegetales, justo después de un largo período xérico o árido, caracterizado por un déficit hídrico que provoca estrés hidráulico. Además, muchas de las zonas por las que se reparten los yesos ibéricos presentan temperaturas medias-altas en casi la totalidad del año (Gil de Carrasco & Ramos Miras, 2011), siendo ésta una variable determinante de los ecosistemas debido a su influencia sobre todas las fases del ciclo vital de la vegetación (Merlo et al., 2011): reproducción, desarrollo, fenología, latencia, etc.

Estos resultados podrían apoyar la idea de que la vegetación gipsófila sigue patrones de desarrollo normales en las especies esteparias, con adaptaciones vegetativas xerofíticas (Pérez-Collazos & Catalán, 2008): parte aérea reducida minimizando la superficie transpirante, sistema radicular con gran desarrollo, reducción del periodo vegetativo a los meses más favorables, aspecto leñoso, etc. Por otra parte, el régimen climático diferente de las zonas esteparias tal vez se vea también reflejado en las floraciones predominantes en algunas de estas especies, como es el caso de las 2 pertenecientes al género *Gypsophila* entre las estudiadas.

Por otro lado, los resultados mostrados en la Figura 41, sobre el promedio de las variables ambientales para el conjunto de los 6 gipsófitos, mostraron que la variable de mayor importancia fue la precipitación mensual del mes de noviembre, con un valor bastante alto

que destaca sobre las demás. En noviembre, comienza el período de lluvias tras el verano en la zona oriental de la Península Ibérica (Atlas Climático Digital de la Península Ibérica). Tal y como se ha expuesto anteriormente, el agua actúa como factor limitante para la productividad vegetal, provocando que las tasas de crecimiento sean proporcionales a su disponibilidad (Merlo et al., 2011), por ello la precipitación de este mes se obtuvo como la variable más contribuyente a la distribución.

La segunda variable ambiental con mayor contribución al modelo fue la temperatura del trimestre más seco, es decir, la de aquellos meses que presentan una temperatura máxima y déficit de disponibilidad hídrica. Éstos se corresponden con los meses de junio, julio y agosto (www.aemet.es) y concuerda con el carácter xerofítico de este tipo de vegetación pues conviene recordar que la temperatura es proporcional a la evapotranspiración.

CONCLUSIONES

1.- Ésta es la primera vez que se ha llevado a cabo una investigación sobre la modelización de hábitats para especies gipsófilas que se suponen más vinculadas o dependientes de la naturaleza edáfica que del régimen climático. Sin embargo, si atendemos a los resultados ofrecidos por MaxEnt, queda demostrado que la modelización de especies, mediante variables climáticas y datos de presencia, permite obtener nichos ecológicos probabilísticos con un porcentaje de exactitud adecuado para su uso como referente o guía entre lo que es la distribución real de las especies y la que sería con unas condiciones idóneas de hábitat.

2.- A pesar de que MaxEnt tiene en cuenta la “ausencia de especies”, esto es, los falsos positivos a través de los valores e “omisión”, de acuerdo con la distribución real de los taxones estudiados, este aspecto podría ser mejorado. Esta circunstancia dio lugar a que no se reconocieran todas las localidades nicho ecológico potencial, ya que tal y como se ha demostrado, el modelo no identificó como zonas de hábitat idóneo muchos puntos donde hay constancia de la presencia de las especies estudiadas. Así, se pone de manifiesto que el modelo no es perfecto, aunque puede ser empleado para predicciones generales y usado como herramienta para estudios más detallados que, involucren por ejemplo, el cambio climático.

Además, el modelo predictivo usado afirma, con una fiabilidad aproximada del 90%, la restringida distribución de las 6 especies empleadas y la relación de gipsofilia que caracteriza a este tipo de vegetales, lo que obliga a que se localicen en localidades muy específicas, con un sustrato especial, que permita su desarrollo.

La unificación de las distribuciones obtenidas de la modelización para los 6 gipsófitos muestra dos zonas de gran densidad de gipsófitos, una en la zona de los yesos murciano-almerienses y otra en el Valle del Ebro. Dichas localidades concuerdan con los hotspots o puntos calientes de biodiversidad de la vegetación gipsófila ibérica, caracterizados por la elevada densidad, gran riqueza y rareza de especies.

Las comparativas con la cartografía disponible sobre afloramientos yesíferos y gipsófitos peninsulares, ha permitido conocer estadísticamente y con valores numéricos los “aciertos” y los “fallos” del modelo de MaxEnt. Como resultado, se afirma que este software se puede usar como instrumento con otras fuentes de información, como la cartografía, para la generación de información que permita predecir potenciales distribuciones, aumentando el éxito de futuros estudios.

En cuanto a la variable ambiental que mayor contribución tuvo para el modelo, se afirma que la precipitación del mes de noviembre es de gran importancia, ya que es el mes en el que comienza la época de lluvias en la zona del Mediterráneo de la Península Ibérica, y de gran relevancia tras finalizar la época xérica y desfavorable. También es de importancia la temperatura del trimestre más seco, ya que ésta condiciona el desarrollo de la vegetación en general, y sobretodo la gipsícola, localizada en ambientes áridos o semiáridos. Dichas variables ambientales determinan las características de los depósitos de yeso ya que éstos dependen del clima, principalmente, y de éste depende la química y la concentración del yeso.

Por tanto, los hábitats ubicados en los afloramientos de yeso son áreas pequeñas de distribución para determinadas especies vegetales, entre las que se encuentran los gipsófitos. Actualmente, dichas áreas están amenazadas por cambios medioambientales y por acciones antrópicas (minería principalmente), que dan lugar a la destrucción del hábitat, poniendo en peligro la integridad de las especies y las relaciones bióticas del ecosistema.

Como consecuencia, el presente estudio de la distribución de los gipsófitos, mediante modelos predictivos, ha permitido tener un mayor conocimiento de la información disponible sobre estas especies y sobre sus posibles nichos ecológicos, de manera que se puedan destinar medidas de conservación en dichos ambientes mediante la comparación de las distribuciones actuales y las predicciones futuras.

AGRADECIMIENTOS

Los agradecimientos de este trabajo van dirigidos a los integrantes del Grupo de Investigación RNM344 “Biología de la Conservación”, por proporcionar la información y documentación sobre la que se han basado algunas partes del estudio. Además, tienen especial reconocimiento Fabián Martínez Hernández y Juan Francisco Mota Poveda por su apoyo y seguimiento a lo largo de la realización del trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anónimo. 2007. Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad.

Alcaraz Ariza, F. J. (2011). *Provincias Mediterránea-Ibérica-Occidental, Mediterránea-Ibérica-Central y Catalana-Provenzal-Balear*. Universidad de Murcia. España.

Aldaya, F., Puga, E., Díaz de Federico, A. & García, V. (1979). Hoja geológica num. 1042 (Lanjarón). *Mapa Geológico de España*. E. 1:50.000. Segunda serie. I.G.M.E., Madrid.

Álvarez Jiménez, J., Bartolomé, C., de la Cruz, M., Martínez Labarga, J. M. & Rejos, F. J. (2011). En: Mota, J. F., Sánchez-Gómez, P. & Guirado, J. S. (eds). *Diversidad vegetal de las yeseras ibéricas. El reto de los archipiélagos edáficos para la biología de la conservación*. 195-196. ADIF- Mediterráneo Asesores Consultores. Almería.

Araújo, M. B., Cabeza, M., Thuiller, W., Hannah, L. & Williams, P.H. (2004). Would climate change drive species out of reserves? An assessment of existing reserve-selection methods. *Global Change Biology*, 10, 1618–1626.

Carvalho, S. B., Brito, J. C., Crespo, E. J., & Possingham, H. P. (2011). Incorporating evolutionary processes into conservation planning using species distribution data: A case study with the western Mediterranean herpetofauna. *Diversity and Distributions*, 17, 408-421.

Carlson, L. (2003). Geographic Information System: Introduction to ArcView. *Earthlab, Brown University*, EEUU.

Cañadas, E. M., Giuseppe, F., Peñas, J., Lorite, J., Mattana, E., & Bacchetta, G. (2014). Hotspots within hotspots: Endemic plant richness, environmental drivers, and implications for conservation. *Biological Conservation*, 170, 282–291.

Carrillo-Angeles, I.G., Suzán-Azpiri, H., Mandujano, M.C., Golubov, J. & Martínez-Ávalos, J.G. (2016). Niche breadth and the implications of climate change in the conservation of the genus *Astrophytum* (Cactaceae). *Journal of Arid Environments*, 124, 310-317.

Cerrillo, M. I., Dana, E., Castro, H., Rodríguez-Tamayo, M. L., Mota, J.F. (2002). Selección de áreas prioritarias para la conservación de la flora gipsícola en el sureste de la Península Ibérica. *Revista Chilena de Historia Natural*, 75, 395–408.

Dana, E. D. & Mota, J. F. (2006). Vegetation and soil recovery on gypsum outcrops in semi-arid Spain. *Journal of Arid Environments*, 65, 444-459.

De la Torre, A., Alcaraz, F. & Crespo, M. B. (1996). Aproximación a la biogeografía del sector Setabense (provincia Catalano-Valenciano-Provenzal). *Lazaroa*, 16, 141-158.

De Pando, B. & De Giles, J. P. (2006). Modelos predictivos aplicados a la conservación de flora amenazada: invernaderos vs. *Linaria nigricans* en el sureste árido ibérico. *El acceso a la información espacial y las nuevas tecnologías geográficas*, 33-47.

Devesa, J. A. & Ortega, A. (2004). *Especies vegetales protegidas en España: plantas vasculares (Península Ibérica y Baleares)*. Organismo Autónomo de Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente.

Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural (2005). *Atlas y Manual de Interpretación de los Hábitat Españoles*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. España.

Drohan, P. J. & Merkle, D. J. (2009). How do we find a true gypsophile?. *Geoderma*, 150 (1–2), 96–105.

Egeler, C. G., Kampschuur, W., Langenberg, C. W., Montenat, C., Pignatelli, R. & Rondeel, H. E. (1974). Hoja geológica 954 (Totana). *Mapa Geológico de España*. E. 1:50.000. Segunda Serie. IGME, Madrid.

Elith, J., Graham, C. H., Anderson, R. P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R. J., Huettmann, F., Leathwick, J. R., Lehmann, A., Li, J., Lohmann, L. G., Loiselle, B. A., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nakazawa, Y., Overton, J. M., Peterson, A. T., Phillips, S. J., Richardson, K., Scachetti-Pereira, R., Schapire, R. E., Soberón, J., Williams, S., Wisz, M. S., Zimmermann, N. E. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29, 129–151.

Elith, J., Leathwick, J. (2007). Predicting species distributions from museum and herbarium records using multiresponse models fitted with multivariate adaptive regression splines. *Diversity and Distributions*, 13, 265–275.

Elith, J. & Leathwick, J. R. (2009). Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 40, 677–697.

Elith, J. & Graham, C. H. (2009). Do they? How do they? Why do they differ? On finding reasons for differing performances of species distribution models. *Ecography*, 32, 66–77.

Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., En Chee, Y. & Yates, C.L. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17, 43–57.

Escay, J. I., Herrero, M. J. & Arribas, M. E. (2012). Gypsum resources of Spain: Temporal and spatial distribution. *Ore Geology Reviews*, 49, 72–84.

Escudero Alcántara, S. (2009). *1520 Vegetación gipsícola mediterránea (Gypsophiletalia)*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Gobierno de España.

Escudero, A., Palacio, S., Maestre, F. T. & Luzuriaga, A. L. (2015). Plant life on gypsum: a review of its multiple facets. *Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 90 (1), 1–18.

Espinosa, J. M., Martín-Vivaldi, J. M., Martín-Alafont, J. M. & Pereda, M. (1974a). Hoja geológica 997 (Aguilas). *Mapa Geológico de España*. E. 1:50.000. Segunda Serie. I.G.M.E., Madrid.

Espinosa, J. M., Martín-Vivaldi, J. M., Martín-Alafont, J. M., Pereda, M., Pérez, A. & López, M. J. (1974b). Hoja geológica 976 (Mazarrón). *Mapa Geológico de España*. E. 1:50.000. Segunda Serie. I.G.M.E., Madrid.

Forbis de Queiroz, T., Baughman, C., Baughman, O., Gara, M. & Williams, N. (2012). Species distribution modeling for conservation of rare, edaphic endemic plants in White River Valley, Nevada. *Natural Areas Journal*, 32 (2), 149-158.

Franklin, J. (2009). Mapping species distributions: spatial inference and prediction. *Cambridge University Press*, Cambridge, UK.

Garrido-Becerra, J. A., Martínez-Hernández, F. & Mota, J. F. (2004). Biogeografía y conservación en las comunidades vegetales en yeso de la Península Ibérica (orden Gypsophiletalia Bellot & Rivas Godoy in Rivas Godoy et al. 1957). En: Peñas, J. & Gutiérrez, L. (eds.). *Biología de Conservación: reflexiones propuestas y estudios desde el S. E. ibérico*. 219-234. Instituto de Estudios Almerienses (Diputación de Almería), Almería.

Garrido Becerra, J. A., Martínez Hernández, F., Pérez García, F. J., Jiménez Sánchez, M. L., Sola Gómez, A. J., Mendoza Fernández, A. J., Medina Cazorla, J. M., Valle, F. & Mota, J. F. (2011). La vegetación del orden Gypsophiletalia: matorrales sobre yeso. En: J.F. Mota, P. Sánchez-Gómez & J.S. Guirado (eds.). *Diversidad vegetal de las yeseras ibéricas. El reto de los archipiélagos edáficos para la biología de la conservación*: 511-526. ADIF - Mediterráneo Asesores Consultores, Almería.

Gil de Carrasco, C. & Ramos Miras, J. J. (2011). Los suelos yesíferos (gipsisoles). En: Mota, J. F., Sánchez-Gómez, P. & Guirado, J. S. (eds.). *Diversidad vegetal de las yeseras ibéricas. El reto de los archipiélagos edáficos para la biología de la conservación*: 33-50. ADIF-Mediterráneo Asesores Consultores, Almería.

Graham, C. H., Ferrier, S., Huettman, F., Moritz, C & Peterson, A.T. (2004). New developments in museum-based informatics and applications in biodiversity analysis. *Trends in Ecology and Evolution*, 19, 497-503.

Graham, C. H., Moritz, C. & Williams, S. E. (2006). Habitat history improves prediction of biodiversity in a rainforest fauna. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103 (3), 632-636.

Graham, C. H., Elith, J., Hijmans, R. J., Guisan, A., Townsend Peterson, A. & Loiselle, B. A. (2007). The influence of spatial errors in species occurrence data used in distribution models. *Journal of Applied Ecology*, 45, 239-247.

Gregory, R. D., Willis, S. G., Jiguet F, Vorisek, P., Klvanova, A., van Strien, A., Huntley, B., Collingham, Y. C., Couvet, D. & Green, R. E. (2009). An indicator of the impact of climatic change on European bird populations. *PLoS ONE*, 4(3):e4678.

Grehan, J. R. (1993). Conservation biogeography and the biodiversity crisis: A global problem in space/time. *Biodiversity Letters*, 1, 134–140.

Guisan, A., Zimmermann N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135, 147–186.

Guisan, A., Broennimann, O., Engler, R., Vust, M., Yoccoz, N., Lehmann, A. & Zimmermann, N. (2005). Using niche-based models to improve the sampling of rare species. *Conservation Biology*, 20, 501–511.

Gutiérrez-Carretero, L. & Casares-Porcel, M. (2011). Los líquenes de los afloramientos de yeso de la Península Ibérica. En: Mota, J. F., Sánchez-Gómez, P. & Guirado, J. S. (eds). Diversidad vegetal de las yeseras ibéricas. El reto de los archipiélagos edáficos para la biología de la conservación. 549-567. ADIF- Mediterráneo Asesores Consultores, Almería.

Hand, R. (2009). Supplementary notes to the flora of Cyprus VI. *Willdenowia*, 39, 301-325.

Harold, A. S. & Mooi, R. D. (1994). Areas of endemism: Definition and recognition criteria. *Systematic Biology*, 43, 261–266.

Hu, J. & Jiang, Z. (2010). Predicting the potential distribution of the endangered Przewalski's gazelle. *Journal of Zoology*, 282, 54–63.

Hu, J., Hu, H. & Jiang, Z. (2010). The impacts of climate change on the wintering distribution of an endangered migratory bird. *Oecologia*, 164, 555–565.

Huguet del Villar, E. (1925). Avance geobotánicos sobre la pretendida estepa central de España. *Ibérica*, 580, 344-350.

Hutchinson, G. E. (1957). Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 22, 415–427.

IUCN. (2001). IUCN Red List categories and criteria: Version 3.1. Gland, Suiza & Cambridge: IUCN Species Survival Commission.

Jaynes, E. T. (1957). Information theory and statistical mechanics. *Physical Review*, 106, 620–630.

Johnston, I. M. (1941). Gypsophily among Mexican desert plants. *Journal of the Arnold Arboretum*, 22, 145–170.

Ladle, R. J. & Whittaker, R. J. (2011). *Conservation biogeography: The roots of conservation biogeography*. Wiley-Blackwell, Oxford.

Linder, P. (2001). On areas of endemism, with an example from the African Restionaceae. *Systematic Biology*, 50, 892–912.

Loidi, J. & Costa, M. (1997). Sintaxonomía de los matorrales gipsícolas españoles. *Fitosociología*, 32, 221–227.

Marchal, F. & Lendínez, M. L. (2011). Los pradillos de terófitos gipsícolas (*Sedo-Cteniopsis gypsophilae*). En: Mota, J. F., Sánchez-Gómez, P. & Guirado, J. S. (eds). *Diversidad vegetal de las yeseras ibéricas. El reto de los archipiélagos edáficos para la biología de la conservación*. 527-532. ADIF - Mediterráneo Asesores Consultores, Almería.

Margules, C. R. & Pressey, R. L. (2000). Systematic conservation planning. *Nature*, 405, 243-253.

Martínez-Hernández, F. (2013). *Patrones biogeográficos de la flora gipsícola ibérica*. Tesis doctoral. Universidad de Almería.

Martínez-Hernández, F., Medina-Cazorla, J. M, Mendoza-Fernández, A., Pérez-García, F. J., Sánchez-Gómez, P., Garrido-Becerra, J. A., Gil, C. & Mota, J. F. (2009). Preliminary essay on the chorology of the Iberian gypsicolous flora: rarity and richness of the gypsum outcrops. *Acta Botanica Gallica*, 156 (1), 9-18.

Martínez-Hernández, F., Pérez-García, F. J., Garrido-Becerra, J. A., Mendoza-Fernández, A. J., Medina-Cazorla, J. M., Martínez-Nieto, M. I., Merlo Calvente, M. E. & Mota Poveda, J. F. (2011). The distribution of Iberian gypsophilous flora as a criterion for conservation policy. *Biodiversity and Conservation*, 20, 1353-1364.

Martínez-Hernández, F., Mendoza-Fernández, A. J., Pérez-García, F. J., Martínez-Nieto, M. I., Garrido-Becerra, J. A., Salmerón-Sánchez, E., Merlo, M. E., Gil, C. & Mota, J. F. (2015). Areas of endemism as a conservation criterion for Iberian gypsophilous flora: a multi-scale test using the NDM/VNDM program. *Plant Biosystems*, 149 (3), 483-493.

Martínez-Nieto, M. I., Sola, A. J., Martínez-Hernández, F., Merlo, M. E. & Mota, J. F. (2011a). *Gypsophila struthium* L. in Loefl. subsp. *struthium*. En: Mota, J. F., Sánchez-Gómez, P. & Guirado, J. S. (eds). *Diversidad vegetal de las yeseras ibéricas. El reto de los archipiélagos edáficos para la biología de la conservación*. 177-179. ADIF- Mediterráneo Asesores Consultores. Almería.

Martínez-Nieto, M. I., Martínez-Hernández, F., Guirado, J. S., Pérez-García, F. J. & Mota, J. F. (2011b). *Helianthemum squamatum* (L.) Dum. Cours. En: Mota, J. F., Sánchez-Gómez, P. & Guirado, J. S. (eds). *Diversidad vegetal de las yeseras ibéricas. El reto de los archipiélagos edáficos para la biología de la conservación*. 191-193. ADIF- Mediterráneo Asesores Consultores. Almería.

Martínez-Nieto, M. I., Martínez-Hernández, F., Ramos, J. J., Triano, E., Garrido-Becerra, J. A., Pérez-García, F. J. & Mota, J. F. (2011c). *Lepidium subulatum* L. En: Mota, J. F., Sánchez-Gómez, P. & Guirado, J. S. (eds). *Diversidad vegetal de las yeseras ibéricas. El reto de los archipiélagos edáficos para la biología de la conservación*. 215-217. ADIF- Mediterráneo Asesores Consultores. Almería.

Mendoza, A. J., Martínez, F., Pérez, F. J., Garrido, J. A., Benito, B. M., Salmerón, E., Guirado, J., Merlo, M. E. & Mota, J. F. (2015). Extreme habitat loss in a Mediterranean habitat: *Maytenus senegalensis* subsp. *europaea*. *Plant Biosystems*, 149 (3), 503-511.

Mendoza-Fernández, A. J., Pérez-García, F. J., Martínez-Hernández, F., Salmerón-Sánchez, E., Medina-Cazorla, J. M., Garrido-Becerra, J. A., Martínez-Nieto, M. I., Merlo, M. E. & Mota, J. F. (2015). Areas of endemism and threatened flora in a Mediterranean hotspot: Southern Spain. *Journal for Nature Conservation*, 23, 35-44.

Merlo, M. E., Mota, J. F., Cabello, J. & Alemán, M. M. (1998). La gipsofilia en plantas: un apasionante edafismo. *Investigación y Gestión*, 3, 103–112.

Merlo, M. E., Gil de Carrasco, C., Sola Gómez, A. J., Jiménez Sánchez, M. L., Rodríguez Tamayo, M. L. & Mota, J. F. (2009). Can gypsophytes distinguish different types of gypsum habitats? *Acta Botanica Gallica*, 156(1), 63–78.

Merlo, M. E., Mota, J. F. & Sánchez Gómez, P. (2011). Ecofisiología y adaptaciones de las plantas vasculares a las características físicas y químicas de sustratos especiales. En: Mota, J. F., Sánchez-Gómez, P. & Guirado, J. S. (eds). *Diversidad vegetal de las yeseras ibéricas. El reto de los archipiélagos edáficos para la biología de la conservación*. 51-74. ADIF-Mediterráneo Asesores Consultores. Almería.

Merow, C., Smith, M. J. & Sllander, A. (2013). A practical guide to Maxent for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and setting matter. *Ecography*, 36, 1058-1069.

Meyer, S. E. (1986). The ecology of gypsophile endemism in the Eastern Mojave desert. *Ecology*, 67, 1303–1313.

Morrone, J. J. (1994). On the identification of areas of endemism. *Systematic Biology*, 43, 438–441.

Mota, J. F., Rodríguez-Tamayo, L., Peñas, J., Pérez, F., Dana, E. & Merlo, M.E. (1998). Examen de la vegetación de los aljezares ibéricos con especial atención a la provincia de Almería. *Investigación y Gestión*, 3, 147–158.

Mota, J. F., Sola, A. J., Dana, E. D., Jiménez-Sánchez, M. L. (2003). Plant succession in abandoned gypsum quarries in Southeast Spain. *Phytocoenologia*, 33, 13–28.

Mota, J. F., Sola, A. J., Jiménez-Sánchez, M. L., Pérez-García, F. J. & Merlo, M. E. (2004a). Gypsiculous flora, conservation and restoration of quarries in the southeast of the Iberian Peninsula. *Biodiversity and Conservation*, 13, 1797–1808.

Mota, J. F., Sola, A. J., Jiménez-Sánchez, M. L., Pérez-García, F. J., Merlo, M. E. (2004b). Gypsophilous flora and quarries: some remarks on the preservation and restoration of gypsum outcrops. *Ecol Medit*, 30(2), 107–109.

Mota, J. F. (2007). Vegetación de escarpes, gleras y rocas. En: Blanca, G. & Valle, F. (eds.). *Proyecto Andalucía*. Tomo XXIV, Botánica V. 139-162. Sevilla: Publicaciones Comunitarias.

Mota, J. F., Sánchez Gómez, P., Merlo, M. E., Catalán Rodríguez, P., Laguna Lumbreras, E., de la Cruz, M., Navarro Reyes, F. B., Marchal Gallardo, F., Bartolomé Esteban, C., Martínez Labarga, J. M., Sainz Ollero, H., Valle Tendero, F., Serra Laliga, L., Martínez Hernández, F., Garrido Becerra, J. A. & Pérez García, F. J. (2009). Aproximación a la checklist de los gipsófitos ibéricos. *Anales de Biología*, 31, 71-80.

Mota, J. F., Garrido-Becerra, J. A., Pérez-García, F. J., Sola, A. J. & Valle, F. (2010). Use of the multi-response permutation procedure and indicator species value for the statistical classification of the gypsicolous Iberian scrub communities. *Candollea*, 65(1), 117–134.

Mota, J. F., Sánchez-Gómez, P. & Guirado, J. S. (2011a). *Diversidad vegetal de las yeseras ibéricas. El reto de los archipiélagos edáficos para la biología de la conservación*. ADIF- Mediterráneo Asesores Consultores, Almería, 636 pp.

Mota, J. F., Navarro, F. B., Peñas, J., Pérez-García, F. J., Posadas, L., Pujadas Salvá, A. J., Rodríguez-Tamayo, M. L., Sainz Ollero, H., Salazar, C., Sánchez-Gómez, P., Segarra-Moragues, J. G., Serra, L., Sola, A. J., Torres, J. A., Triano, E., Valle, F., Villar, L., Ballesteros, M., Bartolomé, C., Cano, E., del Río, J., Dominguez-Lozano, F., Fabado, J., Fabregat, C., Ferrer, P. P., García Fuentes, A., Garrido-Becerra, J. A., Goñi, D., Guirado, J. S., Gutiérrez, L., Guzmán, D., Ivorra, A., Jiménez Martínez, J. F., Laguna, E., Lahora, A., López Udías, S., Lorite, J., Marchal, F., Martínez-Hernández, F., Martínez Labarga, J. M., Medina-Cazorla, J. M., Mendoza, A. J. y Merlo, M. E. (2011b). Listado de la flora vascular gipsófila española. En: Mota, J. F., Sánchez-Gómez, P. & Guirado, J. S. (Eds). *Diversidad vegetal de las yeseras ibéricas. El reto de los archipiélagos edáficos para la biología de la conservación*. 89-100. ADIF - Mediterráneo Asesores Consultores, Almería.

Mota, J. F., Martínez-Hernández, F., Mendoza, A. J., Martínez-Nieto, I. & Saiz Ollero, H. (2011c). *Gypsophila struthium* subsp. *hispanica* (Willk.) G. López. En: Mota, J. F., Sánchez-Gómez, P. & Guirado, J. S. (Eds). *Diversidad vegetal de las yeseras ibéricas. El reto de los archipiélagos edáficos para la biología de la conservación*. 175-176. ADIF - Mediterráneo Asesores Consultores, Almería.

Mota, J. F., Merlo, M. E., Guirado, J. S., Martínez-Nieto, M. I. & Pérez-García, F. J. (2011d). *Ononis tridentata* L. En: Mota, J. F., Sánchez-Gómez, P. & Guirado, J. S. (Eds). *Diversidad vegetal de las yeseras ibéricas. El reto de los archipiélagos edáficos para la biología de la conservación*. 263-266. ADIF - Mediterráneo Asesores Consultores, Almería.

Murphy, H. T. & Lovett-Doust, J. (2007). Accounting for regional niche variation in habitat suitability models. *Oikos*, 116, 99–110.

Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., da Fonseca, G. A. & Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403, 853-858.

Narkis Morales, S. (2012). Modelos de distribución de especies: Software Maxent y sus aplicaciones en Conservación. *Revista Conservación Ambiental*, 2 (1), 1-5.

Parmesan, C. & Yohe, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421, 37-42.

Parsons, P. F. (1976). Gypsophily in plants: a review. *American Midland Naturalist*, 96, 1-20.

Pearson, R. G. (2007). Species' distribution modeling for conservation educators and practitioners. Synthesis. *American Museum of Natural History*. Available from: <http://ncep.amnh.org>

Pérez-Collazos, E. & Catalán, P. (2008). Conservation genetics of the endangered Iberian steppe plant *Ferula loscosii* (Apiaceae). *Plant Biology*, 10 (4), 492-501.

Pérez García, F. J., Martínez Hernández, F., Garrido-Becerra, J. A., Mendoza Fernández, A. J., Medina Cazorla, J. M., Martínez-Nieto, M. I., Salmerón, E., Guirado, J. S., Merlo, M. E. & Mota, J. F. (2011). Biogeografía de la conservación en los aljezares ibéricos: Patrones corológicos y selección de reservas. En: Mota, J. F., Sánchez-Gómez, P. & Guirado, J.S. (eds). *Diversidad vegetal de las yeseras ibéricas. El reto de los archipiélagos edáficos para la biología de la conservación*. 569-586. ADIF - Mediterráneo Asesores Consultores, Almería.

Pérez-López, A., Pérez-Valera, F. & Sánchez Gómez, M. (2011). Origen y naturaleza del yeso. En: Mota, J. F., Sánchez-Gómez, P. & Guirado, J.S. (eds.). *Diversidad vegetal de las yeseras ibéricas. El reto de los archipiélagos edáficos para la biología de la conservación*. 17-32. Lugar: ADIF- Mediterráneo Asesores Consultores, Almería.

Peterson, A. T., Ortega-Huerta, M. A., Bartley, J., Sánchez-Cordero, V., Soberon, J., Buddemeier, R. H. & Stockwell, D.R. (2002). Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature*, 416, 626-629.

Peñas, J., Benito, B., Lorite, J., Ballesteros, M., Cañadas, E. M. & Martínez-Ortega, M. (2011). Habitat fragmentation in arid zones: a case study of *Linaria nigricans* under land use changes (SE Spain). *Environmental Management*, 48, 168-176.

Phillips, S. J. & Dudík, M. (2004). A maximum entropy approach to species distribution modeling. *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning*, 655-662.

Phillips, S. J. & Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31, 161-175.

Phillips, S. J., Anderson, R. P. & Schapire, R.E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231-259.

Ponder, W. F., Carter, G. A., Flemons, P. & Chapman, R. R. (2001). Evaluation of museum collection data for use in biodiversity assessment. *Conservation Biology*, 15m 648-657.

Pressey R. L., Ferrier, S., Hager, T. C., Woods, C. A., Tully, S. & Weinman, K. M. (1996). How well protected are the forests of North-Eastern New South Wales? Analyses of forest environments in relation to tenure, formal protection measures and vulnerability of clearing. *Forest Ecology and Management*, 85, 311-333.

Randin, C. F., Engler, R., Normand, S., Zappa, M., Zimmermann, N. E., Pearman, P. B., Vittoz, P., Thuiller, W. & Guisan, A. (2009). Climate change and plant distribution: local models predict high elevation persistence. *Global Change Biology*, 15, 1557–1569.

Rejos, F. J., Bartolomé, C. & Martínez Labarga, J. M. (2011). Conquenses (Madrid, Toledo, Guadalajara y Cuenca). En: Mota, J. F., Sánchez-Gómez, P. & Guirado, J.S. (eds). *Diversidad vegetal de las yeseras ibéricas. El reto de los archipiélagos edáficos para la biología de la conservación*. 569-586. ADIF - Mediterráneo Asesores Consultores, Almería.

Rivas Goday, S. (1956). Aportaciones a la fitosociología hispánica. Proyectos de comunidades hispánicas II. *Anales del Instituto Botánico Cavanilles*, 14, 435–500.

Rivas-Martínez, S. & Costa, M. (1970). Comunidades gipsícolas del centro de España. *Anales del Instituto Botánico Cavanilles*, 27, 193-224.

Rivas-Martínez, S., Díaz, T. E., Fernández-González, F., Izco, J., Loidi, J., Lousa, M., & Panas, A. (2002). Vascular plant communities of Spain and Portugal. *Itinera Geobotanica*, 15(1), 5–432.

Rosenzweig, C., Karoly, D., Vicarelli, M., Neofotis, P., Wu, Q., Casassa, G., Menzel, A., Root, T. L., Estrella, N., Seguin, B., Tryjanowski, P., Liu, C., Rawlins, S. & Imeson, A. (2008). Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change. *Nature*, 453, 353-358.

Schmeller, D. S., Evans, D., Lin, Y. P. & Henle, K. (2014). The national responsibility approach to setting conservation priorities.. Recommendations for its use. *Journal for Nature Conservation*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnc.2014.03.002>.

Stockwell, D. R. B. & Peterson, A. T. (2002). Controlling bias in biodiversity data. In Scott, J. M., Heglund, P. J., Morrison, M. L., Hafler, J. B., Raphael, M. G., Wall, W. A. & Samson, F. B. (Eds.), *Predicting species occurrences: Issues of accuracy and scale*, 537-546. Washington, DC: Island Press.

Thomas, C. D., Cameron, A., Green, R. E., Bakkenes, M., Beaumont, L. J., Collingham, Y. C., Erasmus, B. F., de Siqueira, M. F., Grainger, A., Hannah, L., Hughes, L., Huntley, B., van

Jaarsveld, A. S., Midgley, G. F., Miles, L., Ortega-Huerta, M. A., Townsend Peterson, A., Phillips, O. L. & Williams, S. E. (2004). Extinction risk from climate change. *Nature*, 427, 145–148.

Thuiller, W., Richardson, D. M., Pysek, P., Midgley, G. Y., Hughes, G. O. & Rouget, M. (2005). Niche-based modelling as a tool for predicting the risk of alien plant invasions at a global scale. *Global Change Biology*, 11, 2234-2250.

Vicente-Serrano, S. M., Zouber, A., Lasanta, T. & Pueyo, Y. (2012). Dryness is accelerating degradation of vulnerable shrublands in semiarid Mediterranean environments. *Ecological Monographs*, 82 (4), 407-428.

Warren, D. L. & Seifert, S. N. (2011). Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria. *Ecological Applications*, 21 (2), 335-342.

Wiley, E. O., McNyset, K. M., Peterson, A.T., Robins, C. R., Stewart, A. M. (2003). Niche modeling and geographic range predictions in the marine environment using a machine-learning algorithm. *Oceanography*, 16 (3), 120-127.

Willkomm, M. (1852). *Die strand-und steppengebeite der iberischen halbinsel und deren vegetation*. Leipzig.

Wisz, M. S., Hijmans, R. J., Li, J., Peterson, A. T., Graham, C. H. & Guisan, A. (2008). Predicting Species Distributions Working Group. Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Diversity and Distributions*, 14, 763–773.

Whittaker, R. J., Araújo, M. B., Jepson, P., Ladle, R. J., Watson, J. E. M. & Willis, K. J. (2005). Conservation Biogeography: assessment and prospect. *Diversity and Distributions*, 11, 3–23.

Yost, A. C., Petersen, S. L., Gregg, M. & Miller, R. (2008). Predictive modeling and mapping sage grouse (*Centrocercus urophasianus*) nesting habitat using Maximum Entropy and a long-term dataset from Southern Oregon. *Ecological Informatics*, 3, 375–386.

Zhang, M., Zhou, Z., Chen, W., Cannon, C., Raes, N. & Slik, W. F. (2014). Major declines of woody plant species ranges under climate change in Yunnan, China. *Diversity and Distributions*, 20, 405-415.

ANEXOS

Anexo I: Descripción de la flora de estudio

A continuación se describen las características ecológicas detalladas de cada una de las especies de estudio.

Gypsophila struthium subsp. *hispanica* (Willk.) G. López

Es una planta sufruticosa con tallos erectos pudiendo alcanzar hasta 1 m de altura. Sus hojas son suculentas, lineares, subcilíndricas (triquetras), glabras y acaban en un mucrón. Los tallos rematan en cimas corimbiformes, más laxas que las de la subespecie tipo. Las flores, representadas en la Figura 42, presentan forma campanulada con pétalos blancos de 3–4,5 mm. El fruto es una pequeña cápsula globosa que encierra diminutas semillas negras. En la época de junio a octubre florece y fructifica.



Figura 42. Inflorescencia de *Gypsophila struthium* subsp. *hispanica*.

Se encuentra distribuida por el cuadrante NE de la Península Ibérica y es una especie propia de los matorrales sobre yesos. Esta especie pertenece al orden *Gypsophilion hispanicae*. Además de comportarse como un gipsófito estricto, muestra cierto comportamiento ruderal y una gran capacidad para colonizar ambientes alterados sobre yeso (Mota et al., 2011c). Debido a su carácter estepario, se encuentra presente en los pisos meso-supramediterráneo semiárido y seco.

Debido a su amplia abundancia no se encuentra bajo peligro o amenaza. En cambio, en la Comunidad Autónoma de Cataluña se encuentra estrictamente protegida en el valle del río Llobregós, en sierra Larga (Decreto 3238/1993, DOGC).

Gypsophila struthium L. in Loefl. subsp. *struthium*



Figura 43. Flores de *Gypsophila struthium* subsp. *struthium*.

Esta especie se caracteriza por ser una planta robusta y perenne cuya cepa es tortuosa. Presenta ramas colocadas horizontalmente y la longitud de sus tallos puede llegar hasta 1 m.

Sus flores, identificadas en la Figura 43, son de color blanco con una longitud aproximada de 1 cm, agrupándose en cimas globosas. Florecen en verano y a principios de otoño. Su fruto es una cápsula con semillas subreniformes negras o castañas.

Se trata de una especie endémica de la Península Ibérica, que se extiende por el Centro, Este y Sur, ocupando la provincia Murciano-Almeriense, el sector setabense de la provincia Catalana-Provenzal-Balear, el Accitano-Baztetano de la Bética, el Manchego y el Maestracense de la Mediterránea Ibérica Central.

A pesar de ser un endemismo, no figura en ningún listado o libro rojo, ni existe protección legal sobre él. Se encuentra dentro del listado de plantas endémicas, raras y amenazadas bajo la categoría de “No Amenazada” (NT).

Al tratarse de un gipsófito presenta hojas suculentas en las que acumula importantes cantidades de calcio. Diversos estudios, no publicados, han manifestado la gran capacidad de esta planta para resistir el estrés hídrico durante la época desfavorable.

Se encuentra con gran frecuencia en los matorrales gipsícolas que pueblan las laderas y los cerros yesíferos de ombroclima semiárido (árido) y seco. Además, muestra cierto comportamiento ruderal, colonizando taludes y bordes de caminos, siempre y cuando exista contenido en yeso.

Es un taxón característico de la alianza *Lepidion subulati* y es reemplazada por su vicariante geográfica *G. struthium* subsp. *hispanica* en la subalianza *Gypsophilenion hispanicae* (Martínez-Nieto et al., 2011a).

Helianthemum squamatum (L.) Dum. Cours.

Esta especie vegetal se trata de un caméfito sufruticoso de unos 30 cm de altura. Presenta escamas pateadas y tallos erectos. Sus hojas tienen formas entre lanceoladas, lineares y espatulares, además son obtusas, planas y con estípulas. Las flores son de color amarillo y ovoideas formando inflorescencias ramosas y corimbiformes, como se aprecia en la Figura 44, desde mayo hasta julio. El fruto es una cápsula más corta que el cáliz, cuyas semillas, son de color castaño claro y poseen una cubierta mucilaginosa, facilitando su germinación sobre las costras de los yesos.

Se caracteriza por su distribución ibero-magrebí, es decir, en la Península Ibérica y el norte de África. Se encuentra representado en las cuatro provincias biogeográficas que componen España, estando ausente solamente en los yesos del valle del Duero.



Figura 44. *Helianthemum squamatum* en época floral.

Se presenta formando parte de matorrales heliófilos sobre suelos yesosos de los pisos termo, meso o supramediterráneo, con un régimen de humedad semiárido o seco. Es un taxón característico de la alianza *Lepidion subulati* (Martínez-Nieto et al., 2011b).

No se encuentra bajo ninguna figura de protección legal o en algún listado. Sin embargo, en Cataluña figura como “estrictamente protegida” (Decreto 328/1992, DOGC).

Herniaria fruticosa L.

Esta especie es un pequeño sufrútice, tal y como se muestra en la Figura 45, de tallos postrados a suberectos, con una altura de 30 cm. Las hojas se presentan en fascículos densos axilares en los nudos. Éstas son ovalada u oblongas, carnosas, glabras o pubérulas. Las estípulas pueden tener hasta 1.75 mm, y son ovaladas, ciliadas y de color rojo.



Figura 45. Ente de *Herniaria fruticosa*.

Las flores son tetrámeras, pubescentes en la base, y forman inflorescencias en glomérulos de 7 flores o más, entre los meses de abril y agosto. El cáliz presenta sépalos desiguales, glabrescentes y con manchas púrpuras cerca de la base. Los pétalos son inconspicuos.

Respecto a su distribución, es un endemismo ibérico de los yesos del centro, centro-este, noreste y sureste de la Península Ibérica. Este hecho hace que sea uno de los gipsófitos con mayor extensión.

Se trata de un gipsófito estricto que forma parte de diversas comunidades gipsófilas ibéricas, desde el nivel del mar hasta aproximadamente los 1500 msnm (Álvarez Jiménez et al., 2011). Sus características le permiten colonizar todo tipo de sustratos yesíferos. Se considera característica del orden fitosociológico *Gypsophiletalia*, que reúne las comunidades gipsícolas ibéricas de matorral. Además, puede estar formando parte en diferentes comunidades de yesos. Las especies de este género se utilizan para uso de medicina tradicional, lo que las dota de nomenclatura relativa.

Al localizarse en una extensión tan amplia, presenta poblaciones numerosas, y no se encuentra recogida dentro de ningún listado o libro rojo, nacional o autonómico.

Existe una variación de la especie denominada var. *erecta* Willk., con tallos suberectos, estípulas que se mantienen rojizas hasta la madurez y sépalos con manchas purpúreas grandes en el margen, siendo la variedad nominotípica (var. *fruticosa*) de tallos postrados, con las estípulas que se vuelven blanquecinas (a veces con una mancha purpúrea en la base) y sépalos con manchas purpúreas pequeñas (Álvarez Jiménez et al., 2011).

Lepidium subulatum L.

Se trata de una pequeña planta, con una altura de hasta 60 cm, con gran cantidad de ramificaciones desde la base. Sus hijas son dimorfas, presentando en los tallos fértiles hojas muy estrechas y lineares, mientras que en los tallos estériles, son más anchas y obtusas. La floración se produce entre marzo y julio, dando lugar a racimos corimbiformes caducos, como se muestra en la Figura 46, muy densos pero con gran cantidad de flores de tamaño 3-4 mm. Los frutos también son pequeños, con forma ovalada y débilmente alados, con semillas de color marrón y rojo, que poseen cubiertas mucilaginosas, facilitando su germinación sobre las costras de yesos.



Figura 46. Individuo de *Lepidium subulatum*.

Se extiende entre España, Marruecos y Argelia. Dentro de la Península Ibérica, se distribuye ampliamente en las zonas Central y del Este, dispersa en las provincias Bética, Murciano-Almeriense, Mediterránea Ibérica Central y Catalana-Provenzal-Balear.

Forma parte de los matorrales de suelos gípsicos, dentro de las comarcas mediterráneas continentales de bioclima mesomediterráneo, semiárido o seco (Martínez-Nieto et al., 2011c). Está asociada a los suelos pulverulentos, en los que hay presencia de costras yesíferas. Sin embargo, puede desarrollarse sobre cualquier hábitat con suficiente contenido en yesos.

Es una especie característica del orden *Gypsophiletalia*, considerada como el gipsófito ibérico por excelencia dada su gipsofilia extrema y su amplia distribución (Martínez-Nieto et al., 2011c). A esto hay que añadirle la facilidad de germinación sobre las costras de yesos.

No figura en ningún listado o libro rojo ni bajo protección legal, exceptuando en la Comunidad Autónoma de Cataluña, en donde está definida como “Estrictamente Protegida” (Decreto 328/1992, DOGC). En aquellas zonas donde las poblaciones son escasas o de reducido tamaño, puede existir riesgo de extinción local debido a su especificidad ecológica, las dificultades en la dispersión, la competencia con otras especies, las elevadas fluctuaciones en las tasas de germinación o los riesgos derivados del cambio climático (Martínez-Nieto et al., 2011c).

Existen diversas variedades de esta especie, que carecen de un área fitogeográficamente consistente y cuyo valor taxonómico parece escaso.

Ononis tridentata L. subsp. *tridentata*

Se caracteriza por ser un arbusto muy ramificado, con una altura de 1.80 m. Sus hojas son crasulentas y espatuladas, terminadas en dientes, de color verde. Las flores, de entre 10 y 17 mm, son pequeñas y de color rosa, tal y como se muestra en la Figura 47, de la familia de las papilionáceas, cuya floración se produce en primavera y verano. En cambio, es posible ver algunas flores durante casi todo el año. Sus frutos son legumbres de pequeño tamaño, viscosas y con tomento glanduloso en cuya base pueden reconocerse los restos del cáliz y, en el extremo opuesto, el estilo filiforme acrescente.

Se distribuye en la zona Noroeste de África, en Marruecos, y dentro de la Península Ibérica, en el Este, Centro y Sur. Abarca las provincias biogeográficas Bética, Murciano-Almeriense, Catalana-Provenzal-Balear y Mediterránea Ibérica Central.



Figura 47. Floración de *Ononis tridentata*.

Se puede encontrar sobre suelos de yeso y margas yesíferas formando parte de matorrales en las zonas semiáridas y secas, en los pisos termo y mesomediterráneo. Pertenece a la alianza *Lepidion subulati*.

Diversos estudios edáficos publicados, muestran que los suelos en los que predomina son de textura más pedregosa, más ricos en materia orgánica y de mayor profundidad. Estas diferencias se trasladan también a las costras criptogámicas acompañantes (Mota et al., 2011d).

En cuanto a la conservación de este taxón, no se encuentra amenazado ni incluido en ningún listado o libro rojo debido a la amplia distribución y a la abundancia de poblaciones. En cambio, en Cataluña se encuentra bajo la denominación “Estrictamente Protegida” (Decreto 328/1992, DOGC).

Es de gran importancia la amplia variabilidad morfológica de la especie, principalmente de las formas de las hojas y la presencia de dientes en éstas: linear, subcilíndrica, ligeramente acanalada y sin dientes o ancha y con dientes marcados. Se ha tratado de establecer una relación entre las formas de hojas estrecha y los yesos triásicos, muy difícil de mantener, debido a la presencia de estas dos variantes en una misma localidad. Los análisis moleculares preliminares (Martínez-Nieto, datos inéditos) indican cierta diferenciación de todas las poblaciones repartidas a lo largo de la geografía española (Mota et al., 2011d).