

Efecto del cambio climático y análisis de la competencia en la especie invasora *Cenchrus setaceus* y tres especies nativas en las Islas Canarias: un enfoque basado en modelos de nicho

Effect of climate change and competition analysis in the invasive species *Cenchrus setaceus* and three native species in the Canary Islands: a niche modeling approach



© Pilar Lafita Narbona

Trabajo de Fin de Grado
Pilar Lafita Narbona
Tutorizado por Francisco José Ferrer Ferrer.
Grado en Biología. Junio 2023

ÍNDICE

1. Resumen/Abstract.....	2
2. Introducción.....	3
3. Objetivos.....	4
4. Área de estudio.....	5
5. Materiales y método.....	7
5.1. Elaboración y gestión de la base de datos.....	8
5.2. Aplicación del algoritmo de modelado.....	10
5.3. Elaboración de un indicador del efecto del cambio climático sobre la distribución de las especies.....	11
5.4. Elaboración de un indicador del grado de competencia entre especies nativas e invasora.....	11
6. Resultados.....	12
6.1. Variables bioclimáticas seleccionadas.....	12
6.2. Curvas de respuesta de las especies a las variables del nicho.....	14
6.3. Evaluación del rendimiento predictivo del modelo.....	15
6.4. Evaluación de la importancia de las variables.....	16
6.5. Modelos de distribución potencial de las especies.....	17
6.6. Efecto del cambio climático.....	18
6.7. Competencia entre las especies nativas y la especie invasora.....	21
7. Discusión.....	24
8. Conclusiones/Conclusions.....	27
9. Bibliografía.....	29

1. Resumen

El cambio climático y la expansión de especies invasoras son dos de las mayores amenazas para la pérdida de biodiversidad en las islas. Por ello, resulta crucial estudiar y analizar los posibles impactos de las especies invasoras presentes en las islas en escenarios futuros de cambio climático y desarrollar planes eficaces de conservación. En este trabajo, se ha modelado el nicho ecológico de la especie invasora *Cenchrus setaceus* o rabogato y tres especies nativas (*Hyparrhenia hirta*, *Aristida adsecensionis* y *Cenchrus ciliaris*), con el fin de calcular el área de distribución potencial en dos posibles escenarios futuros y analizar el efecto del cambio climático y la competencia entre la especie invasora y las especies nativas. Los resultados apuntan a que las Islas Canarias podrían ser adecuadas para la expansión de la especie invasora en escenarios futuros y señalan a *C. ciliaris* como la especie más vulnerable en un contexto de cambio climático.

1. Abstract

Climate change and the spread of invasive species represent two of the most significant threats to island biodiversity loss. As a result, it is essential to investigate and evaluate the potential impacts of invasive species under future climate change scenarios and devise effective conservation strategies. This study models the ecological niche of the invasive species *Cenchrus setaceus* (rabogato) and three native species (*Hyparrhenia hirta*, *Aristida adsecensionis*, and *Cenchrus ciliaris*) to determine their potential distribution areas in two possible future scenarios and assess the impacts of climate change and competition between invasive and native species. The findings indicate that the Canary Islands may be suitable for the expansion of the invasive species in future scenarios and identify *C. ciliaris* as the most vulnerable species in the context of climate change.

2. Introducción

El VI informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, 2022) señala el aumento de las emisiones de CO₂ de origen antropogénico como principal responsable del ‘inequívoco’ calentamiento global (**Figura 1**). Las emisiones de gases de efecto invernadero han aumentado sin precedentes desde la era preindustrial, llegando a máximos históricos en las últimas décadas. Estos gases de efecto invernadero derivan de un uso de la energía, de la tierra, de patrones de consumo y producción no sostenibles. Este informe relaciona, además, el calentamiento global con los cambios físicos y biológicos de numerosos sistemas a escala global, reconociendo la interdependencia del clima, los ecosistemas y la biodiversidad, y las sociedades humanas (IPCC, 2022).

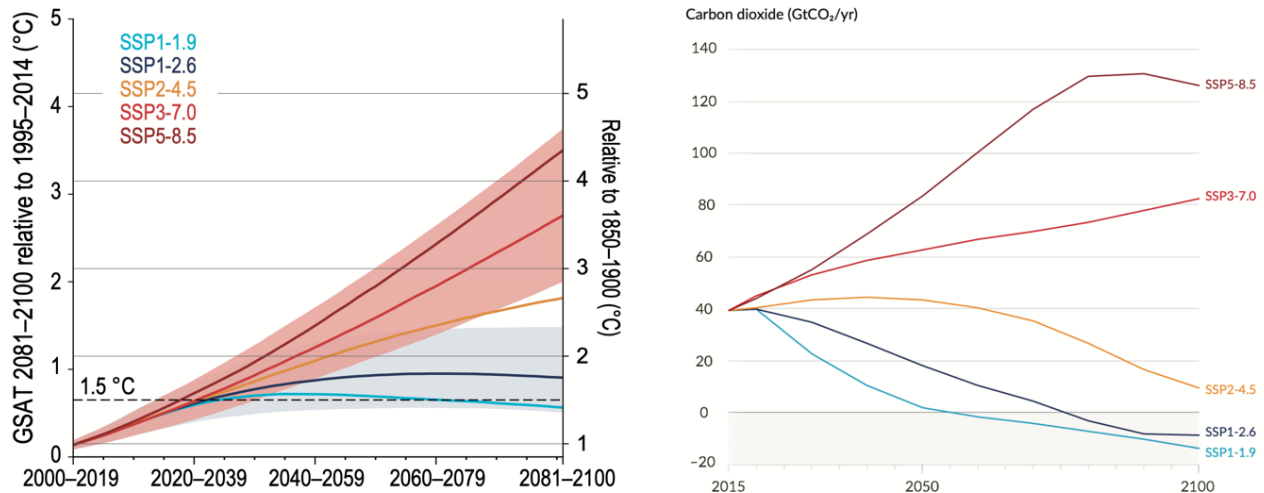


Figura 1. Predicciones de temperatura y emisiones de dióxido de carbono hasta el año 2100 según los posibles escenarios reunidos en el Sexto Informe del Grupo 1 del IPCC. Adaptado de IPCC, 2021.

Son numerosos los estudios realizados sobre el impacto del cambio climático en el patrimonio natural español. Entre otros resultados, se evidencia el efecto del cambio climático sobre la biodiversidad, capaz de generar cambios en la distribución de los pisos de vegetación y alteraciones de parámetros fenológicos como la brotación, floración y caída de la hoja (Felicísimo, 2011). En un contexto de cambio climático global, es de crucial importancia poner el foco en las islas, afectadas de forma desproporcionada por la crisis de biodiversidad (Norder *et al.*, 2020). Ya que, aunque las islas representan menos del 8 % de la superficie terrestre mundial (Sayre *et al.*, 2019), más del 60 % de las extinciones conocidas son especies endémicas insulares (Tershy *et al.*, 2015; Whittaker *et al.*, 2017). Este efecto desproporcionado podría ser causado por el aislamiento

geográfico, que facilita el establecimiento y la evolución de un conjunto limitado de especies más sensibles a los cambios y más vulnerables a la extinción que las especies continentales (Reaser *et al.*, 2007). En especial, las especies alóctonas invasoras suponen un gran riesgo para las especies autóctonas insulares, ya que pueden degradar su ecosistema, competir con ellas y eventualmente reemplazarlas (González-Rodríguez *et al.*, 2010).

En este trabajo de fin de grado se han seleccionado cuatro especies diferentes: una especie alóctona invasora (*Cenchrus setaceus*) y tres especies nativas (*Hyparrhenia hirta*, *Cenchrus ciliaris* y *Aristida adscensionis*). Todas ellas herbáceas con preferencias de hábitat similares y conviven en el archipiélago canario. Por lo tanto, dada la similitud de su hábitat se espera que en un contexto de cambio climático existan relaciones de competencia entre ellas.

C. setaceus es comúnmente conocida como rabo de gato, una poácea perenne con metabolismo C4 de distribución termo-cosmopolita originaria del noreste de África (Bella y D'Urso, 2012) y es una de las plantas alóctonas más problemáticas en las Islas Canarias (Gobierno de España, 2013). Fue introducida por primera vez en el siglo XX debido a su valor ornamental y desde entonces ha conseguido establecerse en diferentes hábitats y espacios protegidos (Rodríguez *et al.*, 2009). Está ampliamente naturalizada gracias a su fácil dispersión por el viento, ocupando los márgenes de las carreteras, en los que aprovecha las turbulencias creadas por los coches para dispersar sus semillas (Gobierno de España, 2019). Se encuentra en todas las islas del archipiélago y presenta una tendencia muy expansiva, siendo especialmente abundante en las islas de Gran Canaria y Tenerife (Gobierno de España, 2019).

En las Islas Canarias podemos encontrar a *C. setaceus* hasta los 1000 m.s.m., prevaleciendo bajo los 500 m.s.m. (González-Rodríguez *et al.*, 2010). En este rango altitudinal ha invadido áreas protegidas de matorral xerofítico costero en las que compete y eventualmente reemplaza a hierbas nativas (Martín *et al.*, 1995).

3. Objetivos

En este trabajo de fin de grado se pretende analizar el efecto del cambio climático sobre la distribución de cuatro especies herbáceas con preferencias de hábitat similares que conviven en el archipiélago canario y los posibles efectos en las interacciones de competencia entre las especies nativas y la especie invasora. Para ello, se ha seleccionado

una especie alóctona invasora (*Cenchrus setaceus*) y tres especies nativas (*Hyparrhenia hirta*, *Cenchrus ciliaris* y *Aristida adscensionis*).

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Elaboración de modelos de nicho de las especies a estudiar.
- Proyección de los modelos de nicho sobre el espacio geográfico en el presente y dos escenarios futuros (SSP1-2.6 y SSP5-8.5).
- Determinar el umbral de presencia de las especies.
- Elaboración de un indicador del efecto del cambio climático.
- Elaboración de un indicador de competencia entre la especie invasora y las especies nativas.

4. Área de estudio

Las Islas Canarias están situadas a menos de 100 km de la costa norteafricana, con una latitud de 10 - 13° W, 27 - 29° N. Forman parte de la Macaronesia o “Islas Afortunadas”, junto con las Azores, Madeira, Salvajes y Cabo Verde. Para facilitar el análisis de los resultados, se han dividido las islas en orientales (Lanzarote, Fuerteventura y Gran Canaria) y occidentales (Tenerife, La Gomera, La Palma y El Hierro), dadas sus acusadas diferencias en cuanto a clima y vegetación. El área de estudio de este trabajo cuenta con superficie total de 7507 km² y, debido a su extensión y las herramientas de trabajo disponibles, se ha trabajado con una resolución aproximada de 1 km².

El clima canario es de un carácter singular, resultante de la combinación de las condiciones atmosféricas regionales y de factores geográficos (Marzol y Máyer, 2012). Se incluye dentro del macro-bioclima mediterráneo, de carácter extratropical y se caracteriza por la existencia de un periodo seco de al menos dos meses después del solsticio de verano (Del Arco *et al.*, 2006). Los principales factores determinantes del clima canario son la cercanía al continente africano, la incidencia de la corriente marina fría de Canarias, el carácter fragmentado del territorio, la orografía, la altitud y la orientación de las cordilleras (Marzol y Máyer, 2012).

La cercanía de las islas al continente africano y la corriente fría de Canarias tienen un efecto sobre la temperatura del aire a nivel de la costa, que se ve afectada a su vez por la temperatura del agua (Font, 1956; De Nicolás *et al.*, 2011). Existe un gradiente térmico de la superficie del mar desde la costa africana hacia el interior del océano, siendo más frías las aguas que bañan las islas orientales que aquellas que bañan las islas occidentales,

afectando a la temperatura del aire en cada isla (De Nicolás *et al.*, 2011) y dando lugar a diferencias de temperatura entre ellas. También se observa un gradiente en la distribución de las precipitaciones en función a la distancia al continente africano, siendo más abundantes las precipitaciones en las islas más alejadas del mismo y menos abundantes en las más cercanas (De Nicolás *et al.*, 2011).

Otro de los factores determinantes del clima de las Islas Canarias son los vientos Alisios del NE, unos vientos marítimos que se forman en el flanco oriental del Anticiclón de las Azores, que al desplazarse sobre la masa de agua fría de la corriente de canarias permite que exista un clima relativamente estable durante todo el año (Font, 1956) y provoca que las temperaturas en las islas sean más moderadas que lo que les correspondería por su latitud. No obstante, existe una gran cantidad de microclimas que varían desde climas desérticos hasta climas húmedos subtropicales (De Nicolás *et al.*, 2011), e incluso pueden observarse nevadas frecuentes en zonas como las Cañadas del Teide.

Todas las islas son de origen volcánico y presentan una amplia variabilidad de altura entre sus cordilleras. El punto más alto del archipiélago es el Pico del Teide (3718 m de altitud) en Tenerife, también el pico más alto de España, seguido por El Roque de los Muchachos (2423 m) en La Palma, el Pico de Las Nieves (1948 m) en Gran Canaria, el Pico de Malpaso (1501 m) en El Hierro y Garajonay (1487 m) en La Gomera. Mientras que Fuerteventura y Lanzarote son las islas de menor altitud y ninguna de ellas sobrepasa los 900 m de altitud.

Las Islas Canarias presentan una estructura vertical anómala, con una inversión térmica entre los 1200 y 1600 m.s.m. El descenso térmico es de alrededor de medio grado centígrado cada 100 m conforme se asciende (ritmo que puede variar según la orientación de las vertientes de cada isla y según la estación) hasta llegar a los 1000 m de altura, a partir de este punto las temperaturas aumentan durante unos metros, a este fenómeno se le da el nombre de inversión térmica (Marzol y Máyer, 2012; Herrera *et al.*, 2001). Uno de los efectos más significativos de la inversión térmica es la aparición del denominado mar de nubes, que juega un papel fundamental en la regulación térmica y en el aporte hídrico en el archipiélago (Marzol y Máyer, 2012). La elevación de las islas marca una clara diferencia en la formación del mar de nubes, siendo en las islas más elevadas en las que se da su formación con mayor frecuencia y en las que existen mayores diferencias entre las laderas de barlovento y sotavento (De Nicolás *et al.*, 2011). Además, este fenómeno da lugar a un aumento de la diversidad de ambientes climáticos en el gradiente

altitudinal y de la variabilidad ambiental en función de la exposición de las laderas a los vientos dominantes (De Nicolás *et al.*, 2011).

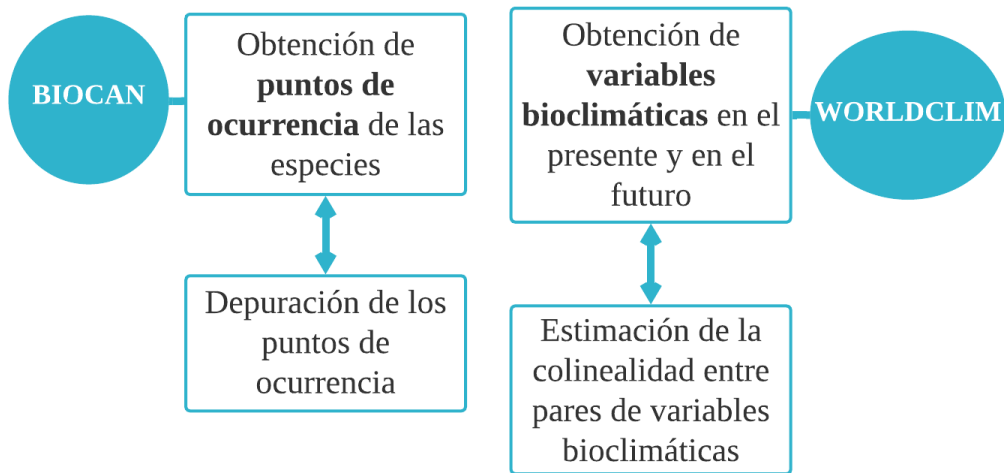
Otro de los factores influyentes en el clima de las islas es su emplazamiento en una zona de transición entre aguas frías y ricas de nutrientes fruto del upwelling de las zonas costeras y las aguas oligotróficas más cálidas del océano abierto (Barton *et al.*, 1998). Esta peculiar situación en una zona de transición da lugar a un complejo patrón de variabilidad regional, contribuyendo a la formación de los numerosos microclimas que pueden encontrarse en las Islas Canarias.

5. Materiales y método

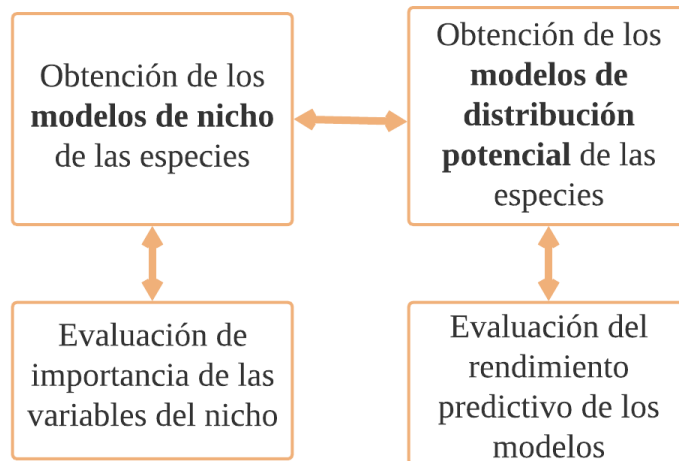
Con el fin de alcanzar los objetivos propuestos en este trabajo de fin de grado, se ha dividido la metodología en cuatro etapas que pueden visualizarse en el cronograma representado en la **Figura 2**. Las diferentes etapas se desarrollarán en los apartados sucesivos y son las siguientes:

- 1) Elaboración y gestión de la base de datos.
- 2) Aplicación del algoritmo de modelado.
- 3) Elaboración de un indicador del efecto del cambio climático sobre la distribución de las especies.
- 4) Elaboración de un indicador del grado de competencia entre especies nativas e invasora.

1. ELABORACIÓN Y GESTIÓN DE LA BASE DE DATOS



2. APLICACIÓN DEL ALGORITMO DE MODELADO



Elaboración de los **modelos booleanos de distribución potencial** de las especies en función de un umbral de presencia

3. ELABORACIÓN DE UN INDICADOR DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DE LAS ESPECIES

4. ELABORACIÓN DE UN INDICADOR DEL GRADO DE COMPETENCIA ENTRE ESPECIES NATIVAS E INVASORA

Figura 2. Cronograma del flujo de trabajo.

5.1. Elaboración y gestión de la base de datos

La base de datos de este trabajo está compuesta por dos grupos de datos: los puntos de ocurrencia de las especies en el presente y los datos bioclimáticos en el presente y en dos posibles escenarios futuros (SSP1-2.6 y SSP5-8.5).

Los puntos de ocurrencia de las especies se han obtenido del Banco del Inventario Natural de Canarias (BIOCAN), que comprende un conjunto de bancos de datos gestionados por el Gobierno de Canarias y permite a cualquier usuario obtener información sobre las especies del archipiélago. Se han descargado los datos correspondientes a las Islas Canarias para cada especie y se han depurado con el programa QGIS 3.28.3 – Firenze (QGIS Development Team, 2021), de forma que se han seleccionado solo aquellos puntos con mayor precisión (precisión = 1), se han eliminado nubes densas y regulares de puntos y se han filtrado de forma aleatoria hasta obtener un número adecuado para poder implementar el algoritmo de modelado. Cabe destacar que los datos provienen de revisiones bibliográficas, por lo que la cantidad de puntos no representa la abundancia de las especies en cada lugar.

Las variables bioclimáticas para las que se ha elaborado la base de datos bioclimáticos son 5 y se reúnen en el apartado de Resultados. Estas variables se han seleccionado según el grado de colinealidad entre ellas, siendo aquellas menos correlacionadas las de mayor interés para calcular el modelo de nicho. Para ello, se ha realizado una correlación entre pares de variables utilizando la librería *usdm* en R v.4.1.2 (Naimi *et al.*, 2014), obteniendo el factor de inflación de la varianza (VIF) para cada par de variables. Se han considerado variables no correlacionadas entre sí aquellas con $VIF \leq 0,8$.

Los datos bioclimáticos se han descargado de la base de datos WorldClim 2.1. Para los datos del presente, se han utilizado los datos disponibles para el periodo 1970-2000, provenientes de datos climáticos reales y se han seleccionado aquellos que tienen una escala de aproximadamente 1 km² (30 segundos de arco) (Fick y Hijmans, 2017). Los datos de los posibles escenarios futuros SSP1-2.6 y SSP5-8.5 se han obtenido promediando los resultados de tres modelos diferentes (ACCESS-CM2, EC-Earth3-Veg-LR y MIROC6), para el periodo 2081-2100 con una resolución de aproximadamente 1 km² (30 segundos de arco). Los datos climáticos de los posibles escenarios futuros disponibles en esta versión de WorldClim son los obtenidos en el CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6).

5.2. Aplicación del algoritmo de modelado

Con el objetivo de obtener un modelo de nicho para cada una de las especies de interés, se ha implementado el algoritmo de modelado MaxEnt o Maximum Entropy Modeling. Se trata de un algoritmo de modelado de nicho que permite estimar el nicho ecológico de una especie a partir de datos de puntos de ocurrencia y datos bioclimáticos. A partir del modelo de nicho ecológico se puede realizar una proyección para calcular la distribución potencial de la especie. La versión utilizada ha sido la 3.4.4, la más actualizada en el momento del desarrollo del trabajo (Phillips *et al.*, 2023).

Se han introducido los datos de puntos de ocurrencia de las especies y los datos climáticos en el presente en las Islas Canarias. Una vez obtenido el modelo de nicho, se han introducido en el algoritmo los datos climáticos del escenario SSP1-2.6. A partir de estos nuevos datos climáticos, el algoritmo ha proyectado sobre el espacio geográfico la distribución potencial de cada especie en el escenario de interés. Después, se ha repetido el mismo procedimiento para el escenario SSP5-8.5. Este mismo proceso, desde la obtención del nicho ecológico de las especies hasta su proyección, se ha repetido un total de 15 veces para cada escenario.

El cálculo de la distribución potencial de las especies realizado por MaxEnt es un procedimiento estocástico, por lo que los resultados de cada repetición varían levemente. Se han obtenido 15 resultados diferentes para los escenarios futuros y 30 resultados para el presente y se ha calculado la media de los resultados de cada escenario para dar lugar a los mapas de distribución potencial sobre los que se ha trabajado posteriormente.

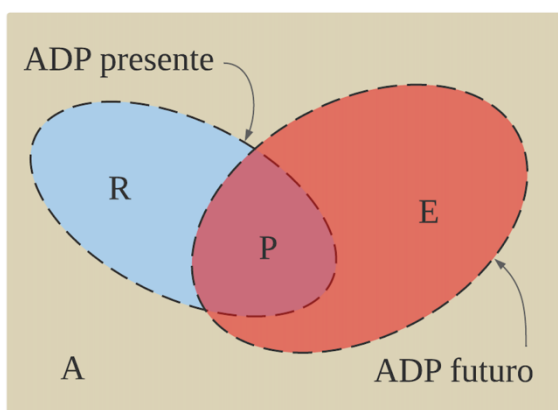
Además de calcular la distribución potencial de las especies, MaxEnt genera indicadores estadísticos sobre la contribución de las variables bioclimáticas en el cálculo del modelo de nicho y sobre el rendimiento predictivo del propio modelo, que se comentarán en el apartado de Resultados y Discusión.

En QGIS, se han calculado las medias de los resultados obtenidos en MaxEnt y se han elaborado los mapas booleanos de distribución potencial a partir de un umbral de presencia. Entre todos los umbrales calculados por MaxEnt, se ha seleccionado el umbral logístico en el que la sensibilidad y especificidad se igualan para los puntos de entrenamiento (Equal training sensitivity and specificity logistic threshold).

Una vez calculados los mapas booleanos de distribución potencial se han procesado los datos utilizando QGIS para elaborar los mapas definitivos presentados en los Resultados y se han calculado los indicadores descritos a continuación en hojas de Excel.

5.3. Elaboración de un indicador del efecto del cambio climático sobre la distribución de las especies

El efecto del cambio climático sobre la distribución de las especies se ha calculado utilizando el índice EF_CC (**Figura 3**). Este índice se ha elaborado a partir del área de permanencia, restricción, expansión y ausencia de las especies. Los valores de las áreas mencionadas se han calculado a partir de los mapas booleanos de distribución potencial de cada especie en el presente, comparándolos con cada posible escenario futuro de forma independiente. Además, se ha calculado la diferencia para todos los parámetros mencionados entre el escenario SSP1-2.6 y SSP5-8.5.



$$EF_CC = (P+E-R) / (P+E+R+A)$$

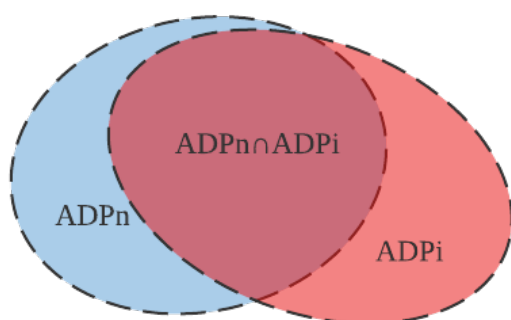
- P:** Área de permanencia. Es el área en la que se encuentra la especie en el presente y en el futuro.
- R:** Área de restricción. Es el área en la que se encuentra la especie en el presente pero no en el futuro.
- E:** Área de expansión. Es el área donde la especie no se encuentra en el presente pero sí en el futuro.
- A:** Área de ausencia. Es el área donde la especie no se encuentra ni en el presente ni en el futuro.
- EF_CC:** Efecto del cambio climático. Valores positivos implica un aumento relativo del ADP en el futuro y valores negativos una disminución relativa.

Figura 3. Indicador de efecto del cambio climático en la distribución potencial de las especies de estudio.

5.4. Elaboración de un indicador del grado de competencia entre especies nativas e invasora

El grado de competencia de las especies se ha calculado por medio de un indicador $\alpha_{n,i}$ (**Figura 4**). Este indicador refleja la relación entre el área de distribución potencial de una especie nativa sin la intersección con la especie invasora, el área de distribución potencial de la especie invasora sin la intersección con la especie nativa y el área de intersección de la distribución potencial de la especie nativa y la especie invasora. Éste índice se ha calculado para cada una de las especies nativas a partir de los mapas booleanos de distribución potencial en el presente y en los dos posibles escenarios futuros.

$$\alpha_{n,i} = (ADP_n - ADP_i) / (ADP_n \cap ADP_i + ADP_n + ADP_i)$$



ADP_n: Área de distribución potencial de la especie nativa libre de competencia con la especie invasora.

ADP_i: Área de distribución potencial de la especie invasora libre de competencia con la especie nativa.

ADP_n ∩ ADP_i: Área de intersección de ambas especies. Representa el área por la que compiten.

$\alpha_{n,i}$: Grado de competencia entre la especie nativa y la invasora. Si tiene signo positivo la especie nativa es más competitiva que la invasora y si tiene signo negativo la especie invasora es más competitiva que la nativa.

Figura 4. Indicador de la competencia entre las especies de estudio.

6. Resultados

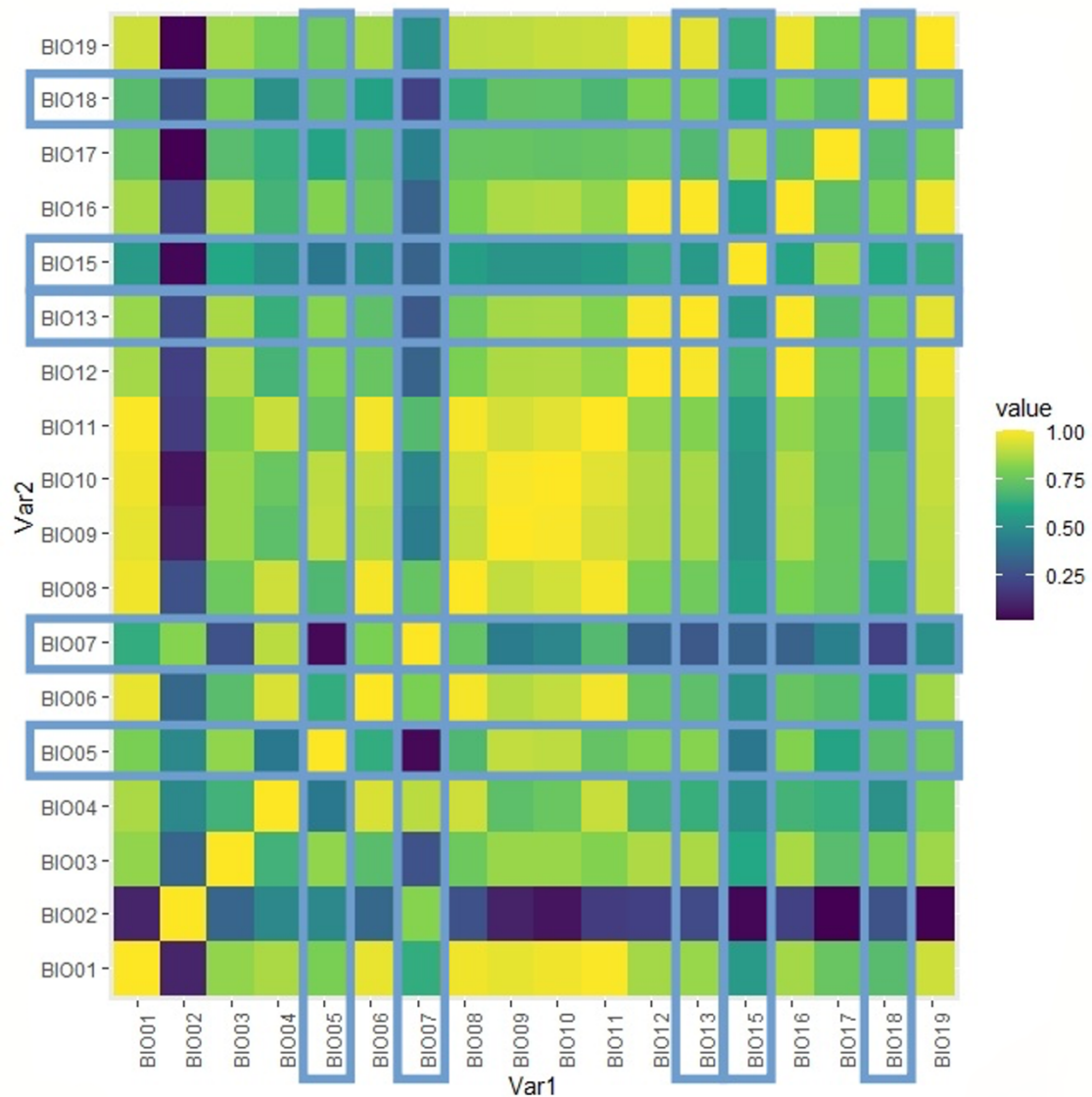
En este apartado se reúnen los resultados de las diferentes etapas del trabajo, desde la obtención de las variables bioclimáticas, hasta el cálculo de los índices de efecto del cambio climático y competencia. Se han presentado en orden cronológico, correspondiéndose con el flujo de trabajo seguido.

6.1. Variables bioclimáticas seleccionadas

Se ha calculado la correlación entre las 18 variables bioclimáticas (**Figura 5**). Entre ellas, 13 de las 18 variables bioclimáticas han presentado problemas de colinealidad, indicando que están correlacionadas con, al menos, una de las demás variables: BIO16, BIO11, BIO10, BIO12, BIO06, BIO01, BIO19, BIO04, BIO08, BIO09, BIO03, BIO17 y BIO02. La variable BIO14 (Precipitaciones en el mes más seco) ha sido eliminada ya que los datos para esta variable eran muy cercanos a 0. Tras eliminar las variables correlacionadas y la variable BIO14, el rango para el coeficiente de correlación lineal de las variables está entre 0.003852928 (correlación mínima entre BIO07 y BIO05) y -0.7990449 (correlación máxima entre BIO13 y BIO05). Un coeficiente de correlación cercano 1 o -1 indica que la variable bioclimática tiene una fuerte correlación con al menos una de las demás variables y los valores negativos indican que la correlación es inversa.

Las variables bioclimáticas que han sido seleccionadas para la implementación del algoritmo de modelado son: Temperatura del mes más cálido (BIO05), Rango anual de temperatura (BIO07), Precipitaciones del mes más húmedo (BIO13), Estacionalidad de la precipitación (BIO15) y Precipitaciones del trimestre más cálido (BIO18). Los valores para el factor de inflación de la varianza o VIF para las variables seleccionadas

se indican en la **Figura 5** y varían entre 1.34 (BIO07), y 4.63 (BIO13). Un VIF superior a 10 indica que el modelo tiene un problema de colinealidad, por lo que las variables seleccionadas tienen todos valores para VIF bajos, menores que 5.



VARIABLE	NOMBRE DE LA VARIABLE	VIF
BIO05	Tª máx. del mes más cálido (°C)	3,37
BIO07	Oscilación térmica anual (°C)	1,34
BIO13	Precipitación del mes más húmedo (mm)	4,63
BIO15	Estacionalidad de la precipitación (%)	1,66
BIO18	Precipitación de la estación más cálida (mm)	2,67

Figura 5. Matriz de correlación entre pares de variables bioclimáticas y tabla con el Factor de Inflación de la Varianza (VIF) de las variables bioclimáticas seleccionadas.

6.2. Curvas de respuesta de las especies a las variables del nicho

Se han obtenido las curvas de respuesta marginal del modelo para cada variable bioclimática (Figura 6). Estas curvas muestran cómo cada variable ambiental afecta la predicción de MaxEnt. Es decir, cómo cambia la probabilidad prevista de presencia de una especie a medida que varía cada variable ambiental, manteniendo todas las demás variables ambientales en su valor de muestra promedio. Las curvas muestran la respuesta media del modelo en las 15 réplicas de MaxEnt (línea roja) y una la desviación estándar (área azul celeste). Además, se han indicado los valores mínimos y máximos que puede tomar cada variable en cada caso.

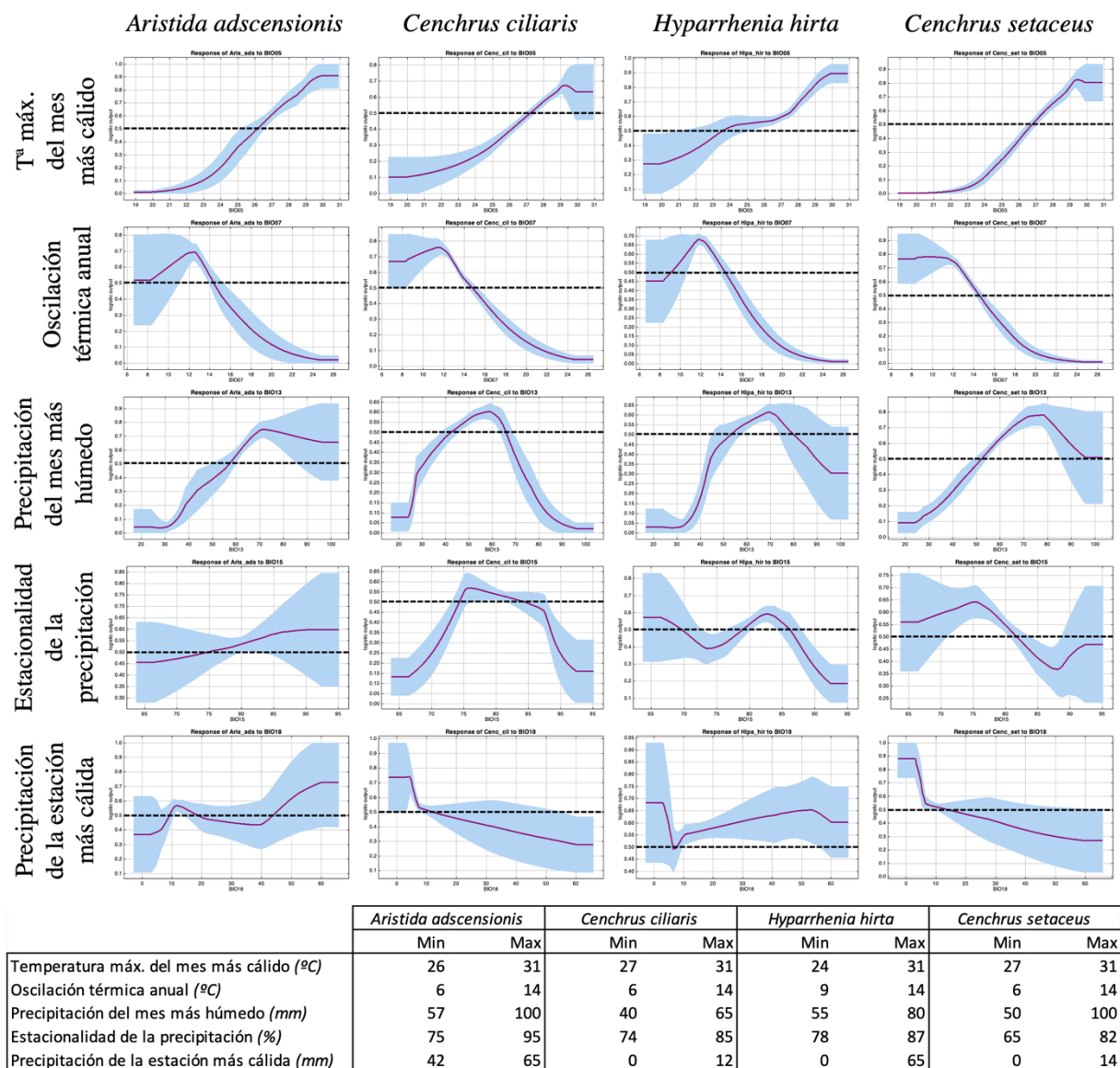


Figura 6. Curvas de respuesta marginal del modelo de nicho de cada especie a las variables bioclimáticas seleccionadas y valores máximos y mínimos para las variables bioclimáticas.

Todas las especies de estudio tienen una la máxima probabilidad de estar presentes cuando los valores para la Temperatura máxima del mes más cálido (BIO05) son iguales 31 °C. Los resultados indican que la especie con un rango más amplio para la variable BIO05 es *Hyparrhenia hirta*, para la cual la probabilidad de presencia es del 50 % cuando la temperatura es igual a 24 °C, mientras que en el caso de *Cenchrus setaceus* y *Cenchrus ciliaris* la temperatura debe ser igual a 27 °C y para *Aristida adscensionis* igual a 26 °C. Para todas las especies la probabilidad de presencia es máxima cuando la Oscilación térmica anual (BIO07) es igual a 14 °C. En el caso de la Precipitación del mes más húmedo (BIO13), se observan comportamientos muy diferentes; por un lado, *A. adscensionis* y *C. setaceus* presentan una mayor probabilidad de presencia en los rangos de 57-100 mm y 50-100 mm respectivamente y, por otro lado, *C. ciliaris* e *H. hirta* presentan una mayor probabilidad de presencia en los rangos 40-65 mm y 55-80 mm respectivamente. En cuanto a la Estacionalidad de la precipitación (BIO15), cada especie presenta un comportamiento diferente. Los rangos para BIO15 en la que existe una mayor probabilidad de encontrar a las especies de estudio son: 75-95 % (*A. adscensionis*), 74-85 % (*C. ciliaris*), 78-87 % (*H. hirta*) y 65-82 % (*C. setaceus*). También para la Precipitación de la estación más cálida (BIO18) se observan comportamientos diferentes; *C. ciliaris* y *C. setaceus* tienen mayor probabilidad de estar presentes cuando los valores de BIO18 se encuentran entre 0-12 mm y 0-14 mm respectivamente, *A. adscensionis* presenta una mayor probabilidad de presencia en el rango 42-65 mm e *H. hirta* en el rango 0-65 mm.

6.3. Evaluación del rendimiento predictivo del modelo

La capacidad predictiva de los modelos se puede evaluar a partir de una serie de estadísticos que se recogen en **Tabla 1**. El parámetro “Training AUC” se refiere al área bajo la curva ROC (Característica Operativa del Receptor) calculada en el conjunto de datos de entrenamiento del modelo (Powers, 2011). Se trata de una medida de la capacidad predictiva del modelo para cualquier valor de umbral. En la **Figura 7** se representa la curva ROC para las cuatro

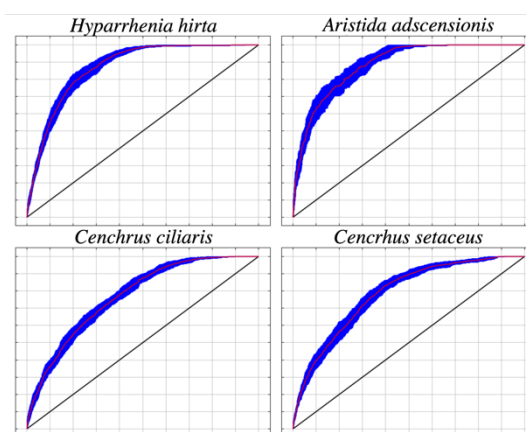


Figura 7. Curva ROC en del modelo de nicho para las cuatro especies en el escenario SSP1-2.6.

especies en uno de los escenarios propuestos. Los valores de AUC pueden variar desde 0,5, indicando que el modelo no tiene capacidad discriminativa, hasta 1, indicando que el modelo puede distinguir perfectamente entre las dos clases. El valor más bajo recogido en los resultados para el training AUC es $0,77 \pm 0,01$ en el caso de la especie *Cenchrus ciliaris* y el más alto $0,88 \pm 0,01$ en el caso de *Aristida adscensionis*. Generalmente, se considera que un modelo tiene una capacidad razonable para predecir la distribución de una especie si el valor de AUC es, al menos, igual a 0,7 (Jiménez-Valverde *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2017).

Species	<i>Cenchrus setaceus</i>	<i>Cenchrus ciliaris</i>	<i>Aristida adscensionis</i>	<i>Hyparrhenia hirta</i>	
#Training samples	140	131	47	123	
#Test samples	59	55	19	52	
#Background points	9948	9948	9948	9948	
Regularized training gain	$0,48 \pm 0,04$	$0,42 \pm 0,03$	$0,89 \pm 0,07$	$0,88 \pm 0,04$	
Training AUC	$0,79 \pm 0,01$	$0,77 \pm 0,01$	$0,88 \pm 0,01$	$0,86 \pm 0,01$	
BIO05 contribution (%)	$18,4 \pm 2,6$	$4,9 \pm 1,2$	$9,2 \pm 2,0$	$3,8 \pm 1,0$	
BIO07 contribution (%)	$32,7 \pm 4,4$	$15,3 \pm 4,2$	$21,1 \pm 4,6$	$28,8 \pm 2,9$	
BIO13 contribution (%)	$38,4 \pm 5,5$	$62,9 \pm 4,3$	$57,2 \pm 5,9$	$57,3 \pm 3,0$	
BIO15 contribution (%)	$5,7 \pm 1,3$	$14,0 \pm 3,0$	$5,2 \pm 2,7$	$8,8 \pm 2,6$	
BIO18 contribution (%)	$4,8 \pm 1,6$	$2,8 \pm 1,0$	$7,3 \pm 3,0$	$1,3 \pm 0,6$	
Test de Jackknife	AUC without BIO05	$0,74 \pm 0,01$	$0,72 \pm 0,01$	$0,82 \pm 0,02$	$0,84 \pm 0,01$
	AUC without BIO07	$0,73 \pm 0,01$	$0,70 \pm 0,02$	$0,82 \pm 0,02$	$0,83 \pm 0,01$
	AUC without BIO13	$0,73 \pm 0,01$	$0,71 \pm 0,02$	$0,80 \pm 0,03$	$0,82 \pm 0,01$
	AUC without BIO15	$0,76 \pm 0,01$	$0,72 \pm 0,01$	$0,83 \pm 0,02$	$0,84 \pm 0,01$
	AUC without BIO18	$0,76 \pm 0,01$	$0,72 \pm 0,01$	$0,83 \pm 0,02$	$0,85 \pm 0,01$
	AUC with only BIO05	$0,59 \pm 0,02$	$0,61 \pm 0,02$	$0,62 \pm 0,03$	$0,64 \pm 0,02$
	AUC with only BIO07	$0,63 \pm 0,02$	$0,63 \pm 0,02$	$0,68 \pm 0,03$	$0,72 \pm 0,02$
	AUC with only BIO13	$0,69 \pm 0,02$	$0,67 \pm 0,01$	$0,76 \pm 0,02$	$0,77 \pm 0,01$
	AUC with only BIO15	$0,55 \pm 0,02$	$0,62 \pm 0,03$	$0,57 \pm 0,03$	$0,67 \pm 0,02$
	AUC with only BIO18	$0,66 \pm 0,02$	$0,66 \pm 0,02$	$0,75 \pm 0,03$	$0,74 \pm 0,02$
Entropy	$8,73 \pm 0,04$	$8,79 \pm 0,03$	$8,31 \pm 0,07$	$8,33 \pm 0,04$	
Thresholds description: Equal training sensitivity and specificity					
Logistic threshold	$0,43 \pm 0,01$	$0,44 \pm 0,01$	$0,39 \pm 0,02$	$0,42 \pm 0,01$	
Fractional predicted area	$0,29 \pm 0,01$	$0,31 \pm 0,01$	$0,21 \pm 0,01$	$0,22 \pm 0,01$	
Training omission rate	$0,29 \pm 0,01$	$0,31 \pm 0,01$	$0,21 \pm 0,01$	$0,22 \pm 0,01$	
Test omission rate	$0,32 \pm 0,03$	$0,40 \pm 0,03$	$0,32 \pm 0,06$	$0,26 \pm 0,04$	

Tabla 1. Resultados de la implementación del algoritmo de modelado (MaxEnt).

6.4. Evaluación de la importancia de las variables

En la **Tabla 1** se incluyen también tres estadísticos que reflejan la contribución de cada variable biológica en la predicción de la presencia de cada especie: BIO contribution y Test de Jakknife, que incluyen AUC con una única variable y AUC con todas las variables menos una. Las dos variables bioclimáticas con valores más altos para

el estadístico BIO contribution son BIO07 y BIO13, coincidiendo con los valores más bajos del test de Jakknife: AUC sin BIO07 y AUC sin BIO13. En el caso del Test de Jakknife de AUC con una única variable, los valores más altos son aquellos de las variables BIO13 y BIO18.

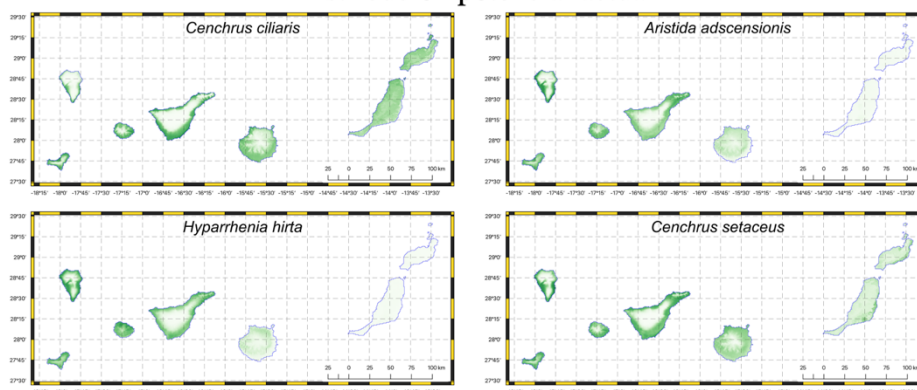
Además de estos indicadores, MaxEnt proporciona información sobre la fracción de área predicha y la tasa de omisión para diferentes umbrales de presencia, que permiten definir los criterios para la selección del umbral de presencia de las especies. En este caso se ha seleccionado el umbral de presencia que sigue el criterio de igualdad entre la sensibilidad y la especificidad, estimada a partir del modelo de nicho elaborado con los datos de entrenamiento. Los umbrales de presencia seleccionados han sido los siguientes: 0,43 para *Cenchrus setaceus*, 0,44 para *Cenchrus ciliaris*, 0,39 para *Aristida adscensionis* y 0,42 para *Hyparrhenia hirta*.

6.5. Modelos de distribución potencial de las especies

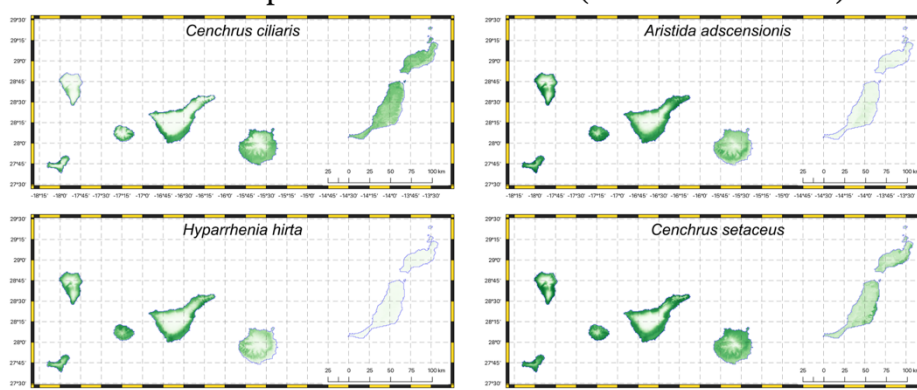
Los mapas de distribución potencial de las cuatro especies obtenidos en MaxEnt para el presente y los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 se han representado en la **Figura 8**. Los mapas de distribución potencial de las especies se han transformado en mapas de presencia/ausencia para los umbrales antes mencionados. A partir de los mapas de presencia/ausencia se han calculado los índices de efecto del cambio climático y la competencia entre la especie invasora y las especies nativas en el presente y en el futuro.

En los mapas de distribución potencial de las especies, se observa un incremento en el área de distribución potencial de todas ellas en los posibles escenarios futuros respecto al presente. *Cenchrus setaceus* es la especie con mayor aumento del área de distribución potencial en los posibles escenarios futuros, seguida por *Aristida adscensionis*. Por otro lado, *Hyparrhenia hirta* y *Cenchrus ciliaris* presentan un menor aumento, pero con diferencias. *H. hirta*, presenta un mayor aumento que *C. ciliaris* en el escenario SSP5-8.5, mientras que *C. ciliaris* presenta un mayor aumento en el escenario SSP1-2.6.

Distribución potencial actual



Distribución potencial en el año 2100 (Escenario SSP1-2.6)



Distribución potencial en el año 2100 (Escenario SSP5-8.5)

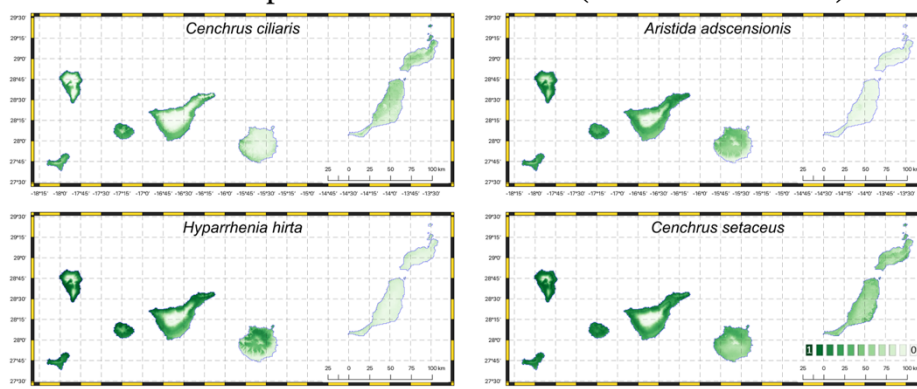


Figura 8. Mapas de distribución potencial de las especies en el presente y en los posibles escenarios futuros SSP1-2.6 y SSP5-8.5.

6.6. Efecto del cambio climático

A partir de los datos de permanencia, retracción, expansión y ausencia (**Figura 9**) se ha calculado y representado el efecto del cambio climático para las cuatro especies de interés en los escenarios SSP1-2.6 y SSP 5-8.5 con el índice EF_CC (**Tabla 2, Figura 10**). Además, se ha calculado y representado la diferencia de los valores entre ambos escenarios. En el escenario SSP1-2.6 se ha observado un efecto del cambio climático positivo (valores de EF_CC positivos) o neutral (EF_CC = 0) en todos los casos. Es decir, hay un incremento del área de distribución potencial de las especies. El efecto positivo

del cambio climático que se observa en este escenario es mayor en las islas occidentales que en las orientales, exceptuando a *Cenchrus ciliaris*, caso en el que el efecto positivo es mayor en las islas orientales. El escenario SSP5-8.5 presenta, en general, valores de efecto del cambio climático más positivos que el escenario SSP1-2.6, siguiendo el mismo patrón anterior. En el caso de *C. ciliaris*, se observa que los valores EF_CC se vuelven negativos en las islas orientales, siendo más bajos que aquellos del escenario 1-2.6. La especie que se ve más favorecida por el cambio climático es, en ambos casos, *Cenchrus setaceus*, siendo el escenario SSP5-8.5 en el que presenta unos valores más altos de EF_CC. La segunda especie más favorecida por el efecto del cambio climático es *Aristida adscensionis* y presenta valores más altos de EF_CC en el escenario SSP5-8.5. *Hyparrhenia hirta* sigue el mismo patrón, pero con valores más bajo. La especie *C. ciliaris*, sin embargo, presenta el patrón inverso, con valores para EF_CC más bajos en el escenario SSP5-8.5 que en el escenario SSP1-2.6.

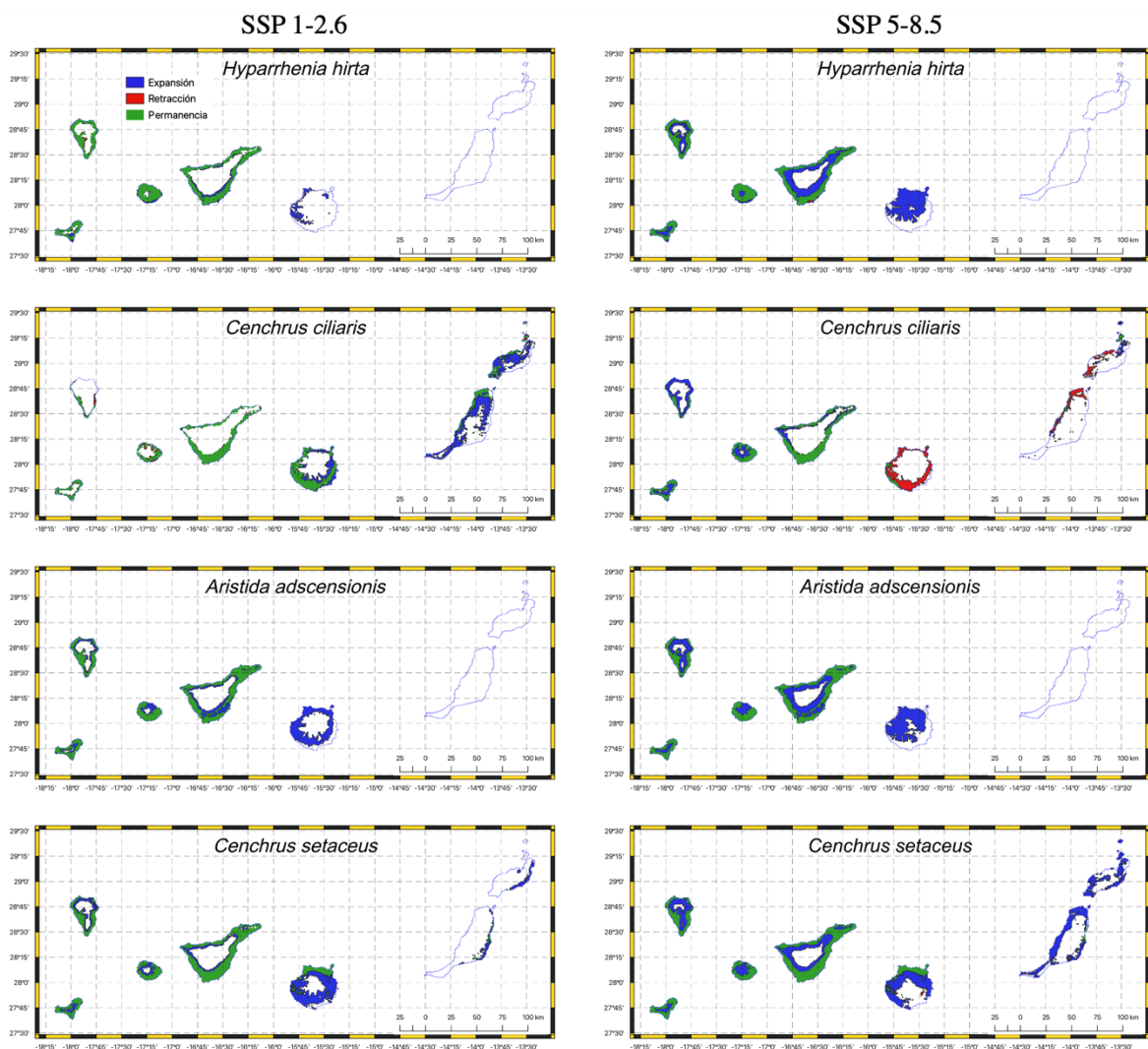


Figura 9. Permanencia, expansión retracción y ausencia de las especies de estudio en los escenarios SSP 1-2.6 y SSP 5-8.5.

ISLA	SSP1-2.6					SSP5-8.5					SSP5-8.5-SSP1-2.6					
	P	R	E	A	EF_CC	P	R	E	A	EF_CC	P	R	E	A	EF_CC	
<i>Hypparrhenia hirta</i>	Hierro	190		31	52	0,81	190		83		1,00	0	0	52	-52	0,19
	Gomera	313		33	26	0,93	313		59		1,00	0	0	26	-26	0,07
	La Palma	372	23	6	312	0,50	395		193	126	0,82	23	-23	187	-186	0,33
	Tenerife	797	4	168	1.068	0,47	787	14	759	478	0,75	-10	10	591	-590	0,28
	Gran Canaria			190	1.386	0,12			916	660	0,58	0	0	726	-726	0,46
	Lanzarote				865	0,00				865	0,00	0	0	0	0	0,00
	Fuerteventura				1.670	0,00				1.670	0,00	0	0	0	0	0,00
	ARCHIPIÉLAGO	1.672	27	428	5.379	0,28	1.685	14	2.010	3.799	0,49	13	-13	1.582	-1.580	0,21
<i>Cenchrus ciliaris</i>	Hierro	150	12	1	110	0,51	162		95	16	0,94	12	-12	94	-94	0,43
	Gomera	175	47		150	0,34	222		132	18	0,95	47	-47	132	-132	0,61
	La Palma	78	28		608	0,07	105		290	318	0,55	27	-28	290	-290	0,48
	Tenerife	712	25		1.301	0,34	732	5	221	1.079	0,47	20	-20	221	-222	0,13
	Gran Canaria	574	3	333	665	0,57	71	506		999	-0,28	-503	503	-333	334	-0,85
	Lanzarote	157	15	378	315	0,60	37	136	85	608	-0,02	-120	121	-293	293	-0,62
	Fuerteventura	200		657	813	0,51	33	167	38	1.432	-0,06	-167	167	-619	619	-0,57
	ARCHIPIÉLAGO	2.046	130	1.369	3.962	0,44	1.362	814	861	4.470	0,19	-684	684	-508	508	-0,25
<i>Aristida adscensionis</i>	Hierro	199		54	20	0,93	199		74		1,00	0	0	20	-20	0,07
	Gomera	253		88	30	0,92	253		119		1,00	0	0	31	-30	0,08
	La Palma	321		123	269	0,62	321		294	99	0,86	0	0	171	-170	0,24
	Tenerife	883		381	773	0,62	883		754	401	0,80	0	0	373	-372	0,18
	Gran Canaria			746	830	0,47			902	674	0,57	0	0	156	-156	0,10
	Lanzarote				865	0,00				865	0,00	0	0	0	0	0,00
	Fuerteventura				1.670	0,00				1.670	0,00	0	0	0	0	0,00
	ARCHIPIÉLAGO	1.656	0	1.392	4.457	0,41	1.656	0	2.143	3.709	0,51	0	0	751	-748	0,10
<i>Cenchrus setaceus</i>	Hierro	206		61	6	0,98	206		67		1,00	0	0	6	-6	0,02
	Gomera	231		103	39	0,90	231		141		1,00	0	0	38	-39	0,10
	La Palma	320		163	230	0,68	320		338	55	0,92	0	0	175	-175	0,25
	Tenerife	992	6	255	784	0,61	998		586	454	0,78	6	-6	331	-330	0,17
	Gran Canaria	275		874	427	0,73	258	17	710	592	0,60	-17	17	-164	165	-0,13
	Lanzarote	5	1	107	753	0,13	2	3	394	466	0,45	-3	2	287	-287	0,33
	Fuerteventura	40		97	1.532	0,08	35	5	645	984	0,40	-5	5	548	-548	0,32
	ARCHIPIÉLAGO	2.069	7	1.660	3.771	0,50	2.050	25	2.881	2.551	0,65	-19	18	1.221	-1.220	0,16

Tabla 2. Efecto del cambio climático sobre las especies en los escenarios SSP1-2.6, SSP5-8.5 y diferencia entre ambos escenarios. Se expresa el área de permanencia (P), retracción (R), expansión (E), ausencia (A) e índice de efecto del cambio climático (EF_CC). Las áreas se expresan en km². Valores positivos de EF_CC representan un efecto positivo del cambio climático sobre las especies y valores negativos representan un efecto negativo.

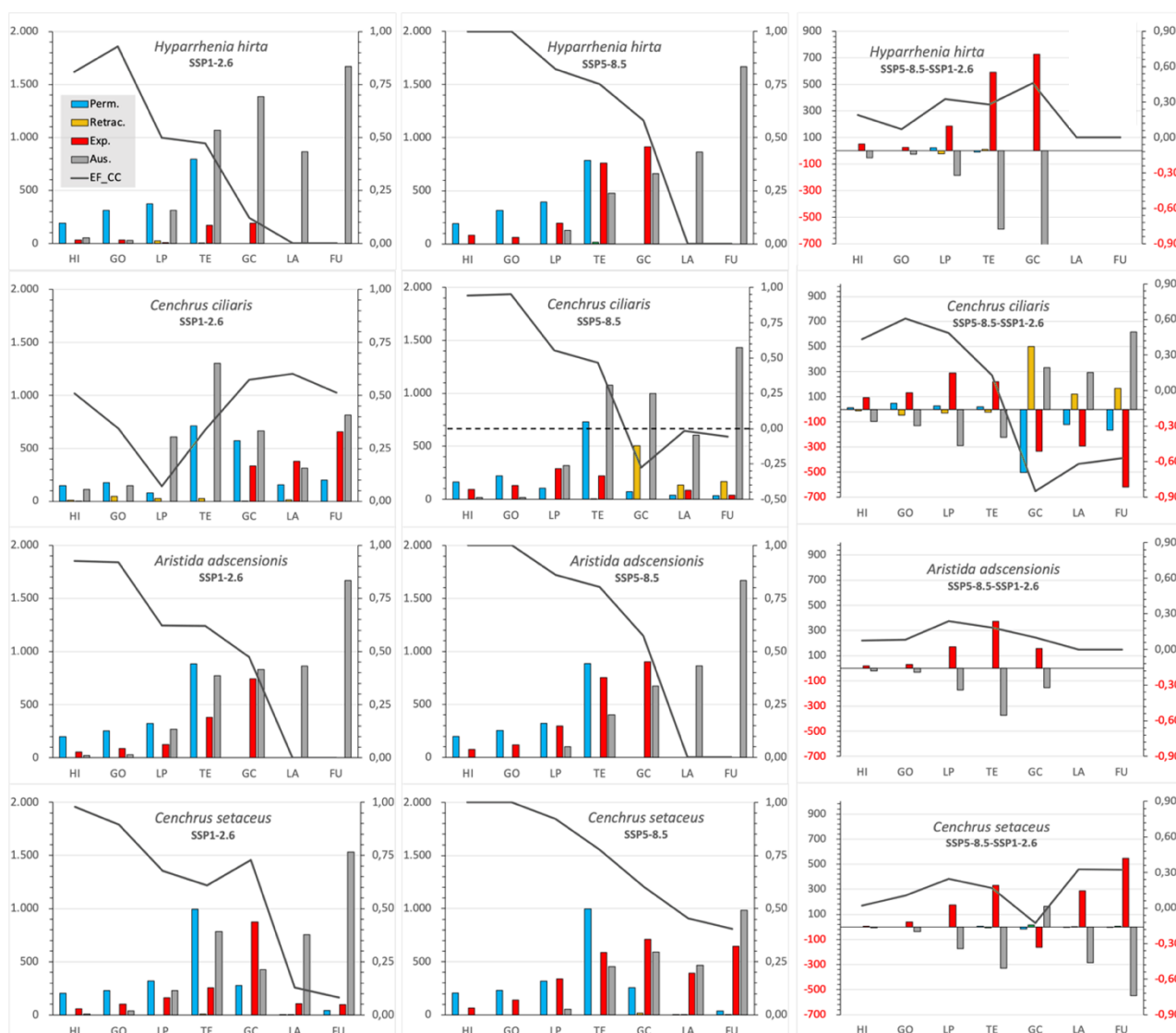


Figura 10. Representación del área de permanencia, retracción, expansión, ausencia e índice de efecto del cambio climático (EF_CC) en el presente y en dos posibles escenarios futuros.

6.7. Competencia entre las especies nativas y la especie invasora

Se ha representado el área de intersección de la distribución potencial de cada especie nativa con la especie invasora en el presente y en los posibles escenarios futuros SSP1-2.6 y SSP5-8.5 (**Figura 11, Figura 12**). En todos los casos, el área de intersección es mayor en los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 que en el presente. Cabe destacar el caso de *Cenchrus ciliaris*, en el que el área de distribución potencial sin intersección con la especie invasora disminuye drásticamente en el escenario SSP5-8.5.

A partir de los valores del área de intersección y el área de distribución potencial sin la intersección de las especies nativas y la especie invasora, se ha calculado un índice

de competencia $\alpha_{n,i}$ para cada especie nativa, en el presente y los dos posibles escenarios futuros (**Tabla 3**). En líneas generales, la especie invasora presenta una competitividad mayor que las nativas y tiende a aumentar su competitividad en los escenarios futuros. En el caso de *C. ciliaris*, la competitividad de la especie nativa es mayor en el presente, mientras que en el futuro la más competitiva es la especie invasora. La especie que sufre un mayor aumento de la competitividad de la especie invasora en los posibles escenarios futuros es *C. ciliaris*, que pasa de tener un valor de $\alpha_{n,i}$ de 0,04 en el presente a -0.06 en el escenario SSP1-2.6 y -0.55 en el escenario SSP5-8.5. La especie que sufre un menor aumento de la competitividad de la especie invasora es *Aristida adscensionis*, que pasa de tener un valor de $\alpha_{n,i}$ de -0,19 en el presente a -0.18 en el escenario SSP1-2.6 y -0.22 en el escenario SSP5-8.5.

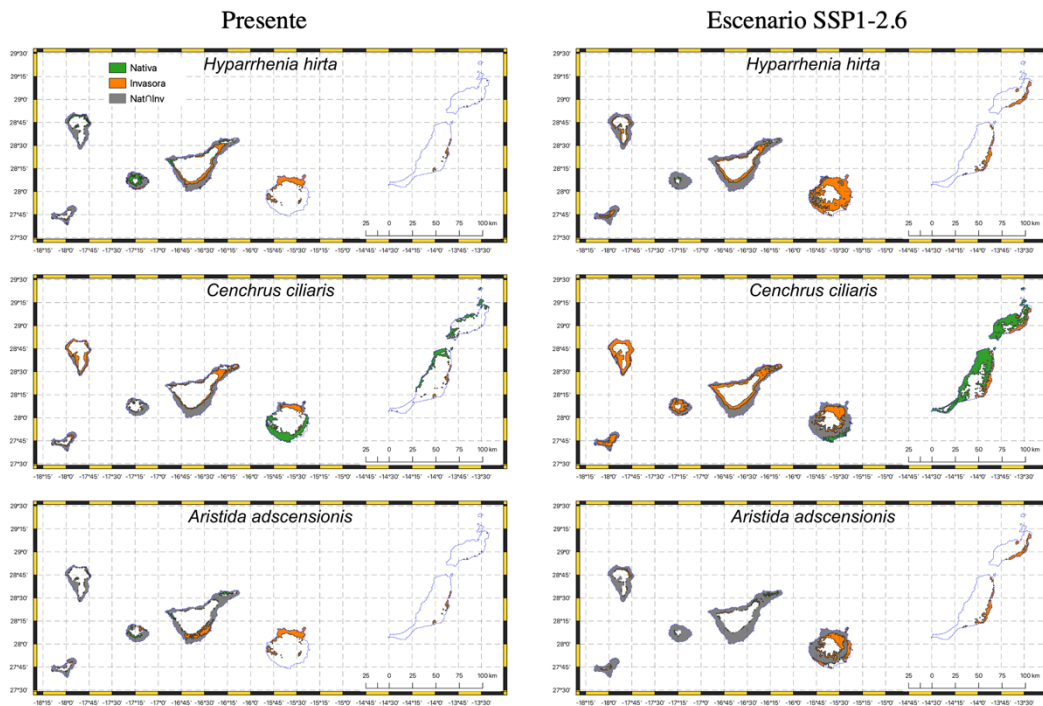


Figura 11. Intersección del área de distribución potencial de las especies nativas con la especie invasora en el presente y en el escenario SSP1-2.6.

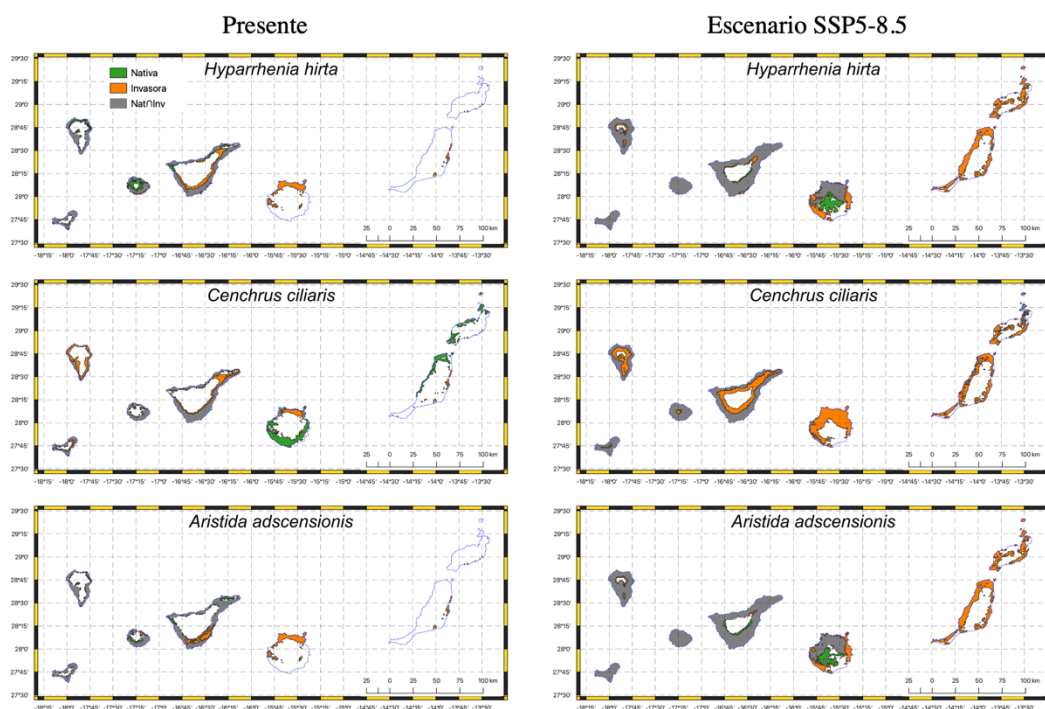


Figura 12. Intersección del área de distribución potencial de las especies nativas con la especie invasora en el presente y en el escenario SSP5-8.5.

	ISLA	PRESENTE			$\alpha_{n,i}$	SSP1-2.6			$\alpha_{n,i}$	SSP5-8.5			$\alpha_{n,i}$
		ADPn	ADPi	ADPn \cap ADPi		ADPn	ADPi	ADPn \cap ADPi		ADPn	ADPi	ADPn \cap ADPi	
<i>Hyparrhenia hirta</i>	Hierro	3	19	187	-0,08	46	222	-0,17			273	0,00	
	Gomera	110	28	203	0,24	16	4	330	0,03		372	0,00	
	La Palma	77	2	318	0,19	105	378	-0,22		71	587	-0,11	
	Tenerife	58	255	743	-0,19	16	297	950	-0,22	34	72	1.511	-0,02
	Gran Canaria		275		-1,00	959	190	-0,83	301	352	615	-0,04	
	Lanzarote		5		-1,00	112		-1,00		396		-1,00	
	Fuerteventura		40		-1,00	137		-1,00		680		-1,00	
	ARCHIPIÉLAGO	248	624	1.451	-0,16	32	1.660	2.070	-0,43	335	1.571	3.358	-0,23
<i>Cenchrus ciliaris</i>	Hierro		44	162	-0,21	116	151	-0,43		16	257	-0,06	
	Gomera	13	22	209	-0,04	159	175	-0,48		18	354	-0,05	
	La Palma		214	105	-0,67	405	78	-0,84		263	395	-0,40	
	Tenerife		261	737	-0,26	535	712	-0,43		631	953	-0,40	
	Gran Canaria	426	123	151	0,43	108	349	800	-0,19	896	71	-0,93	
	Lanzarote	172	5		0,94	530	106	5	0,66	7	282	114	-0,68
	Fuerteventura	200	40		0,67	856	136	2	0,72		609	71	-0,90
	ARCHIPIÉLAGO	811	709	1.364	0,04	1.494	1.806	1.923	-0,06	7	2.715	2.215	-0,55
<i>Aristida adscensionis</i>	Hierro	5	13	193	-0,04		14	253	-0,05		273	0,00	
	Gomera	42	19	212	0,08	8		333	0,02		372	0,00	
	La Palma	25	24	296	0,00	1	40	443	-0,08		44	615	-0,07
	Tenerife	56	171	827	-0,11	48	31	1.216	0,01	71	18	1.566	0,03
	Gran Canaria		275		-1,00	12	415	734	-0,35	251	316	652	-0,05
	Lanzarote		5		-1,00	112		-1,00		396		-1,00	
	Fuerteventura		40		-1,00	137		-1,00		680		-1,00	
	ARCHIPIÉLAGO	128	547	1.528	-0,19	69	749	2.979	-0,18	322	1.454	3.478	-0,22

Tabla 3. Competencia de las especies en el presente y los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5. ADPn indica el área de distribución potencial de la especie nativa sin la intersección con la especie invasora, ADPi representa el área de distribución potencial de la especie invasora sin la intersección con la especie nativa, ADPn \cap ADPi indica el área de intersección entre la especie nativa y la invasora y $\alpha_{n,i}$ es el índice de competencia entre la especie nativa y la invasora. Los valores de $\alpha_{n,i}$ positivos indican que la especie nativa es más competitiva que la invasora y los negativos que la especie invasora es más competitiva que la nativa.

7. Discusión

Con el fin de analizar el efecto del cambio climático sobre tres especies nativas en las Islas Canarias, se ha modelado su nicho ecológico y calculado el área de distribución potencial, para ellas y una especie invasora alóctona.

Tras analizar los resultados, se ha obtenido que el algoritmo utilizado tiene la suficiente capacidad predictiva para ser utilizado en aplicaciones prácticas, ya que el valor de AUC para los puntos de entrenamiento no ha sido en ninguna de las aplicaciones del algoritmo inferior a 0,7 (Wang *et al.*, 2017). Entre las variables bioclimáticas seleccionadas, las que mayor contribución han tenido en el modelo de nicho son la Oscilación térmica anual (BIO07) y la Precipitación de mes más húmedo (BIO13). Es decir, son las variables que limitan en mayor medida la distribución de las especies. Además, encontramos que uno de los factores fisiológicos más distintivos de la especie invasora *Cenchrus setaceus*, y que la diferencia de las especies nativas estudiadas, es su capacidad reguladora del contenido hídrico (González-Rodríguez *et al.*, 2010), por lo que podría explicarse un menor impacto en su distribución debido a variaciones de la variable BIO13.

Todas las especies de estudio, tanto nativas como invasora, han visto incrementada su área de distribución con el cambio climático. Como cabía esperar, este incremento ha sido mayor para *C. setaceus* que para el resto de las especies, ya que presenta características fisiológicas y fenológicas que la hacen muy competitiva en contexto de cambio climático (**Tabla 4**). A diferencia de *C. setaceus*, las especies nativas sí presentan variaciones en su contenido relativo de agua a lo largo del año, lo que apunta a una menor capacidad de regulación del agua por parte de la planta (González-Rodríguez *et al.*, 2010). Además, el inicio del crecimiento de la hoja es algo más temprano para *C. setaceus*, iniciando en septiembre, y podría estar relacionado con una menor necesidad de agua para crecer y, de nuevo, a una posible mejor gestión de esta (González-Rodríguez *et al.*, 2010). Sin embargo, encontramos que el rango para BIO13 en el que *C. setaceus* tiene mayor probabilidad de estar presente es alto en relación con el resto de las especies (50-100mm), por lo que necesitaría más agua que algunas de las especies nativas para crecer (*Cenchrus ciliaris* e *Hyparrhenia hirta*).

MES	RASGOS COMUNES				ESP. NATIVAS			ESP. INVASORA		
	N	As	Pv,c,b	Inf	Sen	Ch	RWC	Sen	Ch	RWC
ENERO	↑						↓			=
FEBRERO	↑						↑			=
MARZO	↑	↓ Min					↑			=
ABRIL	↑						↑			=
MAYO	↓		X				↑			=
JUNIO	↓	↑ Max			Inicio		↓	Inicio		=
JULIO	↓						↓			=
AGOSTO	↓				Max		↓	Max		=
SEPTIEMBRE	↓				Max		↓		X	=
OCTUBRE	↑			X		X	↓			=
NOVIEMBRE	↑						↓			=
DICIEMBRE	↑						↓			=

N: Contenido en nitrógeno
As: Concentración de azúcares solubles
Pv,c,d: Pico de verdor, ratio de crecimiento y biomasa
Inf: Inicio de producción de inflorescencias
Sen: Senescencia
Ch: Inicio del crecimiento de las hojas
RWC: Contenido relativo de agua

Tabla 4. Ciclo fenológico de *Cenchrus setaceus* y tres especies nativas (*Hyparrhenia hirta*, *Cenchrus ciliaris* y *Aristida adscensionis*). Elaboración propia a partir de González-Rodríguez *et al.*, 2010.

Todas las especies han tenido un efecto del cambio climático similar, siendo este efecto más positivo en el escenario SSP5-8.5 que en el escenario SSP1-2.6 y en ambos casos más positivo que en el presente, exceptuando a la especie *C. ciliaris* que se ha visto más favorecida en el escenario SSP1-2.6. Además, *C. ciliaris* es la especie más afectada por la competencia de *C. setaceus* en el escenario SSP5-8.5. Este comportamiento distintivo podría deberse también al requerimiento hídrico de la especie, puesto que es la especie que tiene probabilidad de estar presente en un rango más pequeño para la variable BIO13, junto con *H. hirta*. Sin embargo, es la especie en los que los valores de BIO13 son más bajos, con un rango de 40 - 65 mm.

En líneas generales, el efecto positivo del cambio climático observado sobre las especies es menor en el caso de las islas orientales que en las islas occidentales. Este dato podría estar relacionado con el régimen hídrico de las islas, ya que son las islas occidentales en las que se registran valores más altos de precipitación a lo largo del año (De Nicolás *et al.*, 2011). En el caso de *C. ciliaris*, se observa un efecto más positivo del cambio climático en el escenario SSP1-2.6 en las islas orientales, lo que podría estar relacionado, de nuevo, con los valores de BIO13 para esta especie. Sin embargo, en el escenario SSP5-8.5 el efecto del cambio climático se vuelve negativo, lo que parece apuntar a una especificidad alta de la especie por un rango concreto de precipitaciones.

Por otro lado, todas las especies de estudio, tanto las nativas como la invasora, son especies generalistas. Un efecto positivo del cambio climático sobre ellas podría traducirse en una expansión de su área de distribución, haciendo que ocupasen zonas pobladas por especies endémicas de distribución reducida. Si esto ocurriese, podrían llegar a verse amenazadas otras especies nativas de interés, con unos requerimientos ambientales más específicos.

Además, dos de las especies nativas estudiadas en este trabajo son consideradas especies invasoras en otras zonas del mundo (Chejara *et al.*, 2010; Marshall *et al.*, 2012; McArdle *et al.*, 2004). *H. hirta* se ha convertido en una gran invasora en Australia, entre otras (Chejara *et al.*, 2010), mientras que *C. ciliaris* se ha extendido rápidamente por Estados Unidos, Australia, Méjico y diferentes países de Sudamérica (Marshall *et al.*, 2012). Su expansión podría afectar a las especies nativas de aquellos lugares donde son consideradas invasoras y sería de especial interés analizar su posible expansión en contexto de cambio climático en estas zonas.

En cuanto a los resultados obtenidos en este trabajo, cabe destacar que no son un reflejo fidedigno de lo que sucederá en el futuro, puesto que son proyecciones de situaciones futuras, partiendo de una serie de premisas sobre datos climáticos y la relación de dependencia de las especies con los mismos. Existen diferentes métodos y algoritmos para generar modelos de nicho ecológico y las proyecciones sobre el clima pueden diferir según las medidas que se tomen para mitigar el cambio climático, por lo que el grado de incertidumbre con el que se trabaja es alto. Sin embargo, este método es también una herramienta efectiva para predecir la distribución potencial de especies con volúmenes de datos no muy elevados (Phillips *et al.*, 2004) y es ampliamente utilizada para el desarrollo de planes de gestión ambiental (Gobierno de España, 2019). Por ello, a pesar de sus limitaciones, se trata de una herramienta muy potente y con un gran potencial para su aplicación en un contexto de cambio climático cada vez más evidente.

8. Conclusiones

1) En contexto de cambio climático, el archipiélago canario presenta unas condiciones óptimas para la expansión de la especie invasora *Cenchrus setaceus*. Posiblemente por su capacidad para regular el contenido hídrico, se ve especialmente favorecida en los escenarios futuros de cambio climático planteados.

2) De todas las especies estudiadas, *Cenchrus ciliaris* es la especie que, según los resultados obtenidos, se vería más afectada por la competencia con la especie invasora en los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5, por lo que se aconseja poner el foco en la interacción entre *C. setaceus* y *C. ciliaris*.

3) En cuanto al resto de las especies, se espera que el efecto del cambio climático en las islas orientales favorezca en menor medida su expansión que en las islas occidentales.

4) Las especies nativas estudiadas están ampliamente distribuidas en otros continentes y su expansión podría perjudicar a las poblaciones de especies nativas. Por ello, se sugiere continuar el estudio de su expansión en aquellos lugares donde supone un riesgo para la biodiversidad nativa.

5) Los resultados de este trabajo no son, en ningún caso, una representación fiel de los que sucederá en el futuro, puesto que son predicciones basadas en unas condiciones climáticas que no se pueden conocer a ciencia cierta. Sin embargo, pueden ser de gran utilidad para conocer la distribución probable de las especies bajo las premisas tomadas en consideración y son una herramienta de apoyo eficaz para desarrollar planes de conservación.

8. Conclusions

1) In the context of climate change, the Canary Islands present optimal conditions for the expansion of the invasive species *Cenchrus setaceus*. Possibly due to its capacity to regulate water content, it is particularly favored in the projected future scenarios of climate change.

2) Among all the studied species, *Cenchrus ciliaris* is the species that, according to the obtained results, would be most affected by competition with the invasive species in the SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios, thus emphasizing the need to focus on the interaction between *C. setaceus* and *C. ciliaris*.

3) As for the rest of the species, it is expected that the effect of climate change on the eastern islands will favor their expansion to a lesser extent compared to the western islands.

4) The native species studied are widely distributed in other continents, and their expansion could harm native species populations. Therefore, it is suggested to further explore their expansion in those areas where it poses a risk to native biodiversity.

5) The results of this study are not, under any circumstances, an exact representation of what will happen in the future, as they are predictions based on climatic conditions that cannot be known with certainty. However, they can be highly useful in understanding the probable distribution of species under the premises taken into consideration and serve as an effective supporting tool for developing conservation plans.

9. Bibliografía

- Barton, E. D., Arístegui, J., Tett, P., Cantón, M., García-Braun, J., *et al.* 1998. The transition zone of the Canary Current upwelling region. *Progress in Oceanography* **41(4)**: 455-504.
- Bella, S. y D'Urso, V. 2012. First record in the Mediterranean basin of the alien leafhopper *Balclutha brevis* living on invasive *Pennisetum setaceum*. *Bulletin of Insectology* **65**:195-198.
- Chejara, V. K., Kriticós, D. J., Kristiansen, P., Sindel, B. M., Whalley, R. D. B., *et al.* 2010. The current and future potential geographical distribution of *Hyparrhenia hirta*. *Weed Research* **50**:174-184.
- De Nicolás, J. P., Ferrer, F., Cabrera, P. G. 2011. Características básicas de clima de Canarias, p. 165-186. *En*: Instituto Tecnológico de Canarias, S. A. (ITC). Sostenibilidad energética de la edificación en Canarias: Manual de Diseño. ITC, Las Palmas de Gran Canaria.
- De Nicolás, J. P., Ferrer, F., García, A. 2011. Condiciones climáticas generales, p. 186-206. *En*: Instituto Tecnológico de Canarias, S. A. (ITC). Sostenibilidad energética de la edificación en Canarias: Manual de Diseño. ITC, Las Palmas de Gran Canaria.
- Del Arco, M. J., Wildpret, W., Pérez, P. L., Rodríguez, O., Acebes, J. R., *et al.* 2006. Mapa de Vegetación de Canarias. GRAFCAN, Santa Cruz de Tenerife.
- Felicísimo, Á. M. 2011. Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático de la biodiversidad española: Flora y vegetación. Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid.
- Fick, S. E. y Hijmans, R. J. 2017. WorldClim 2: new 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* **37 (12)**: 4302-4315.
- Font, I. 1956. El tiempo atmosférico en las Islas Canarias. Servicio Meteorológico Nacional, Madrid.
- Gobierno de España, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente 2013. Catálogo Español de Especies Exóticas Invasoras. PENSET/EEI/FL001.
- Gobierno de España, Ministerio para la Transición Ecológica 2019. Diagnóstico de Riesgos y Vulnerabilidades y Adaptación al Cambio Climático en la Isla de Gran Canaria. Inventario de Vulnerabilidad y Riesgos de la Biodiversidad de Gran Canaria Frente al Cambio Climático. Especies Exóticas Invasoras e Incendios Forestales.
- González-Rodríguez, A. M., Baruch, Z., Palomo, D., Cruz-Trujillo, G., Jiménez, M. S., *et al.* 2010. Ecophysiology of the invader *Pennisetum setaceum* and three native grasses in the Canary Islands. *Acta Oecologica* **36.2**: 248-254.
- Herrera, R. G., Puyol, D. G., Martín, E. H., Presa, L. G. y Rodríguez, P. R. 2001. Influence of the North Atlantic oscillation on the Canary Islands precipitation. *J. Clim* **14**: 3889-3903.
- IPCC 2021. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: 3-32.
- IPCC 2022. Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA: 3-33.
- Jiménez-Valverde, A., Lobo, J. M. y Hortal, J. 2008. Not as good as they seem: the importance of concepts in species distribution modelling. *Diversity and Distributions* **14(6)**:885-890.
- Marshall, V., Lewis, M. P. y Ostendorf, B. 2012. Buffel grass (*Cenchrus ciliaris*) as an invader and threat to biodiversity in arid environments: A review. *Journal of Arid Environments* **78**:1-12.
- Martín, J.L., García, H., Redondo, C.E., García, I. y Carralero, I. 1995. La red canaria de espacios naturales protegidos. Viceconsejería de Medio Ambiente del Gobierno de Canarias, Santa Cruz de Tenerife.
- Marzol, M. V. y Máyer, P. 2012. Algunas reflexiones acerca del clima de las Islas Canarias. *Nimbus* **29-30(29)**: 399-416.
- McArdle, S. L., Nadolny, C. y Sindel, B. M. 2004. Invasion of native vegetation by Coolatai Grass *Hyparrhenia hirta*: impacts on native vegetation and management implications. *Pacific Conservation Biology* **10(1)**:49.
- Naimi, B., Hamm, N., Groen, T. A., Skidmore, A. K. y Toxopeus, A. G. 2014. Where is positional uncertainty a problem for species distribution modelling? *Ecography* **37(2)**: 191-203.

- Norder, S. J., De Lima, R. F., De Nascimento, L., Lim, J. Y., Fernández-Palacios, J. M., et al.** 2020. Global change in microcosms: Environmental and societal predictors of land cover change on the Atlantic Ocean Islands. *Anthropocene* **30**: 100242.
- Phillips, S. J., Dudík, M. y Schapire, R.E.** 2023. Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.4).
- Phillips, S., Dudík, M. y Schapire, R. E.** 2004. A maximum entropy approach to species distribution modeling. Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning. ACM Press: 472-486.
- Powers, D. M.** 2011. Evaluation: from precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness and correlation. *Journal of Machine Learning Technologies* **2(1)**:37-63.
- QGIS Development Team** 2021. QGIS Geographic Information System. Version 3.28.3 - Firenze.
- Reaser, J., Meyerson, L., Cronk, Q., De Poorter, M., Eldrege, L., et al.** 2007. Ecological and socioeconomic impacts of invasive alien species in island ecosystems. *Environmental Conservation* **34**: 98-111.
- Rodríguez, O., García, A. y Ges Plan S.A.U.** 2009. *Pennisetum setaceum* (Forssk.) Chiov. *En: Ojeda, E. y Rodríguez, J. L., Compendio de fichas de la Base de especies introducidas en Canarias (2008-2011).* Gobierno de Canarias.
- Sayre, R., Noble, S., Hamann, S., Smith, R., Wright, D., et al.** 2019. A new 30 meter resolution global shoreline vector and associated global islands database for the development of standardized ecological coastal units. *Journal of Operational Oceanography* **12(sup2)**: S47-S56.
- Tershry, B. R., Shen, K. W., Newton, K. M., Holmes, N. D. y Croll, D. A.** 2015. The importance of islands for the protection of biological and linguistic diversity. *Bioscience* **65(6)**: 592-597.
- Wang, B., Xu, Y., y Ran, J.** 2017. Predicting suitable habitat of the Chinese monal (*Lophophorus lhuysii*) using ecological niche modeling in the Qionglai Mountains, China. *PeerJ* **5**: e3477.
- Whittaker, R. J., Fernández-Palacios, J. M., Matthews, T. J., Borregaard, M. K. y Triantis, K. A.** 2017. Island biogeography: taking the long view of nature's laboratories. *Science* **357(6354)**: eaam8326.