



SDMs, HERRAMIENTA PARA LA CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD EN CIUDADES

Caso de Estudio: *Ponte Verde de Queluz* (Sintra, Portugal)

SDMs, A TOOL FOR BIODIVERSITY CONSERVATION IN CITIES

Case Study: *Ponte Verde de Queluz* (Sintra, Portugal)

Alejandra M. Orozco-Meza y Jorge M. Frazão-Cancela

Doutoramento em Urbanismo, Faculdade de Arquitetura, Universidade de Lisboa, Portugal.

alejandra.orozco@endemica.cr; cancela.jorge@gmail.com

RESUMEN

En este estudio se explora la aplicabilidad de los modelos de distribución de especies (SDMs) en el ordenamiento del territorio desde el Proyecto *Ponte Verde de Queluz* en Sintra (Portugal), el cual propone el uso de 17 especies vegetales autóctonas para fomentar la continuidad ecológica. Entre estas especies se encuentra *Cephalanthera longifolia* (L.) Fritsch, objeto de estudio de este artículo científico. La cartografía resultante destaca las zonas que podrían ser reconocidas como refugios climáticos de retención y desplazamiento en dos escenarios de cambio climático (SSP2-4.5 y SSP5-8.5). En conclusión, este estudio proporciona una metodología replicable y escalable, útil y de fácil comprensión para la conservación y restauración de la biodiversidad en las ciudades, con implicaciones prácticas importantes para el ordenamiento del territorio y gestión urbana en la identificación y la optimización de refugios climáticos urbanos y establecimiento de corredores climáticos urbanos.

Palabras clave: distribución de especies, *Cephalanthera longifolia*, cambio climático, restauración ecológica

Bloque temático: 2. Ciudad y Ambiente

Tema: 1. Ambiente, paisaje, resiliencia y alteraciones climáticas.

ABSTRACT

This study explores the applicability of species distribution models (SDMs) in land use planning through the *Ponte Verde de Queluz* project, Sintra (Portugal), which proposes the use of 17 native plant species to promote ecological continuity. Among these species is *Cephalanthera longifolia* (L.) Fritsch, the focus of this scientific article. The resulting cartography highlights areas that could be recognized as climate refugia for retention and displacement under two climate change scenarios (SSP2-4.5 and SSP5-8.5). In conclusion, this study provides a replicable and scalable methodology, useful and easy to understand for the conservation and restoration of biodiversity in cities, with important practical implications for land use planning and urban management in identifying and optimizing urban climate refugia and establishing urban climate corridors.

Keywords: species distribution, *Cephalanthera longifolia*, climate change, ecological restoration

Thematic clusters: 2. City and Environment

Topic: 1. Environment, landscape, resilience, and climate change.

1. INTRODUCCIÓN

Según el artículo 2.1 del Decreto de Ley nº 205/2012, *Parque de Sintra-Montes da Lua*, S.A. (PSML) fue designada para la explotación del Palacio Nacional de Queluz (PNQ) (Portugal, 2012). Así mismo, PSML tiene por objetivo la recuperación, revalorización, gestión, explotación y conservación de todas las áreas del PNQ, incluidos los parques y otras zonas circundantes, tal como se establece en el artículo 2.1 del Decreto de Ley nº 215/2000 (Portugal, 2000), cuya redacción fue modificada por el Decreto de Ley nº 205/2012.

Cuando PSML adquirió el patrimonio, se dio cuenta de que, además de la rehabilitación y el mantenimiento del Palacio y sus jardines históricos, era necesario abordar una serie de limitaciones que afectaban a este patrimonio de gran relevancia nacional. Para estudiar y comprender la 'Zona Especial de Protección' del PNQ, PSML encargó el 'Plan Estratégico de Salvaguarda y Valorización del Palacio y su Entorno' para asegurarse de que la rehabilitación del Palacio implicará la regeneración urbana de toda su zona circundante, garantizando así una mayor protección y valorización del Palacio, y, lo que es más importante, promoviendo la mejora de la calidad de vida de los habitantes, (entre otros objetivos) minimizando la fragmentación del territorio generada por la autopista IC19 y promoviendo nuevas accesibilidades (PSML, 2014; Falcão, 2015). Con el fin de abordar este objetivo, *Biodesign Ambiente e Paisagem, Lda.* y *Tetraplano Engenharia, Lda.*, después de ser ganadores en el Concurso Público, realizaron la elaboración del Proyecto *Ponte Verde de Queluz* (PVQ).

El PVQ considera la estrategia del Proyecto *Eixo Verde e Azul* (EVA) que se desarrolla dentro de los *concelhos* de Sintra, Amadora y Oeiras, cuyo objetivo es crear y consolidar un eje ecológico a lo largo del río Jamor, por lo que el PVQ se considera una pieza de movilidad suave, de interconexión cultural y restauración del hábitat, entre los jardines del Palacio y la *Matinha de Queluz* sobre la autopista IC19 (Cancela *et al.*, 2017, 2018, 2019, 2020) (Figura 1). Este proyecto propone el uso de 17 especies vegetales autóctonas para fomentar la continuidad ecológica. Entre estas especies se encuentra *Cephalanthera longifolia* (L.) Fritsch, objeto de estudio de este artículo científico.

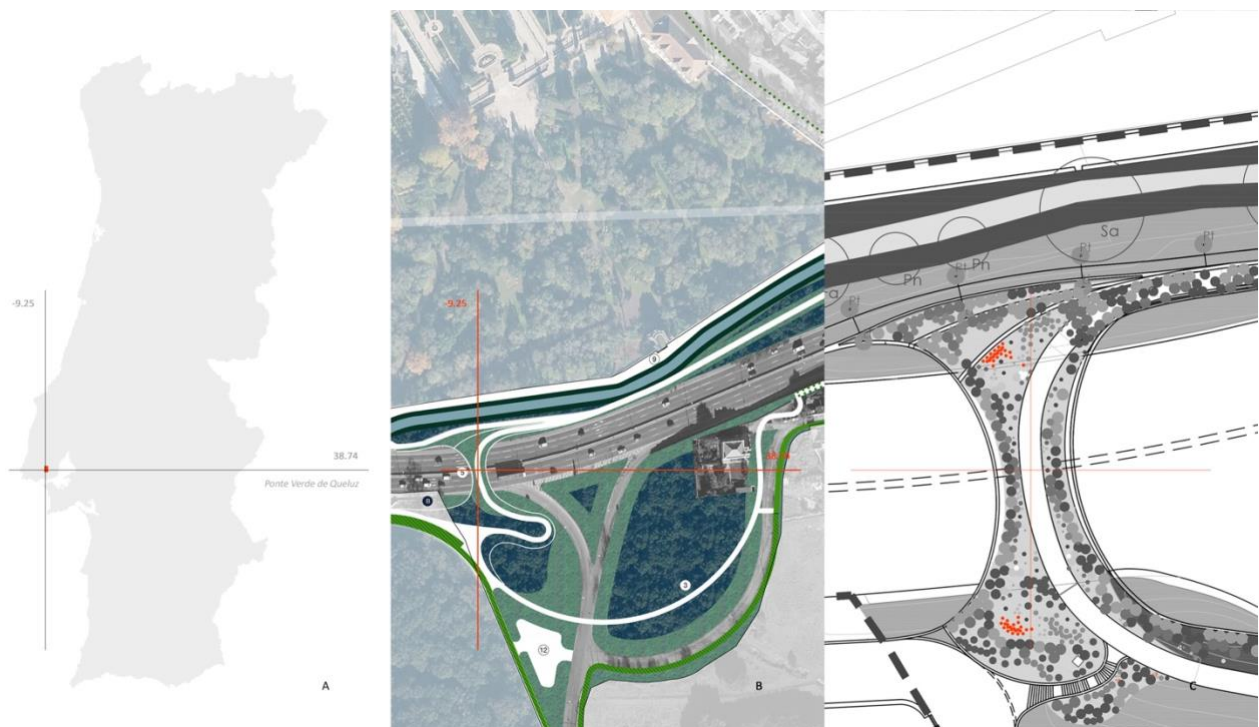


Figura 1. (A) Ubicación PVQ en Portugal continental (Elaboración propia). (B) Plano General PVQ (Cancela *et al.*, 2017). (C) Planta de Plantación y Siembra, puntos de color anaranjado representan la ubicación de *C. longifolia* en el PVQ (Cancela *et al.*, 2020).

El objetivo principal de este estudio es explorar la aplicabilidad de las ciencias geobotánicas al ordenamiento del territorio desde el PVQ. Con base en la elaboración de modelos de distribución de especies (SDMs) (Pacifi *et al.*, 2015), herramienta popular en ecología y conservación de la biodiversidad (Franklin 2010; Peterson *et al.*, 2011; Guisan, Thuiller, y Zimmermann, 2017), y marco de modelado más utilizado en evaluaciones de impacto del cambio global para proyectar los cambios de rango de distribución futuros de especies (IPBES, 2016). Por lo anterior, se explora el uso de esta herramienta en la construcción de cartografía, presentando información espacialmente explícita relativa a la distribución del hábitat de *C. longifolia*, e información sobre los impactos del cambio global y proyecciones posibles de cambios futuros en el área de su distribución para el año 2070, según dos escenarios prioritarios: vías intermedias y un desarrollo rico en combustibles fósiles. Por último, se captura la información de los SDMs para Portugal continental, la Cuenca Hidrográfica Río Jamor (CH Río Jamor), el PVQ, la *Matinha de Queluz*, y los *concelhos* de Sintra, Amadora y Oeiras.

Los resultados obtenidos permiten visualizar la distribución de *C. longifolia*, lo que refuerza y aumenta los conocimientos de campo compilados. Estos resultados son útiles para orientar el esfuerzo a la conservación y restauración del paisaje a través del EVA y en el PVQ. La cartografía producida no solo facilita parte de la interpretación y descripción del hábitat actual de la especie, sino que también evidencia áreas donde se mantendrá, y también, otras donde habrá un incremento de los hábitats futuros. Estas áreas podrían ser reconocidas como refugios climáticos de retención y desplazamiento (Araújo *et al.*, 2022) de *C. longifolia* que permitan su persistencia en contextos de cambios climáticos.

En conclusión, este estudio proporciona una metodología replicable y escalable, útil y de fácil comprensión para la conservación y restauración de la biodiversidad en las ciudades, con implicaciones prácticas importantes para el ordenamiento del territorio y gestión urbana.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Localización de las especies

La información de ocurrencia de *C. longifolia* durante el periodo de 1885-2022 se obtuvo de la plataforma *Global Biodiversity Information Facility* (GBIF) en una resolución de grados decimales (GBIF, 2023) (Figura 2). Únicamente se utilizaron conjuntos de datos de presencia validados por especialistas, omitiendo los registros de ciencia ciudadana para reducir cualquier sesgo de muestreo.

2.2 Variables medioambientales

Para capturar la información del hábitat de distribución actual en los SDMs, se obtuvieron los siguientes datos medioambientales: (a) datos de elevación, pendiente y orientación de *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) (Farr *et al.*, 2007); (b) 19 variables bioclimáticas de *WorldClim BIO Variables V1*, derivadas de temperaturas y precipitaciones estacionales, mensuales y anuales (Hijmans *et al.*, 2005); (c) variable de precipitación con datos de estaciones *in situ* de *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data* (CHIRPS) (Funk *et al.*, 2015); (d) diez variables medioambientales relacionadas con la cobertura terrestre de *Copernicus Global Land Cover Layers* (CGLS-LC100 Collection 3) (Buchhorn *et al.*, 2020); (e) siete variables medioambientales relacionadas con la cobertura terrestre y los factores biogeoquímicos de *Terra and Aqua combined Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) *Land Cover Type* (MCD12Q1) (Friedl y Sulla-Menashe, 2019); (f) tres índices de vegetación de *Suomi National Polar-Orbiting Partnership* (S-NPP) *NASA Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (VIIRS) *Vegetation Indices* (VNP13A1) (Didan y Barreto, 2018); y (g) una medida acumulativa de la modificación humana de la cobertura terrestre de *global Human Modification* (gHM) (Kennedy *et al.*, 2019).

En la Tabla 1 se presenta una visión completa e información detallada sobre cada variable, resolución espacial y disponibilidad temporal. Las 44 variables medioambientales se recortaron para el área del territorio continental portugués y se re-proyectaron al conjunto de datos CGLS-LC100 *Collection 3*, excluyendo las variables de elevación, pendiente y orientación.

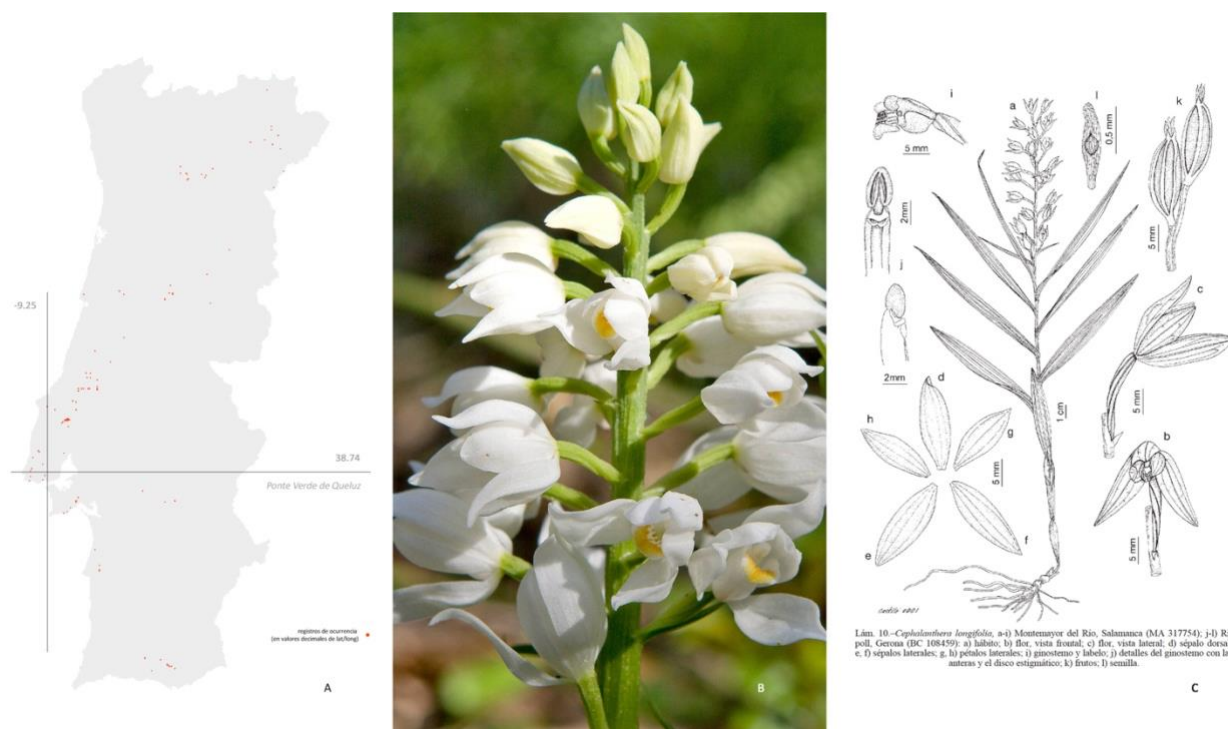


Figura 2. (A) Puntos de color anaranjado representan registros de ocurrencia de *C. longifolia* en Portugal continental (Elaboración propia). (B) Fotografía de Miguel Porto. (C) Descripción botánica (Alarcón y Aedo, 2002).

2.3 Escenarios de cambio climático del CMIP6: histórico, SSP2-4.5 y SSP5-8.5

Para predecir los hábitats de distribución de *C. longifolia* en la actualidad y en el año 2070, se utilizaron datos del Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (AR6 IPCC), que se obtuvieron a partir del conjunto de datos *NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Climate Projections* (NEX-GDDP-CMIP6) de Thrasher *et al.* (2012, 2022). Este conjunto de datos está compuesto por escenarios climáticos globales escalados derivados de las simulaciones del Modelo Climático Global (GCM) realizadas en el marco del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 6 (CMIP6), el cual se ha convertido en uno de los elementos fundacionales de la ciencia climática (Eyring *et al.*, 2016). En el GCM CMIP6 se reconoce que los niveles de forzamiento radiativo global pueden alcanzarse mediante diferentes vías de dióxido de carbono (CO₂), gases de efecto invernadero (GEI) distintos del CO₂, aerosoles (Amann *et al.*, 2013; Rao *et al.*, 2017) y uso de la tierra. Por lo tanto, se establece una matriz de niveles de forzamiento global y argumentos socioeconómicos.

El conjunto de Vías Socioeconómicas Compartidas (SSP), es decir, desarrollos socioeconómicos con argumentos relativos (entre otras cosas) al Producto Interno Bruto (PIB), población, urbanización, colaboración económica y proyecciones de desarrollo humano y tecnológico, describen diferentes mundos futuros en ausencia de cambio climático y de políticas climáticas adicionales (O'Neill *et al.*, 2014). El Proyecto de Intercomparación de Modelos de Escenarios (ScenarioMIP) identifica cuatro escenarios prioritarios (nivel 1): SSP1-2.6 para vías sostenibles, SSP2-4.5 para vías intermedias, SSP3-7.0 para rivalidad regional y SSP5-8.5 para un desarrollo rico en combustibles fósiles (O'Neill *et al.*, 2016).

Se seleccionó el escenario histórico, en el cual se designaron ejecuciones retrospectivas del modelo y dos escenarios de cambio climático para tener en cuenta la incertidumbre del futuro: SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Para cada uno de los tres escenarios, se seleccionaron dos GCMs diferentes: el Modelo del Sistema Terrestre Comunitario Versión 2 (CESM2) (Danabasoglu *et al.*, 2020) y el Modelo para la Investigación Interdisciplinaria sobre el Clima 6 (MIROC6) (Tatebe *et al.*, 2019). Utilizando estos modelos se pudieron predecir las condiciones bioclimáticas y SSP tanto del pasado como del futuro, lo que permitió obtener tres conjuntos de condiciones bioclimáticas y SPP previstas para *C. longifolia* (Tabla 2).

	CONJUNTO DE DATOS	VARIABLES MEDIOAMBIENTALES	RESOLUCIÓN ESPACIAL	DISPONIBILIDAD (año-mes-día)
a	SRTM	(1) Elevación, (2) Pendiente y (3) Orientación	30 metros	2000-02-11 al 2000-02-22
b	WorldClim BIO Variables V1	(4) Temperatura media anual, (5) Rango diurno medio temp max/min, (6) Isotermia bio02/bio07, (7) Estacionalidad de la temperatura, (8) Temperatura máxima del mes más cálido, (9) Temperatura mínima del mes más frío, (10) Rango anual de temperatura bio05/bio06, (11) Temperatura media del trimestre más húmedo, (12) Temperatura media del trimestre más seco, (13) Temperatura media del trimestre más cálido, (14) Temperatura media del trimestre más frío, (15) Precipitación anual, (16) Precipitación del mes más húmedo, (17) Precipitación del mes más seco, (18) Estacionalidad de las precipitaciones, (19) Precipitación del trimestre más húmedo, (20) Precipitación del trimestre más seco, (21) Precipitación del trimestre más cálido y (22) Precipitación del trimestre más frío	1,000 metros	1960-01-01 al 1991-01-01
c	CHIRPS	(23) Precipitación mensual	5,566 metros	1991-01-01 al 2023-01-01
d	CGLS-LC100 Collection 3	(24) Clasificación de la Cobertura Terrestre (25) Tipo de bosque, (26) Bosque ralo, (27) Cultivos, (28) Hierba, (29) Arbusto, (30) Árbol, (31) Urbano, (32) Agua permanente y (33) Agua estacional	100 metros	2015-01-01 al 2019-12-31
e	MCD12Q1.061 MODIS	(34) Tipo 1: Clasificación anual del Programa Internacional Geosfera-Biosfera (IGBP), (35) Tipo 3: Clasificación del índice anual de superficie foliar (LAI), (36) Tipo 4: Clasificación anual BIOME-Ciclos biogeoquímicos (BGC) y (37) Tipo 5: Clasificación de los tipos funcionales de plantas anuales (38) Capa de la tierra FAO LCCS1, (39) FAO-LCCS2 Capa del uso de la tierra, (40) LCCS3 Capa de la hidrología de la superficie	500 metros	2001-01-01 al 2023-01-01
f	VNP13A1: VIIRS	(41) Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), (42) Índice de Vegetación Mejorado (EVI) y (43) Índice de Vegetación Mejorado-2 (EVI2)	500 metros	2012-01-17 al 2023-01-01
g	gHM	(44) Se mapearon cinco factores de estrés antropogénicos principales, utilizando 13 conjuntos de datos individuales: - Asentamientos humanos (densidad de población, zonas edificadas), - Agricultura (tierras de cultivo, ganado), - Transporte (carreteras principales, secundarias y de dos vías; ferrocarriles), - Minería y producción de energía, e - Infraestructuras eléctricas (tendidos eléctricos, iluminación nocturna)	1 000 metros	2016-01-01 al 2016-12-31

Tabla 1. Conjunto de datos con sus variables medioambientales, resolución espacial, y disponibilidad temporal.

CONJUNTO DE DATOS	VARIABLES MEDIOAMBIENTALES	MCG	ESCENARIO	RESOLUCIÓN ESPACIAL	DISPONIBILIDAD (año-mes-día)
NEX-GDDP-CMIP6	(1) Temperatura, (2) Temperatura mínima, (3) Temperatura máxima, (4) Precipitaciones, (5) Humedad relativa, (6) Humedad específica, (7) Radiación de onda larga, (8) Radiación de onda corta, y (9) Velocidad del viento.	CESM2	histórico	27,830 metros	1981-01-01 al 2015-01-01
			SSP2-4.5		2061-01-01 al 2080-01-01
			SSP5-8.5		2061-01-01 al 2080-01-01
		MIROC6	histórico		1981-01-01 al 2015-01-01
			SSP2-4.5		2061-01-01 al 2080-01-01
			SSP5-8.5		2061-01-01 al 2080-01-01

Tabla 2. Conjunto de datos NEX-GDDP-CMIP6 con sus variables medioambientales, MCGs, escenarios seleccionados, resolución espacial y disponibilidad de variables medioambientales.

2.4 Modelización de la distribución de la especie

La modelización de la distribución de *C. longifolia* se llevó a cabo utilizando la plataforma *Google Earth Engine* (GEE) versión 1.0.0. Esta plataforma ofrece acceso a un catálogo de datos de varios *petabytes* para análisis geoespaciales a través de una interfaz de programación de aplicaciones (API) y un entorno de desarrollo interactivo (IDE), que permiten la creación rápida de prototipos y la visualización de resultados (Gorelick *et al.*, 2017). Los códigos desarrollados y datos seleccionados siguen, en gran medida, las indicaciones generales de Zhu *et al.* (2022), White (2021) y Zurell (2020); y de forma complementaria, las de OpenAI (2023) y Gandhi (2020), adaptadas al presente caso de estudio.

Se construyeron los modelos SDMs actual y futuros para *C. longifolia* utilizando dos algoritmos de aprendizaje automático: MaxEnt (versión 3.4.1) y *Random Forest* (versión Library Smile 1.5.3). El algoritmo MaxEnt es un modelo de máxima entropía que utiliza datos de presencia únicamente para modelar las distribuciones geográficas de las especies. La salida por defecto de los modelos MaxEnt es logística, lo cual es más fácil de conceptualizar, proporciona un estimado entre cero y uno de probabilidad de presencia, esta salida logística estima la probabilidad de presencia asumiendo que el diseño de muestreo es tal que las localidades de presencia típicas tienen una probabilidad de presencia de alrededor de 0.5 (Phillips *s.f.*). El algoritmo *Random Forest* (RF) es una combinación de una serie de clasificadores de estructura de árbol. Consta de muchos árboles de decisión que generan el voto mayoritario de los árboles individuales, y combina la idea de *bagging* y la selección aleatoria de características (Liu *et al.*, 2012). *Bagging* significa *bootstrap aggregation* (Zurell, 2020), es un método que proporciona una forma computacional directa de evaluar la incertidumbre, mediante la muestra de los datos de entrenamiento (Hastie, Tibshirani y Friedman, 2009). RF es muy popular, funciona extraordinariamente bien y requiere muy pocos ajustes (Hastie, Tibshirani y Friedman, 2009).

Se seleccionaron 31 variables medioambientales para los análisis. El coeficiente de correlación de Pearson entre las variables siguientes es $|r| < 0.8$, por lo que no hay problemas de multicolinealidad (Dormann *et al.*, 2013): Elevación (m), Pendiente (%), Orientación (°), Temperatura media anual (°C), Rango diurno medio temperatura max/min (°C), Isotermia bio02/bio07 (%), Estacionalidad de la temperatura (°C), Temperatura máxima del mes más cálido (°C), Precipitación anual (mm), Estacionalidad de las precipitaciones (CV), Precipitación mensual (datos de estaciones *in situ*) (mm/pentad), Clasificación de la Cobertura Terrestre, Tipo de bosque, Bosque ralo (%), Cultivos (%), Hierbas (%), Arbustos (%), Árbol (%), Urbano (%), Agua permanente (%), Agua estacional (%), IGBP, LAI, BGC, FAO LCCS1, NDVI, EVI2, gHM (km²). No obstante, se adicionan tres variables de alta correlación $|r| > 0.9$: Clasificación de los tipos funcionales de plantas anuales entre BGC, debido a que se pueden utilizar para analizar diferentes aspectos de la vegetación en un área determinada, y FAO-LCCS2 y LCCS3 entre FAO LCCS1, debido a que proporcionan información detallada sobre la forma en que se utiliza y se gestiona la cobertura terrestre.

El hábitat actual de *C. longifolia* se estimó utilizando las condiciones climáticas del escenario histórico. Para los hábitats futuros, se utilizaron las condiciones climáticas de dos escenarios de cambio climático (SSP2-4.5 y SSP5-8.5), los cuales incluyen descriptores de forzamiento climático relacionados con la cobertura terrestre e impactos antropogénicos, como patrones de cambio y gestión del uso del suelo, así como datos de cambio de uso y cobertura de tierras a nivel global (Hurtt *et al.*, 2020; Ma *et al.*, 2020). De las 31 variables ambientales previamente seleccionadas, solo se utilizaron variables bioclimáticas y variables medioambientales relacionadas con la cobertura terrestre y factores biogeoquímicos para los escenarios futuros, ya que no están disponibles NDVI y EVI2 para los mismos.

2.5 Evaluación de modelo

En los modelos MaxEnt, el 75% de los registros de presencia se asignaron aleatoriamente al conjunto de datos de entrenamiento y el 25% al conjunto de datos de prueba. La precisión predictiva de los modelos MaxEnt se evaluó mediante la puntuación AUC media (área bajo la curva de operación del receptor ROC, media \pm SD). Esta medida es la auténtica prueba de la capacidad que tienen los modelos de predecir (Phillips *et al.*, 2006). En los modelos RFs, el 80% de los registros de presencia se asignaron aleatoriamente al conjunto de datos de entrenamiento y el 20% al conjunto de datos de prueba. Para evaluar la precisión predictiva para los clasificadores de los modelos RFs, se utilizó primero la muestra de entrenamiento para generar la matriz de confusión y segundo los datos de prueba para generar la matriz de error, la precisión global, el coeficiente Kappa (κ), la precisión del productor y la precisión del consumidor (Wu, 2020; White, 2021).

En ambos modelos, se estimaron la importancia de las variables mediante un procedimiento de permutación, *Mean Decrease Accuracy* (%IncMSE), que mide la caída de la precisión media para cada variable cuando se permuta. Además, se utilizó la importancia en el índice de división de Gini, *Mean Decrease Gini* (IncNodePurity), que calcula las divisiones en los árboles para medir la importancia de la variable para el modelo (Hastie, Tibshirani y Friedman, 2009; Zurell, 2020). Se rastrearon las variables que contribuyen en mayor medida al modelo y se eliminaron aquellas que contribuyen menos del 1% al modelo.

2.6 Análisis espacial

Se calculó el promedio de los resultados obtenidos de los dos GCMs, CESM2 y MIROC6, para los escenarios históricos y de SSps, obteniendo una cuadrícula de consenso para los rangos de distribución de los hábitats actuales y futuros previstos para *C. longifolia* en Portugal continental. Se extrajo el valor de idoneidad logístico de la especie para la CH Río Jamor y el PVQ, el cual se calculó como el promedio de las celdas de la cuadrícula correspondientes al punto central del proyecto sobre la autopista IC19 y al punto central de la *Matinha de Queluz*. Se calculó el área dentro del rango modelado donde los valores de idoneidad logística fueron mayores al 0.5 para Portugal continental, la CH Río Jamor y los *concelhos* de Sintra, Amadora y Oeiras. Las estadísticas y visualizaciones de datos se realizaron en GEE y para las diagramaciones se utilizó Adobe Photoshop 2020 (versión 21.0.0).

3. RESULTADOS

3.1 Rangos actuales del hábitat de distribución

Se confirmó el rango actual de distribución de *C. longifolia* en Portugal continental a una resolución espacial de 750 metros para el escenario histórico del CMIP6 (Figura 3, Tabla 3). El modelo identificó un valor de idoneidad logística de 0.57 para la CH Río Jamor y de 0.60 para el PVQ. El área dentro del rango modelado donde los valores de idoneidad logística fueron mayores a 0.5 es de 2,788.47 km² para Portugal continental, 33.41 km² para la CH Río Jamor, y de 156.12 km², 19.44 km² y 32.61 km² para los *concelhos* de Sintra, Amadora y Oeiras, respectivamente. Los puntajes de precisión predictiva de los modelos sugieren que estos modelos proporcionaron predicciones razonables (AUC_{entrenamiento} = 0.8951; AUC_{prueba} = 0.9223; Precisión global = 0.9085).

3.2 Rangos de los hábitats de distribución en 2070, bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5

Los modelos predicen un cambio en el rango de distribución y un aumento de los hábitats adecuados para *C. longifolia* en Portugal continental a una resolución espacial de 750 metros para el año 2070, bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 (Figura 3, Tabla 3). Se pronostica que los valores de idoneidad logística de la especie en la CH Río Jamor (0.57; 0.56) y en el PVQ (0.58; 0.56) no experimentarán cambios significativos en SSP2-4.5 y SSP5-8.5, respectivamente. El área dentro del rango modelado donde los valores de idoneidad logística fueron mayores a 0.5 en SSP2-4.5 es de 2,812.66 km² para Portugal continental, 31.74 km² para la CH Río Jamor, y de 170.90 km², 18.54 km² y 35.95 km² para los *concelhos* de Sintra, Amadora y Oeiras, respectivamente. El área dentro del rango modelado donde los valores de idoneidad logística fueron mayores a 0.5 en SSP5-8.5 es de 2,837.30 km² para Portugal continental, 32.18 km² para la CH Río Jamor, y de 172.11 km², 18.10 km² y 36.70 km² para los *concelhos* de Sintra, Amadora y Oeiras, respectivamente.

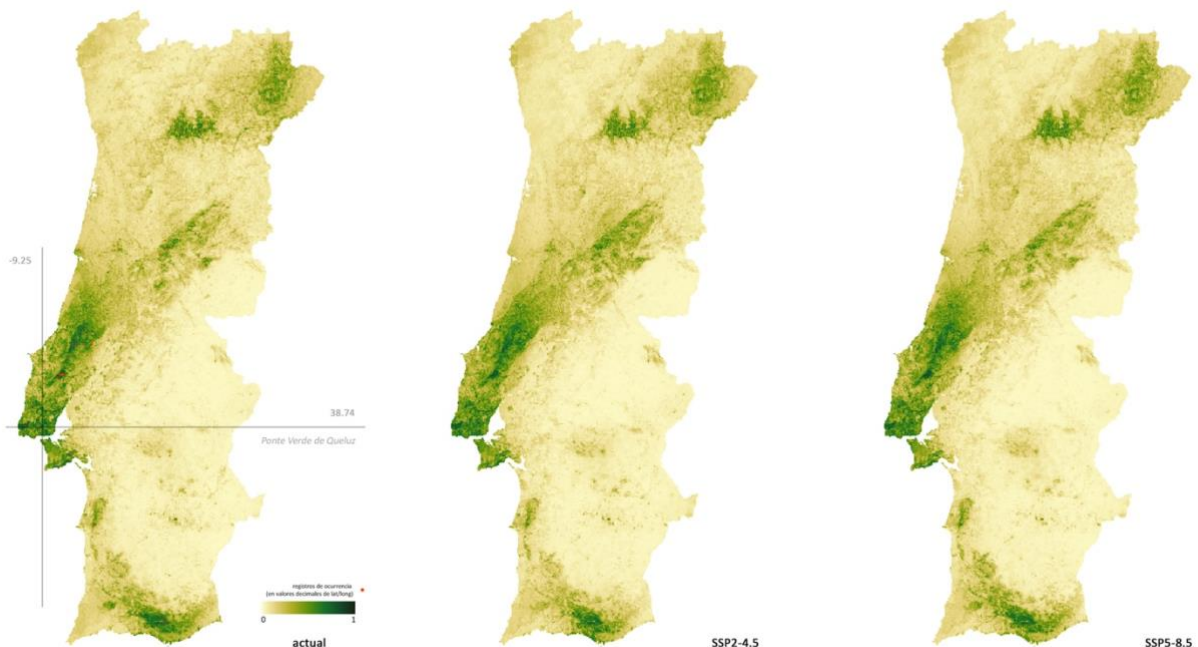


Figura 3. Desplazamientos previstos en el rango actual de distribución de los hábitats de *C. longifolia* en el año 2070, basados en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5. La idoneidad del hábitat se presentó mediante valores logísticos, un estimado entre cero y uno de probabilidad de presencia, considerando cero (0): no adecuado y uno (1): adecuado (Elaboración propia).

MODELO	Valor de idoneidad logístico de <i>C. Longifolia</i>				Área dentro del rango modelado donde los valores de idoneidad logística fueron mayores al 0.5 (km ²)				
	CH Río Jamor	<i>Matinha de Queluz</i>	Autopista IC19	PVQ	Portugal	CH Río Jamor	Sintra	Amadora	Oeiras
histórico	0.57	0.71	0.49	0.60	2788.47	33.41	156.12	19.44	32.61
SSP2-4.5	0.57	0.70	0.46	0.58	2812.66	31.74	170.90	18.54	35.95
SSP5-8.5	0.56	0.69	0.42	0.56	2837.30	32.18	172.11	18.10	36.70

Tabla 3. Valor de idoneidad logístico de *C. longifolia* y área dentro del rango modelado donde los valores de idoneidad logística fueron mayores al 0.5

4. CONCLUSIÓN

En este artículo científico, se exploró la aplicabilidad de la herramienta de SDM en el proyecto *Ponte Verde de Queluz*, con el objetivo de conservar la biodiversidad y restaurar los ecosistemas urbanos, específicamente la especie *Cephalanthera longifolia* (L.) Fritsch, ante el cambio climático. Los resultados indican que el uso de SDMs, herramienta replicable y escalable, es útil para la conservación de la biodiversidad y la restauración ecológica en las ciudades. Este estudio es relevante para la biogeografía aplicada y el impacto del cambio climático en las especies y ecosistemas urbanos, así como para la planificación y gestión del territorio urbano en función de la conservación de la biodiversidad. Para una futura investigación, se sugiere realizar estudios de las restantes especies propuestas en el proyecto *Ponte Verde de Queluz* para una mayor comprensión de la dinámica espacial y temporal de esta pieza de paisaje.

Un hallazgo importante de este estudio para el campo de la conservación de la biodiversidad y la restauración ecológica en las ciudades, es la cartografía de la distribución de los hábitats actuales y futuros para *C. longifolia*, en la cual se evidencian las áreas de refugios climáticos de retención y desplazamiento que permiten su persistencia en contextos de cambios climáticos. Esto podría implicar prácticas adicionales para la planificación y gestión urbana, en relación con la conservación de la biodiversidad y la restauración ecológica, en la identificación e optimización de refugios climáticos urbanos y establecimiento de corredores climáticos urbanos.

BIBLIOGRAFIA

- Alarcón M.L y Aedo C. (2002). *Cephalanthera longifolia* (L.) Fritsch en Anales Jard. Bot. Madrid 59:227-248
- Amann, M., Z. Klimont, y F. Wagner (2013). Regional and Global Emissions of Air Pollutants: Recent Trends and Future Scenarios. *Annual Review of Environment and Resources*, 38(1), 31–55.
- Araújo, M.B. (Coord), Antunes, S., Gonçalves, E.J., *et al.* (2022). Biodiversidade 2030: Nova agenda para a conservação em contexto de alterações climáticas. Universidade de Évora & Fundo Ambiental, Ministério do Ambiente e da Ação Climática, Lisboa.
- Buchhorn, M. *et al.* (2020). Copernicus Global Land Cover Layers-Collection 2. *Remote Sensing* 2020, 12Volume 108, 1044.
- Cancela, J., *et al.* (2020). Memória Descritiva de Arquitetura-Paisagista (MDAP): Projeto Ponte Verde de Queluz, Revisão Técnica (Fase 1). - (2019): Projeto de Execução (Fase 1). - (2018): Anteprojecto. - (2017): Estudos Prévios. BIODESIGN y TETRAPLANO, Lisboa, Portugal.
- Danabasoglu, G. *et al.* (2020). The Community Earth System Model version 2 (CESM2). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(11), e2019MS001916.
- Didan, K., Barreto, A. (2018). VIIRS/NPP Vegetation Indices 16-Day L3 Global 500m SIN Grid V001. NASA EOSDIS Land Processes DAAC.
- Dormann, C. F., *et al.* (2013). Collinearity: A Review of Methods to Deal with It and a Simulation Study Evaluating Their Performance. *Ecography* 36: 27–46.
- EEA (2020). Copernicus CORINE Land Cover. Corine Land Cover (CLC) 2018, Version 2020_20u1.
- Eyring, V. *et al.* (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958.
- Falcão, J. P. (2015). Plano Estratégico de Salvaguarda e Valorização do Palácio e sua envolvente. Fase 2 – Plano Base. Relatório Técnico das Propostas Incluídas no Plano Base. Lisboa, Portugal (original en Português).
- Farr, T.G., *et al.* (2007). The Shuttle Radar Topography Mission: Reviews of Geophysics, v. 45, no. 2, RG2004.
- Franklin, J. (2010). *Mapping Species Distributions: Spatial Inference and Prediction*. Cambridge University Press.
- Friedl, M., Sulla-Menashe, D. (2019). MCD12Q1 MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 500m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC.
- Funk, *et al.* (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Sci Data* 2, 150066.
- Gorelick N., (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment* Volume 202, 18-27.
- Guisan, A., W. Thuiller, y N. E. Zimmermann (2017). *Habitat Suitability and Distribution Models with Applications in R*. Cambridge University Press.
- Hastie, T., Tibshirani R., y Friedman J., (2009). *The Elements of Statistical Learning*. Springer.
- Hijmans, R.J., *et al.* (2005). Very High Resolution Interpolated Climate Surfaces for Global Land Areas. *International Journal of Climatology* 25: 1965-1978.
- Hurt, G.C. *et al.* (2020). Harmonization of global land use change and management for the period 850–2100 (LUH2) for CMIP6, *Geosci. Model Dev.*, 13, 5425–5464.
- IPBES (2016). El Informe de Evaluación Metodológica sobre Escenarios y Modelos de Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos. Editado por Ferrier, S. *et al.*, Secretaría de la Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Biodiversidad; Servicios Ecosistémicos, Bonn, Alemania.
- Kennedy, C.M. *et al.* (2019). Managing the middle: A shift in conservation priorities based on the global human modification gradient. *Global Change Biology* 00:1-16.
- Liu, Y., Wang, Y., y Zhang, J. (2012). New Machine Learning Algorithm: Random Forest. In: Liu, B., Ma, M., Chang, J. (eds) *Information Computing and Applications*. ICICA 2012. Lecture Notes in Computer Science, vol 7473. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Ma, L. *et al.* (2020). Global rules for translating land-use change (LUH2) to land-cover change for CMIP6 using GLM2, *Geosci. Model Dev.*, 13, 3203–3220.
- O'Neill, B.C. *et al.* (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461–3482. - (2014). A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*, 122(3), 387–400.

- Pacifici, M., *et al.* (2015). Assessing species vulnerability to climate change. *Nature Climate Change*, 5, 215–224.
- Peterson, A. T., *et al.* (2011). *Ecological Niches and Geographic Distributions*. Princeton University Press.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., y Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modelling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231–259.
- Portugal (2000) Decreto-Lei n.º 215/2000. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. Constitui a sociedade anónima de capitais exclusivamente públicos Parques Sintra - Monte da Lua, S. A. (2 de setembro de 2000).
- Portugal (2012) Decreto-Lei n.º 205/2012. Ministério da Agricultura, do Mar, do Ambiente e do Ordenamento do Território. Afetação dos Palácios Nacionais de Queluz e de Sintra (31 de agosto de 2012).
- Rao, S. *et al.* (2017). Future air pollution in the Shared Socio-economic Pathways. *Global Environmental Change*, 42, 346–358.
- Tatebe, H., *et al.* (2019). Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6, *Geosci. Model Dev.*, 12, 2727–2765.
- Thrasher, B., *et al.* (2022) NASA Global Daily Downscaled Projections, CMIP6. *Sci Data* 9, 262. - (2012). Technical Note: Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3309-3314.
- Zhu, B-R., *et al.* (2022). Current breeding distributions and predicted range shifts under climate change in two subspecies of Black-tailed Godwits in Asia. *Global Change Biology*, 28, 5416–5426.

FUENTES ELECTRÓNICAS

- Gandhi U., (2020). End-to-End Google Earth Engine (Full Course Material): A hands-on introduction to applied remote sensing using Google Earth Engine. <https://courses.spatialthoughts.com/end-to-end-gee.html> (Consulta: 17/03/2023).
- GBIF (2023). *Cephalanthera longifolia* (L.) Fritsch. <https://doi.org/10.15468/dl.sh23hw> (Consulta: 28/03/2023)
<https://blog.qithub.org/earth-engine-tutorial-33-performing-accuracy-assessment-for-image-classification> (Consulta: 04/01/2023).
- OpenAI. (2023). OpenAI: We're building safe AI. <https://openai.com> (Consulta realizada en fechas comprendidas entre el 25/03/2023 y el 7/4/2023).
- Phillips, S. (s.f.). Una Breve Guía Didáctica sobre MaxEnt (Versión 3.2.0) [Guía didáctica]. https://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/ (Consulta: 27/04/2021).
- PSML (2014). Relatório e Contas. Parque de Sintra – Montes da Lua, Conselho de Administração, Sintra, Portugal. [http://www.utam.pt/publicacoes/Parques%20de%20Sintra%20-%20\(RC\)%20-%202014.pdf](http://www.utam.pt/publicacoes/Parques%20de%20Sintra%20-%20(RC)%20-%202014.pdf) (Consulta: 28/05/2017).
- White J., (2021). Course: Google Earth Engine for Ecology and Conservation. Practical 6: Species Distribution Modeling SDM. <https://biomath-lab.github.io> (Consulta: 27/04/2021).
- Wu Q., (2020). Earth Engine Tutorial #33: Performing Accuracy Assessment for Image Classification
- Zurell D., (2020). Course: Introduction to species distribution modelling (SDM) in R. <https://damarizsurell.github.io/SDM-Intro> (Consulta: 27/04/2021).