



**2025** | **16-20**  
**GIJÓN** | **JUNIO**

**9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL**

**9CFE-1778**

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

Organiza





## **PrioSilvAra: Priorización para la implantación de sistemas agroforestales para la mejora de servicios ecosistémicos en medios agrarios**

DURANTE, P. (1), COELLO, J. (2), DE TORRE, B. (1), YÁÑEZ, L. (1).

(1) Agresta Sociedad Cooperativa. C/ Duque de Fernán Núñez, 2, 1º. 28012, Madrid.

(2) Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya (CTFC). Ctra. de Sant Llorenç de Morunys, km 2, 25280 Solsona, Lleida.

### **Resumen**

La simplificación del paisaje agrario puede conducir a la degradación del suelo (erosión, carbono, ciclos de nutrientes), poniendo en riesgo sus servicios ecosistémicos de provisión y regulación, principalmente. La implementación de sistemas agroforestales permite revertir esta situación mejorando su adaptación al cambio climático y, por tanto, su capacidad productiva.

ProSilvAra es una herramienta desarrollada en el marco del LIFE AgroForAdapt (2021-2026). Su objetivo es priorizar la instalación de sistemas silvoarables para la adaptación al cambio climático de zonas agrarias mediterráneas, con especial énfasis en la mejora y conservación del suelo. Las variables consideradas se basan en cartografía digital disponible o desarrollada específicamente, siendo las principales: erosión del suelo, contaminación por nitratos, secuestro potencial de carbono edáfico, conectividad ecológica, escenarios climáticos y presencia de aves esteparias.

El resultado es un mapa de priorización (alta, media, baja) con resolución de 100 m, obtenido mediante un modelo de Proceso Analítico Jerárquico basado en criterios de ponderación.

La herramienta se ha aplicado en los 7.500 km<sup>2</sup> de superficie agraria de la provincia de Burgos, siendo replicable en otras áreas del entorno mediterráneo, para facilitar la gestión sostenible y planificación de la restauración agraria. El mapa quedará alojado en el portal web del proyecto.

### **Palabras clave**

Silvoarable, reforestación, nitratos, adaptación, mitigación.

### **1. Introducción**

A nivel europeo el bioclima mediterráneo es el que más expuesto estará a los impactos del cambio climático en las próximas décadas (SHUKLA ET AL., 2019). La intensificación agraria iniciada a mediados del siglo XX en estas áreas ha dado lugar a una segregación de la vegetación leñosa de los terrenos agrícolas y de pasto, evolucionando los paisajes tradicionales en mosaico en dos direcciones opuestas (VAN ZANTEN ET AL., 2014): en áreas llanas, el paisaje agrícola ha tendido al agrupamiento de parcelas cada vez más grandes para optimizar la mecanización, mientras que en áreas de relieve irregular muchos terrenos agrícolas han sido abandonados. con la consiguiente colonización de masas



forestales sin gestión y con problemas de densificación y estabilidad. Pese a ser procesos opuestos, ambos conducen a una simplificación del paisaje que implica una mayor vulnerabilidad a riesgos abióticos (incendios en el segundo caso, sequía en ambos) y bióticos (plagas y enfermedades), además de una reducción de la biodiversidad. En el primer caso, además, la simplificación del paisaje agrícola supone una mayor vulnerabilidad a la fluctuación del precio de los insumos y del mercado de los productos y, en la mayoría de casos, a procesos de degradación del suelo (erosión, reducción de la materia orgánica, pérdida de fertilidad) y de contaminación del agua por lixiviados.

Los sistemas agroforestales (silvoarables y silvopastorales) son la combinación deliberada de vegetación leñosa con producciones agrícolas o ganaderas para obtener beneficios de sus interacciones (BURGESS & ROSATI, 2018). El componente leñoso de estos sistemas puede atender a múltiples objetivos, compatibles entre ellos: producción (madera, fruto, hongos), protección (biodiversidad, suelo, agua) y paisaje. Sin embargo, la mayoría de los estudios sobre sistemas silvoarables modernos (establecidos para promover las interacciones entre ambos componentes) se han realizado en Francia, Alemania, Reino Unido e Italia, mientras que en España apenas se dispone de trabajos publicados. Bajo este contexto se desarrolla el proyecto LIFE AgroForAdapt (2021-2026 - [www.agroforadapt.eu](http://www.agroforadapt.eu)) para demostrar y cuantificar el interés de los sistemas agroforestales mediterráneos como una herramienta clave de adaptación al CC, en el área de España y Francia mediterránea. El interés como uso del territorio de eco-intensificación basado en ecosistemas está recogido explícitamente en las principales estrategias, normativas y políticas comunitarias sobre CC (FAO, 2015; LEAKEY, 2017), debido principalmente a cinco factores: i) mayor resiliencia ecológica y biodiversidad - con especial énfasis en la mejora y conservación del suelo-; ii) mayor resiliencia productiva y económica; iii) menor impacto de la sequía y eventos meteorológicos extremos; iv) reducción de la vulnerabilidad a incendios en sistemas forestales; y v) mayor vitalidad y disponibilidad de fauna auxiliar. Este conjunto de factores hace muy atractivos estos sistemas en el contexto mediterráneo, pero su despliegue a gran escala requiere de una planificación para identificar aquellas condiciones en las que pueden conseguirse estos objetivos conjuntamente.

Una de las acciones de este proyecto es el desarrollo de una herramienta (PrioSilvAra) para identificar áreas prioritarias donde la instalación de sistemas silvoarables (combinación de la vegetación leñosa con cultivos) sería especialmente beneficiosa para múltiples servicios ecosistémicos. Para la priorización de áreas resultan especialmente interesantes metodologías que contemplen la evaluación de alternativas basadas en la influencia de diferentes criterios o variables ambientales. De entre éstas, destacan:

- Métodos basados en sumas ponderadas (*Weighted Linear Combination*, WLC) (DROBNE & LISEC, 2009). Combinan los valores de diferentes criterios ponderados según su importancia relativa. Se puede llevar a cabo mediante herramientas de análisis espacial de sistemas de información geográfica (SIG). Este método está basado principalmente en la utilización del álgebra de mapas, cuyo fin es



combinar múltiples capas digitales o variables temáticas para generar un mapa final fruto de la combinación de los valores específicos de cada capa. Dada su simplicidad, es un método muy utilizado, aunque no modela adecuadamente las interacciones entre criterios.

- Métodos de preferencia por ordenación (OPRICOVIC & TZENG, 2004). Evalúan alternativas en relación con una solución ideal positiva (mejor) y negativa (peor). Es muy utilizado para la comparación directa de alternativas, pero no siempre incluye interacciones espaciales.
- Optimización multiobjetivo (DEB et al., 2016). Este método resulta muy adecuado para problemas donde los objetivos son conflictivos (por ejemplo, coste vs impacto ambiental), generando un conjunto de soluciones en lugar de una única. Trata de buscar soluciones óptimas considerando múltiples objetivos en conflicto. Sin embargo, requiere modelar explícitamente las relaciones entre objetivos y puede resultar difícil de interpretar.
- Métodos de aprendizaje automático o *machine learning* (BREIMAN, 2001). Utiliza algoritmos de aprendizaje automático (e.g., *random forest*, *support vector machine*, redes neuronales) para analizar variables espaciales y predecir patrones. Aunque estos métodos integran grandes volúmenes de datos, pueden resultar complejos de implementar e interpretar los resultados.
- Proceso de análisis jerárquico (Analytical Hierarchy Process, AHP) (SAATY, 2008). Estructura el problema en una jerarquía que incluye el objetivo, criterios y subcriterios. Se realiza una comparación par a par para asignar pesos a los criterios. Una de las ventajas de AHP es que permite medir la consistencia del decisor al emitir sus juicios. Este método proporciona un marco sólido para decisiones complejas, mediante un proceso relativamente sencillo. Este enfoque es ampliamente utilizado en planificación territorial, gestión de riesgos, selección de sitios y evaluación ambiental.

Para este trabajo se han priorizado aquellas metodologías que cumplieran con las siguientes premisas:

- Evaluación multicriterio, no solo entre las variables, sino también dentro de cada variable.
- Integración de los resultados en un sistema de información geográfica (SIG) para el análisis y visualización espacialmente continua.
- Simplicidad en el procedimiento, para una mejor replicabilidad.



## 2. Objetivos

El objetivo de este estudio es desarrollar una herramienta (PrioSilvAra) de ayuda a la identificación de zonas estratégicas para la promoción de sistemas silvoarables, desde el punto de vista de la adaptación al cambio climático y la generación de otros servicios ecosistémicos esenciales como la protección del suelo, el agua y la biodiversidad.

PrioSilvAra se basa en un modelo de Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y su aplicación piloto se ha realizado en la provincia de Burgos, con una resolución de 100 m.

Esta herramienta está enfocada a profesionales y entidades involucradas en la gestión y planificación territorial, y en el diseño e implementación de políticas y marcos de ayudas a nivel provincial y regional.

## 3. Metodología

El marco metodológico aplicado en el desarrollo de PrioSilvAra se basa en un proceso de análisis jerárquico para la priorización de áreas, combinado con sistemas de información geográfica (GIS-based Analytical Hierarchy Process (AHP) (PEDRO & QUINTA-NOVA, 2024; ROQUE et al 2017; SAATY, 2008), empleando softwares de código abierto. En la Figura 1 se muestran los pasos clave seguidos en este proceso, desarrollados a continuación.

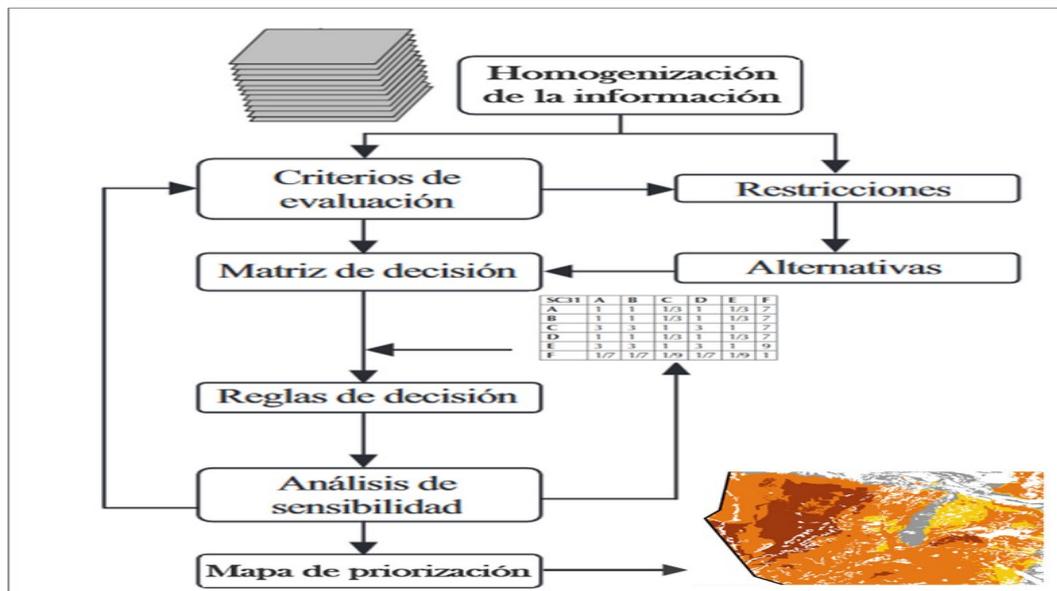


Figura 1 Esquema del marco metodológico de la herramienta



## Selección de la zona piloto

La zona piloto seleccionada fue la provincia de Burgos (Castilla y León, norte de España) (Figura 2). La selección de esta zona se basó en su heterogeneidad de paisaje y topográfica, que incluye paisajes de predominio agrícola, paisajes de predominio forestal y ganadero, y áreas de transición, recogiendo una gran variabilidad para facilitar la replicabilidad del modelo. La extensión total de esta provincia es de 14.022 Km<sup>2</sup>, lo que supone un 2,76% del territorio nacional y el 14,95% del regional.

Su diversa geografía (con un rango altitudinal de 700 m a 2.000 m) incluye zonas montañosas como la Sierra de la Demanda, mesetas como la Paramera del Cerrato y valles fluviales del río Ebro. Gran parte de la provincia alimenta la cuenca del Duero, con ríos como el Arlanza y el Arlanzón. Predomina un clima continental con cierta influencia mediterránea, con inviernos fríos y veranos secos. Las temperaturas oscilan entre -10°C y 35°C, con una media anual predominante entre 3° en los meses más fríos y 20°C en los más cálidos. La precipitación media anual varía entre 600 mm en el cuadrante sur y occidental, y 1,200 mm en las áreas norte y oriental. La vegetación forestal predominante son los bosques de encinas, robles y hayedos.

*Figura 2. Localización de la zona piloto*

## Selección de las variables de entrada del modelo

En las etapas iniciales del proceso de la herramienta se identificaron y recopilamos todo el abanico de posibles variables relacionadas con la viabilidad de los sistemas silvoarables y con los servicios ecosistémicos que éstos generan, relacionados con la protección del suelo, el agua y la biodiversidad. Esta información fue recopilada en formato de cartografía digital y, tras su homogeneización, poder ser comparada y combinada.

Para facilitar la replicabilidad de la herramienta PrioSilvAra se ha priorizado la información digital de las variables disponibles a escala europea, sustituidas por variables locales cuando la calidad, resolución y actualización de la información lo requerían. Por lo tanto, algunas variables han sido desarrolladas específicamente para la zona de estudio, pero basadas en metodologías publicadas para su posible replicación.

Todo el rango de variables puede agruparse en las siguientes categorías:

- Cobertura, distribución espacial de la vegetación y usos de suelo.
- Suelo y características hídricas.



- Escenarios climáticos.
- Restricciones en Red Natura.

En la siguiente tabla (Tabla 1) se detallan todas las variables identificadas y recopiladas (un total de 15 variables), divididas por categorías, con una breve descripción de significado ecológico, la fuente de origen de descarga y la categorización de sus valores.

*Tabla 1. Descripción de todas las variables de entrada en la herramienta de la instalación de un sistema*

Categoría	Descripción de variable	Fuente	Resolución espacial	Valoración categorica
1. Cobertura de vegetación	• <b>Land Cover</b> - Mapas de cobertura de suelo con mayor potencial para la dispersión de especies de hábitat de bosque, y del tamaño de dichas áreas. - 201 cultivos de secano - 202 cultivos de regadío - 203 agricultura anual - Permanent crops - Vineyards - 204 bosques - 205 áreas de cultivo consensado - 206 agricultura con áreas significativas de vegetación natural	CORINE 2018	100 m	0- resto 1- bosque
	• <b>Conectividad de hábitats</b> - Mapa de resistencia al movimiento de especies, asignación de valores en base a la dificultad de dispersión de especies o barreras a través de diferentes tipos de cobertura de suelo. - Distancia de dispersión: proporción de la facilidad de dispersión en función de la distancia entre áreas de hábitat de bosque, y del tamaño de dichas áreas. - El establecimiento de un SAG en las zonas prioritarias redunda en permitir realizar la función de puente para la conectividad entre las áreas de hábitat de bosque.	Elaboración propia	100 m	0-0,5 1-125
	• <b>Tree cover density</b> Densidad de cobertura arbolada (C) en zonas de conservación de biodiversidad	COPERNICUS 2020	100 m	0- resto 1- densidad <=1%
	2. Características del suelo	• <b>Profundidad para raíces arbóreas (Depth to roots)</b> Profundidad medida para el arraigamiento de árboles. • <b>Erosión laminar</b> pérdidas de suelo (modelo RUSLE) para la estimación de erosión laminar y en regiones en las que puede ser mitigado por la plantación de árboles. • <b>Balace entre el COS y su potencial de absorción</b> Se ha calculado el balance entre el carbono orgánico del suelo (COS) con su capacidad potencial de sustrato en los suelos de estudio.	ESDS v2.0 (2013) INES (2018) Elaboración propia	1 km 25 m 90 m
3. Contaminación de acuíferos	• <b>Nitratos</b> Zonas vulnerables a la contaminación por nitratos de origen agrícola, con alto riesgo de lixiviación a los acuíferos. • <b>Flujos de ríos</b> Identificación de los cursos de agua por su influencia con la dispersión de nitratos. • <b>Zonas de inundación (SNCZB)</b> Periodos de retorno de T=100 y T=500	ITACYL (2023) Dirección Hidrográfica del Duero MITECO	1:25,000 1:25,000	0- resto 1- riesgo
4. Escenarios climáticos	• <b>Mapa de Condición de la Tierra (2000-2010):</b> Mapa de condición de la Tierra (2000-2010) a lo largo del tiempo y a la velocidad climática interanual. • <b>Variables bioclimáticas</b> Variables bioclimáticas que representan diferentes aspectos de las condiciones climáticas: temperatura, humedad, viento, precipitación y otros factores. Se han calculado los índices de temperatura-humedad y viento-precipitación, y se han combinado con los índices de temperatura-humedad y viento-precipitación para obtener un índice bioclimático. • <b>Bioclim</b> Índice bioclimático que representa la idoneidad para la vida de las especies. • <b>Selección de biotz</b> Total (annual) precipitation: relacionada con riesgo de desertificación	CSC-Zonas Áridas (2014) Elaboración propia	1 km 100 m	1 - Degradando 2 - Estabilizado 3 - Mejorando 1 - <= 200 a Baja 2 - <= 200 a Alta 3 - >= 200 a Alta
5. Restricciones Red Natura 2000	• <b>Escenarios PRACC 2018</b> Escenarios climáticos representados por los datos de cambios de nivel del mar, precipitación, etc. de la Red Natura 2000. • <b>Riesgo de desertificación</b> Programa de Acción Nacional contra la Desertificación. • <b>Mapa de riesgo potencial significativo de inundación fluvial</b> Mapa de riesgo potencial significativo de inundación fluvial en zonas de estudio de alto riesgo por las autoridades competentes en materia de aguas. • <b>Aviso de protección</b> Aviso de protección ambiental de sensibilidad ambiental para las zonas de estudio. Todos los mapas de riesgo de estudio se han obtenido de estudios de alto riesgo por las autoridades competentes en materia de aguas.	AdaptCCs MITECO (2000) MITECO-SKZ2 Dirección General de Medio Ambiente y Sostenibilidad MITECO (2022)	5 km 1:50,000 1:25,000	----- ----- -----
	• <b>Restricciones Red Natura 2000</b> Restricciones de Red Natura 2000 en las zonas de estudio. Se recomienda ponerse en contacto con la Dirección General de Medio Ambiente y Sostenibilidad para que marque las directrices de los proyectos a desarrollar dentro de zonas de Red Natura 2000 o hábitats protegidos.	ITACYL (2023)		1- muy alta 2- alta 3- media

A continuación se describe la metodología utilizada para generar la cartografía de las variables de elaboración propia:

- Conectividad de hábitats:

Se utilizó la teoría de circuitos para calcular proxies de conectividad basados en:

- Mapa de resistencias al movimiento de especies: estima la dificultad de dispersión de especies o barreras según distintos tipos de cobertura del suelo.
- Mapa de distancia de dispersión: representa la facilidad de dispersión de las especies en función del tamaño de hábitats arbolados y la distancia entre ellos.

Esta información permite identificar zonas prioritarias para establecer sistemas silvoarables que actúen como puentes de conectividad entre hábitats arbolados. Ambos mapas fueron calculados mediante el programa de código abierto Circuitscape, siguiendo la metodología propuesta por SAURA & RUBIO, 2010.

- Balance entre el carbono orgánico del suelo (COS) y su potencial de absorción:

Para la generación de ambos mapas se consideraron las especificaciones del mapeo digital del suelo de la FAO tanto para la elaboración del mapa global como su potencial de absorción de COS (YIGINI et al, 2018). Estas especificaciones se



apoyaron en técnicas de aprendizaje automático (*machine learning*) para predecir la información espacialmente continua desde información puntual. Para el mapa de la densidad del COS se identificaron variables ambientales consideradas como factores formadores del suelo, mediante el modelo conceptual SCORPAN (MCBRATNEY et al., 2003). Los datos de COS (127 muestras en total) se han obtenido de la información disponible de las bases de datos de ITACYL y CARBOSOL (LLORENTE et al., 2018). El mapa de potencial de absorción del COS se elaboró mediante el modelo predictivo RothC, para un período de 20 años (SIERRA et al., 2012).

La combinación de ambas capas dio lugar a una nueva variable espacial indicando el balance entre el almacenamiento actual de COS y su capacidad de secuestro en los 30 cm superficiales.

- Variables bioclimáticas:

Dentro del bloque de escenarios climáticos, que predicen cambios plausibles para interpretar las consecuencias del cambio climático, estas variables proporcionan información con mayor significado biológico. Relevante para identificar las limitaciones que las especies arbóreas pueden tener en el futuro, con vistas a establecer sistemas silvoarables. Dichas variables fueron generadas bajo escenarios basados en los Shared Socio-economic Pathways (SSPs), definidos en el Sexto Informe de Evaluación (AR6). Dichas variables se calcularon a partir de una serie histórica de valores medios mensuales de temperatura máxima y mínima (°C) y de precipitación (mm), específicos para la España Peninsular. Se seleccionaron dos variables entre las 19 generadas, dada su mayor relevancia en la zona piloto, estando ambas vinculadas al riesgo de desertificación y degradación de ecosistemas: bio4= estacionalidad de la temperatura y bio12 = precipitación total anual.

La interpretación de los valores de todas las variables identificadas y el análisis visual de su distribución espacial dio lugar a la selección de las variables más significativas para los sistemas silvoarables en nuestra zona de piloto. Estas fueron:

- Usos y coberturas de suelo con mayor potencial para la plantación de arbolado (delimitan la zona de aplicabilidad de la herramienta)
- Conectividad de hábitats
- Profundidad para raíces arbóreas
- Balance entre el COS y su potencial de absorción
- Contaminación por nitratos
- Mapa de Condición de la Tierra



- Variables bioclimáticas (bio4 y bio12)

Además, las restricciones de Red Natura por aves esteparias, aunque no han sido consideradas para la priorización, se han incluido a nivel informativo por su importancia para el diseño y densidad de plantación de los sistemas silvoarables.

### **Homogeneización de la información. Matriz de decisión.**

La homogeneización y estandarización de las variables las hace comparables e integrables en modelos de análisis o toma de decisiones. Los principales pasos seguidos fueron:

- Extracción de la información para el límite de la zona de estudio (Provincia de Burgos).
- Rasterización de todas las variables.
- Homogeneización del sistema de referencia espacial a ETRS89.
- Reescalado de todas las capas a la misma resolución espacial (100 m tamaño de píxel).
- Tratamiento de datos: reclasificación de los valores naturales a números enteros.
- Categorización de valores de cada variable según la escala específica de priorización en función de su rango de valores. De este modo se definen tanto los valores restrictivos o excluyentes como los asociados a las diferentes alternativas o valores de priorización de cada variable (0-restrictivo, 1-baja hasta 4-alta). Con el fin de simplificar la interpretación de los resultados del mapa final, la leyenda resultante se redujo a tres categorías de priorización (baja, media y alta). La discretización del rango de valores, así como el valor de la escala de priorización asignado, se muestra en la Tabla 1.

Para la generación, procesado y homogeneización de las variables se han utilizado los softwares libres y de código abierto R Statistical 3.6.0 y QGIS v2.8 siguiendo el principio de replicabilidad.

En base a la importancia de cada variable seleccionada en comparación a las demás, se estableció un esquema jerárquico con la asignación global de pesos o ponderaciones a cada variable, establecido por conocimiento experto aplicado a la zona piloto. Por tanto, los valores de categorización de cada variable están condicionados por el valor de ponderación global de la misma. Dado el gran

potencial de los sistemas silvoarables para la restauración medioambiental, la premisa seguida para establecer esta categorización fue la de otorgar mayor prioridad a aquellas zonas más degradadas o alejadas de un buen estado de conservación. Tanto las variables como su categorización (criterios/alternativas) se muestran la siguiente tabla (Tabla 2):

*Tabla 2. Ponderación de variables y categorización de alternativas*

Variable	Pesos (% influencia)	Valores de categorización	Priorización (0-excluido, 1-baja, 4- alta)
Conectividad de hábitats:	30	0<3km 1>-10-15 km 2>- 5-10 km 3<-3- 5 km	1 4 3 2
Profundidad para raíces arbóreas	15	0 - restrictivo (obstáculos <40cm) 1 - Sin obstáculo en 0-80 cm 2- Obstáculos entre 60-80 cm 3 - Obstáculos entre 40-60 cm	Restringido 3 2 1
Balace entre el COS y su potencial de absorción	15	1- Bajo SOC y bajo potencial 2- Alto SOC y bajo potencial 3- B ajo SOC y alto potencial 4- Alto SOC y alto potencial	2 1 4 3
Contaminación por nitratos	20	0= resto 1= nitratos	1 3
Mapa de Condición de la Tierra	10	1 - Degradando 2 - Fluctuando 3 - Aumentando 4-- Estático	4 3 2 1
Variable bioclimática B4: estacionalidad de la temperatura	5	1 <- 579.4 baja 2 = 579.4-642.08 3 > 642.08 alta	1 2 3
Variable bioclimática B12: precipitación total	5	1 < 14.95 2 = 23.48-19.09 3 > 23.48	3 2 1

En relación a este esquema jerárquico se estimó la consistencia de los criterios siguiendo la metodología AHP propuesto por SAATY (2008) y MARTÍNEZ et al. (2010). Para ello, se calculó la matriz de comparación por pares en base a la relación de los pesos propuestos (y la influencia de una variable sobre las demás) donde se calcula la importancia relativa entre cada par de criterios. En esta matriz se determina la importancia relativa entre cada par de criterios (Tabla 3).

*Tabla 3. Matriz de comparación por pares*

	Conectividad de hábitats:	Profundidad para raíces arbóreas	Balace COS / potencial de absorción	Contaminación por nitratos	Mapa de Condición de la Tierra	B4: estacionalidad temperatura	B12: precipitación total
Conectividad de hábitats	1	3	2	1.2	3	6	6
Profundidad para raíces arbóreas	0.33	1	0.67	0.4	1	2	2
Balace entre el COS y su potencial de absorción	0.50	1.50	1	0.60	1.50	3.00	3.00
Contaminación por nitratos	0.83	2.50	1.67	1	2.5	5	5
Mapa de Condición de la Tierra	0.33	1.00	2	0.67	1	2	2
Variable bioclimática B4: estacionalidad de la temperatura	0.17	0.50	0.33	0.2	0.5	1	1
Variable bioclimática B12: precipitación total	0.17	0.50	0.33	0.5	0.5	1	1

Para verificar la consistencia de esta matriz después de obtener los valores de



los pesos, AHP calcula el valor del peso para cada criterio obteniendo el vector propio correspondiente al mayor valor propio de la matriz y normalizando la suma de los componentes a la unidad. La consistencia se evalúa mediante un índice denominado ratio de consistencia (CR), adoptado para este estudio un valor umbral estándar de  $CR = 0.10$ , ampliamente reconocido en la literatura. El resultado de la ratio obtenida de dicho análisis de consistencia ( $CR = 0.07 < 0.10$ ) indican que la matriz de comparación por pares es consistente y que los valores de los pesos establecidos en la metodología son válidos.

#### 4. Resultados

La Figura 3 muestra la distribución de los valores categorizados de las variables finales seleccionadas.

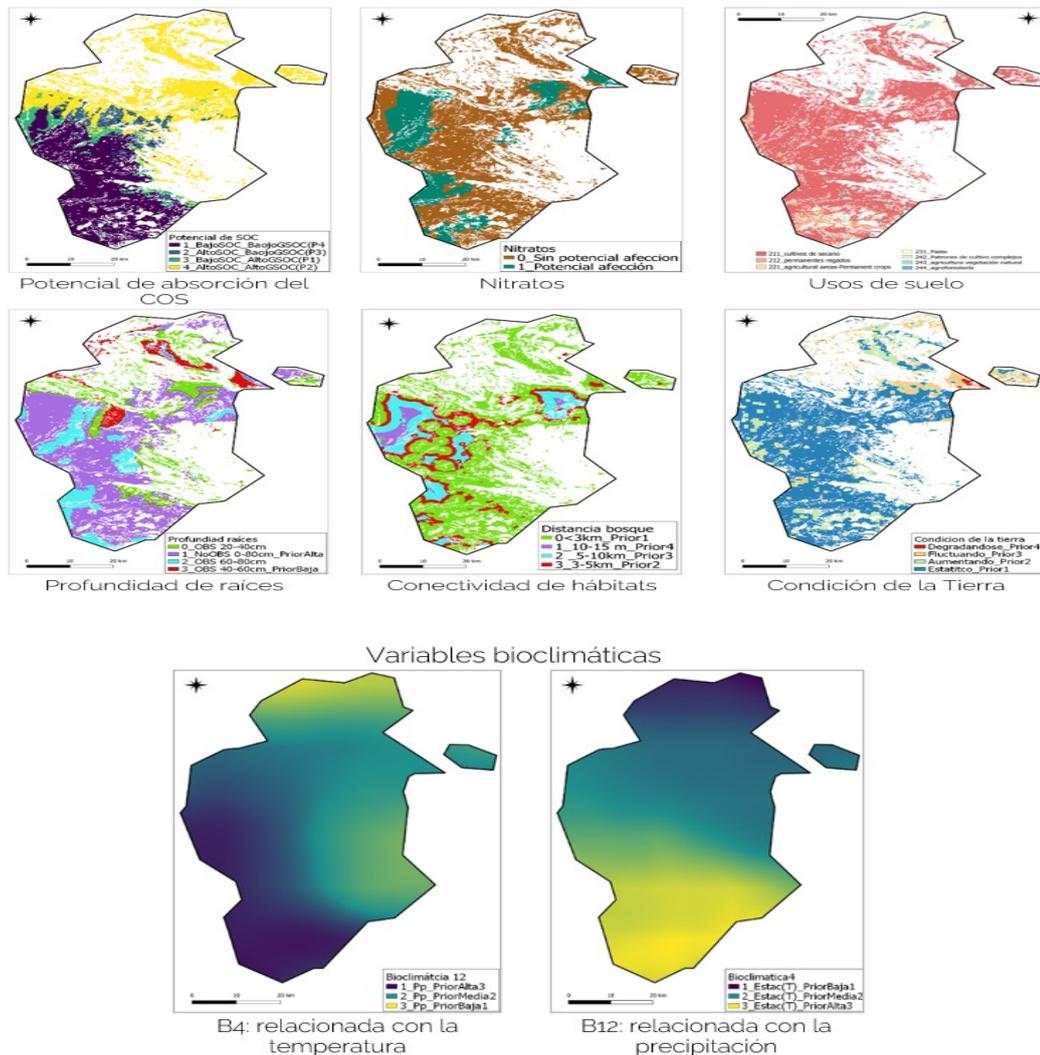


Figura 3. Distribución espacial de las variables seleccionadas para la implementación de la herramienta PrioSilvAra en la zona piloto.

SRC:ETRS89/UTM30N

La superficie objeto de la evaluación ocupa el 51% de la provincia (unas 715.000 ha). Esta área se concentra principalmente en la mitad oeste y sur, formando una superficie continua, y en el tercio norte de forma más disgregada, con un paisaje en mosaico. El cuadrante sudeste es de fuerte predominio forestal, por lo que está excluido en gran medida de la evaluación. El potencial de absorción de COS muestra dos zonas diferenciadas, con el cuadrante oeste - suroeste con un bajo contenido de COS y bajo potencial, y los terrenos del tercio norte, donde predominan los suelos con alto contenido y alto potencial de COS. Las zonas vulnerables a nitratos se dan en la mayor parte de la superficie agraria. En cuanto a la profundidad enraizable, las zonas excluyentes (< 40 cm de profundidad) se sitúan principalmente en las zonas de transición entre terreno forestal y agrario. Las áreas más prioritarias considerando el mapa de conectividad coinciden con los núcleos agrarios más densos de la mitad oeste de la provincia. Por último, el mapa de condición de la tierra presenta una situación predominantemente estática, con las principales zonas en degradación o fluctuando en el cuadrante nordeste.

El resultado final de la combinación de las capas siguiendo la metodología descrita es el mapa de priorización de la zona piloto (Figura 4), representando las categorías CORINE mencionadas en la Tabla 1. Este mapa representa la categorización de niveles de prioridad (restrictiva, baja, media y alta) a 100 m de resolución espacial, con la superposición (áreas con trama) de la información de los niveles de presencia de aves esteparias.

*Figura 4. Mapa de priorización para la instalación de sistemas silvoarables*

Como se puede observar en la Tabla 4, las áreas predominantes son las de prioridad media (64% de la superficie), distribuyéndose en superficies similares entre las zonas de baja (9%) y alta (10%) prioridad, y un 17% de zonas restrictivas. Esto supone unas 590.000 ha elegibles. Las zonas con prioridad alta se encuentran concentradas principalmente en el oeste y suroeste de la provincia. En esta Tabla 4 también se muestra el desglose de la superficie de cada nivel de sensibilidad ambiental para las aves esteparias por categoría de prioridad. De las zonas de prioridad alta, solo el 31% se sitúan en áreas de sensibilidad alta o muy alta para aves esteparias, una cifra que baja a menos del 10% en el caso de las zonas de prioridad media.

*Tabla 4. Distribución de la superficie de cada categoría de priorización para la instalación de sistemas silvoarables y su porcentaje de cada nivel de sensibilidad ambiental para las aves esteparias.*

		Sensibilidad ambiental para las aves esteparias			
Priorización	Área (ha)	Muy alta	Alta	Media	Baja
Exclusión	125.199	0,0%	1,7%	30,7%	67,6%

Baja	60.870	0,0%	1,6%	16,6%	81,7%
Media	459.308	1,1%	8,4%	43,1%	47,3%
Alta	69.573	5,3%	25,6%	60,0%	9,1%
<b>Total</b>	<b>714.950</b>				

El mapa resultante quedará alojado en el portal web del proyecto, de acceso público, para proporcionar y facilitar la información a los diferentes grupos del sector interesados.

## 5. Discusión

Esta herramienta (PrioSilvAra) se centra en promover los servicios ecosistémicos más amenazados en un paisaje muy simplificado y de muy claro predominio agrario proporcionando diversificación de la producción, adaptación al cambio climático, protección de suelos, agua y biodiversidad. Sin embargo, no se contempla como ayuda a la toma de decisiones para el diseño de sistemas silvoarables (marcos de plantación, especies, productividad potencial, etc.), lo cual excede al ámbito temático de este estudio.

La identificación del gran número y diversidad de variables proporciona versatilidad y replicabilidad a esta herramienta. Estas variables han sido seleccionadas en base a fuentes cartográficas disponibles para gran parte de la Europa mediterránea (REISNER ET AL., 2007). Igualmente, la metodología aplicada también facilita su replicabilidad, buscando la combinación de un método robusto, pero de fácil aplicación, con posible implementación en software libre y de código abierto- No obstante, esta herramienta no es automática y requiere de conocimiento experto para la selección de aquellas variables específicas para cada zona.

De entre las 15 variables previamente evaluadas, se seleccionaron 7 como prioritarias para la zona de estudio, relacionadas con: zonas elegibles y limitaciones legales (usos del suelo y restricciones RN2000); viabilidad técnica (profundidad del suelo); estado de conservación y vulnerabilidad de suelos, agua y biodiversidad (potencial de la absorción del COS, contaminación de acuíferos, condición de la tierra y conectividad); y vulnerabilidad frente al cambio climático (escenarios climáticos). El resto de variables fue descartado debido a su escasa relevancia en el área de estudio o desactualización de la información (erosión laminar, riesgo de inundación, densidad de cobertura arbolada, ...)

A lo largo de las decisiones de inclusión de determinadas variables, se adoptaron ciertos criterios que pueden ser reconsiderados en otros contextos geográficos, como, por ejemplo, la inclusión de usos y coberturas de suelo 242 (patrones de cultivo complejos) o 243 (agricultura con áreas significativas de vegetación natural), ya que se ha considerado que estas superficies todavía pueden albergar arbolado por su poco desarrollada complejidad estructural.

Respecto a la resolución espacial del mapa final, dada la gran superficie de la zona piloto, las zonas de priorización resultantes han debido agruparse en unidades representativas para su correcta visualización e interpretación (TOBLER, 1988). Como consecuencia, se pierde singularidad en la priorización. Esto es especialmente relevante en el caso de amortiguación de zonas inundables y restauración de vegetación riparia mediante sistemas silvoarables en terrenos agrarios anexos a cauces. Estas zonas quedaron relegadas a unidades lineales de baja representatividad a la escala del mapa, pero es necesario tenerlas muy presentes al definir planes de implementación de sistemas silvoarables a escala comarcal o municipal.

Las zonas elegibles de la zona de estudio están formadas principalmente por grandes extensiones de cultivos de secano, presentando en su gran mayoría un nivel de prioridad medio (64% de la superficie) para implantar sistemas silvoarables. Las zonas con prioridad alta (10%) se distribuyen fundamentalmente en el oeste y suroeste de la provincia, donde coinciden un elevado grado de simplificación del paisaje (baja conectividad de hábitats arbolados), un alto riesgo de contaminación por nitratos de origen agrario, alta vulnerabilidad a la desertificación y, frecuentemente, un bajo contenido en COS. El potencial de los sistemas agroforestales para frenar la degradación ambiental asociada a estas variables ha sido puesto de relieve en otros trabajos en los que se plantean estrategias para impulsar la adopción de sistemas silvoarables, y agroforestales en esta línea (MOSQUERA-LOSADA et al., 2018; BERTOMEU et al., 2024; LAWSON, 2024). Las zonas en las que se prevé un impacto más severo del cambio climático son las zonas más al sur del área de estudio. Estas presentan un nivel de prioridad medio, fundamentalmente, donde se distribuyen mosaicos de cultivos permanentes, con pastizales o vegetación natural asociados, entre las grandes extensiones de cultivos de secano. La inviabilidad edáfica (suelos muy rocosos o poco profundos) es el limitante para instalación de sistemas silvoarables en la zona de estudio, representando el 17% del área de estudio.

El caso de las zonas potenciales de presencia de aves esteparias es particularmente sensible en la zona de estudio desde el punto de vista de la promoción de los sistemas silvoarables. Son zonas con presencia de aves de extraordinario interés por su baja representación a nivel nacional y europeo. Sin embargo, tienden a coincidir con las áreas mencionadas previamente de menor diversidad paisajística, impactos en suelo y agua, y vulnerabilidad al cambio climático. Precisamente, su restauración con un mínimo de cobertura arbolada potenciará la mejora de múltiples servicios ecosistémicos en ellas. Tal y como se ha demostrado en otros estudios, la presencia de vegetación leñosa dispersa se considera compatible con la presencia de aves esteparias o subesteparias incluyendo la avutarda, ganga ibérica, sisón, carraca europea, alcaraván, cogujada, alondra totovía, chotacabras, collalba rubia, paloma zurita o elanio común, entre otras (CARRASCO et al., 2023). Otro factor a destacar es la escala espacial de la información disponible sobre la distribución de la presencia de estas especies. Su bajo nivel de detalle, destaca la necesidad de una planificación específica para la implantación sistemas silvoarables en estas áreas. Gracias a la versatilidad de diseño y especies en estos sistemas, un principio general para su promoción en



áreas con presencia de esteparias es plantear un desarrollo progresivo, con especies arboladas de bajo porte (ej: frutales, plantas aromáticas y medicinales, árboles y arbustos forrajeros...), con amplios marcos de plantación y aumento gradual de la superficie de vegetación leñosa. Estas medidas deben ir acompañadas de planes de seguimiento de las poblaciones de estas especies, para evaluar empíricamente los efectos de estos sistemas, lo que representa una línea de investigación de gran interés.

El mapa final generado muestra una distribución de superficies por categoría de prioridad que pone de relieve dos consideraciones clave: i) la superficie de prioridad alta queda claramente identificada, con casi 70.000 ha en las que sería especialmente apremiante plantear una estrategia de diversificación y restauración del paisaje a partir de sistemas silvoarables; ii) una gran mayoría de la superficie agraria de la provincia (459.000 ha) presenta una prioridad media, es decir, que el desarrollo de estos sistemas sería viable y relevante en la mayoría del área de trabajo.

A la vista de los resultados de la herramienta, sería deseable automatizar y sistematizar los criterios y alternativas de cada variable, así como poder ajustar la ponderación de toda la batería de variables, para poder adaptar la herramienta a diferentes zonas de trabajo.

En consonancia con el nuevo Reglamento de Restauración de la Naturaleza (Reglamento (UE) 2024/1991 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 24 de junio de 2024, relativo a la restauración de la naturaleza y por el que se modifica el Reglamento (UE) 2022/869), la herramienta facilita la implicación del sector agrícola planteando nuevas modalidades de explotación del territorio atendiendo a la adaptación a escenarios cambiantes de cambio climático, sin olvidar la rentabilidad y sostenibilidad de usos.

## 6. Conclusiones

PrioSilvAra es una herramienta desarrollada mediante el método de priorización jerárquica basada en GIS (GIS-based AHP), que resulta de gran utilidad para guiar el fomento de sistemas silvoarables bajo una óptica de mejora conjunta de múltiples servicios ecosistémicos: diversificación de la producción, adaptación al cambio climático, protección del suelo, agua y biodiversidad, a escala provincial y comarcal.

La zona de estudio (suelos agrarios de la provincia de Burgos) presenta principalmente una prioridad media para la implantación de sistemas agroforestales (64%), mientras que un 10% de la superficie presenta una prioridad alta y un 9% una prioridad baja. El 17% restante ha sido excluida por su falta de viabilidad para acoger sistemas silvoarables. Las zonas de prioridad media, y especialmente las de prioridad alta, coinciden con los paisajes de llanura cerealista



más fuertemente simplificados, con un bajo contenido de carbono orgánico edáfico, problemas de contaminación por nitratos y alta vulnerabilidad a la desertificación y a los efectos del cambio climático.

La automatización de la herramienta respecto los criterios y alternativas posibles de cada variable, sería de gran utilidad de cara a la toma de decisiones de la instalación de los sistemas silvoarables. Sin embargo, la variabilidad y singularidad que presenta cada territorio lleva inherente la aplicabilidad de conocimiento experto que dificulta la total sistematización de los procesos.

El mapa generado será publicado en la página web del proyecto (<https://agroforadapt.eu>), con el objetivo de proporcionar y facilitar información accesible a los diversos grupos de interés.

## 7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido llevado a cabo dentro del proyecto LIFE AgroForAdapt LIFE20 CCA/ES/001682, financiado por el programa LIFE de la Unión Europea.

## 8. Bibliografía

ADAPTECCA. Escenarios PNACC 2017. Mapa de escenarios de cambio climático. <https://escenarios.adaptecca.es>

BERTOMEU, M.; COELLO, J.; LAWSON, G.; ARMENGOT, L.; BAIGES, T.; BORRÀS, G.; CASADESÚS, A.; PASCUAL, D.; PAUNÉ, F.; RULL, J.; SÁNCHEZ, L.; & DE TORRE BARRIO, B.; 2024. Los sistemas agroforestales en el Plan Estratégico de la PAC Español: análisis y reflexiones (Version 1). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11071948>

BURGESS, P.; & ROSATI, A.; 2018. Advance in European agroforestry: results form the AGFORWARD project. *Agrofor. Syst.* 92(4) 801-810.

CARRASCO, M.; ARENAS, R.; LEIVA A.; 2023. Aves esteparias. Recursos Naturales de Córdoba nº8. Diputación de Córdoba (Ed.). 186. Córdoba

COPERNICUS TREE COVER DENSITY 2018. European Environment Agency. <https://sdi.eea.europa.eu/catalogue/copernicus/api/records/c7bf34ea-755c-4dbd-85b6-4efc5fd302a2?language=all>

CORINE LAND COVER 2018 (España). CNIG. MITMS. <https://datos.gob.es/es/catalogo/e00125901-spaignclc2018>.



DEB, K.; SINDHYA, K.; & HAKANEN, J.; 2016. Multi-objective optimization. In Decision sciences. CRC Press. 161-200.

DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL DUERO 2024. FLUJOS DE RÍOS. Cartografía digital ETRS89, 1:25.000 del IGN (BCN25). <https://www.saihduero.es/>

DROBNE, S.; & LISEC, A.; 2009. Multi-attribute decision analysis in GIS: weighted linear combination and ordered weighted averaging. Informatica 33(4).

ESB, 2002. European Soil Bureau. European Soil Database versión 2.

FAO 2015. Agroforestry Definition. <http://www.fao.org/forestry/agroforestry/80338/en/>

INES 2018. EROSIÓN LAMINAR Y EN REGUEROS. MITECO. [https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/inventario-nacional-erosion-suelos/ines\\_caracteristicas\\_generales.html](https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/inventario-nacional-erosion-suelos/ines_caracteristicas_generales.html)

ITACYL 2021. ZONAS DE SENSIBILIDAD AMBIENTAL PARA LAS AVES ESTEPARIAS. <https://idecyl.jcyl.es/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/SPAGOBCYLMNADTSAMAES>

ITACYL 2023. MAPA DE CONTAMINACIÓN POR NITRATOS DE ORIGEN AGRARIO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS. <https://idecyl.jcyl.es/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/SPAGOBCYLCITDTSEFNAS>

LAWSON, G.; 2024. Agroforestry: a vision for 10% tree cover on EU agricultural land by 2040. V Congreso Iberico de DehesaMontado, Evora. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14016410>

LEAKEY, R. R. B.; 2017. Redefinition of agroforestry. In Multifunctional Agriculture – Achieving Sustainable Development in Africa. Academic Press. San Diego, California.

LLORENTE, M.; ROVIRA, P.; MERINO, A.; RUBIO, A.; TURRIÓN, M.; BADIA, D.; ROMANYA, J.; GONZÁLEZ, J.C.J.A.; 2018. The CARBOSOL Database: a georeferenced soil profile analytical database for Spain. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.884517>

MAPA RIESGOS DESERTIFICACIÓN 2009. PROGRAMA DE ACCIÓN NACIONAL CONTRA LA DESERTIFICACIÓN.. MITECO. [https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/biodiversidad/temas/desertificacion-restauracion/pand\\_agosto\\_2008\\_tcm30-177181.pdf](https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/biodiversidad/temas/desertificacion-restauracion/pand_agosto_2008_tcm30-177181.pdf)



MARTÍNEZ, E.; ÁLVAREZ, M.; ARQUERO, Á.; & ROMERO, M.; 2010. Selection of the optimal emplacement in buildings. Emplacement a university building by an Analytical Hierarchy Process (AHP). *Inf. Constr.*; 62(519), 35–45. <https://doi.org/10.3989/ic.08.052>

MCBRATNEY, A. B. B.; MENDONÇA SANTOS, M. L. L.; & MINASNY, B.; 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 1171–23–52. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(0300223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(0300223-4)

MOSQUERA-LOSADA, M. R.; SANTIAGO-FREIJANES, J. J.; ROIS-DÍAZ, M.; MORENO, G.; DEN HERDER, M.; ALDREY-VÁZQUEZ, J. A.; & RIGUEIRO-RODRÍGUEZ, A.; 2018. Agroforestry in Europe: A land management policy tool to combat climate change. *Land use policy* 78 603-613.

OPRICOVIC, S.; & TZENG, G.-H.; 2004. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *Eur. J. Oper. Res.*; 156(2), 445–455. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1)

PEDRO, N.; & QUINTA-NOVA, L.; 2024. GIS-based analytic hierarchy process model for a forest residuals biorefinery site selection. *Agron. Res.*; 22(3), 1254–1265.

REISNER, Y.; DE FILIPPI, R.; HERZOG, F.; & PALMA, J.; (2007). Target regions for silvoarable agroforestry in Europe. *Ecol. Eng.*; 29(4), 401–418. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.09.020>

ROQUE, N.; NAVALHO, I.; ALEGRIA, C.; ALBUQUERQUE, T.; & QUINTA-NOVA, L.; 2017. Assessing forest species biogeophysical suitability by spatial multicriteria analysis: a study case for the Centro region of Portugal. Instituto Politécnico de Castelo Branco.

SAATY, T. L.; 2008. Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Serv. Sciences*. 1(1), 83–98. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>

SANJUÁN, M.E., DEL BARRIO, G., RUIZ, A., ROJO, L., PUIGDEFÁBREGAS, J. & MARTÍNEZ, A. (2014). Mapa de la Condición de la Tierra en España. CSIC-Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. 80. Madrid. NIPO: 280-14-128-4. ISBN: 978-84-491-1395-6

SAURA, S.; & RUBIO, L.; 2010. A common currency for the different ways in which patches and links can contribute to habitat availability and connectivity in the landscape. *Ecography* 33(3) 523-537.



SHUKLA, P.; et al. 2019. IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. In press.

SIERRA, C.A.; MÜLLER, M.; TRUMBORE, S.E.; 2012. Models of soil organic matter decomposition: the SoilR package, version 1.0. *Geosci. Model Dev.* 5, 1045–1060. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-1045-2012>

SNCZI 2022. CARTOGRAFÍA DE ZONAS INUNDABLES. MITECO. <https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/agua/zi-lamina.html>

TOBLER, W.R.; 1988. Resolution, resampling, and all that, in: Mounsey, H., Tomlinson, R.F. (Eds.), *Building Databases for Global Science: The Proceedings of the First Meeting of the International Geographical Union Global Database Planning Project*. Taylor and Francis. 129–137. Hampshire, U.K.

VAN ZANTEN, B. T.; et al. 2014. European agricultural landscapes, common agricultural policy and ecosystem services: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 34.2 309-325.

YIGINI, Y.; OLMEDO, G. F.; REITER, S.; BARITZ, R.; VIATKIN, K.; & VARGAS, R.; 2018. *Soil organic carbon mapping: Cookbook 2nd Edition*. FAO. 220. Rome.