

LIFE AgroForAdapt

Sistemas agroforestales para la adaptación al cambio climático de espacios agrícolas y forestales mediterráneos

LIFE20 CCA/ES/001682

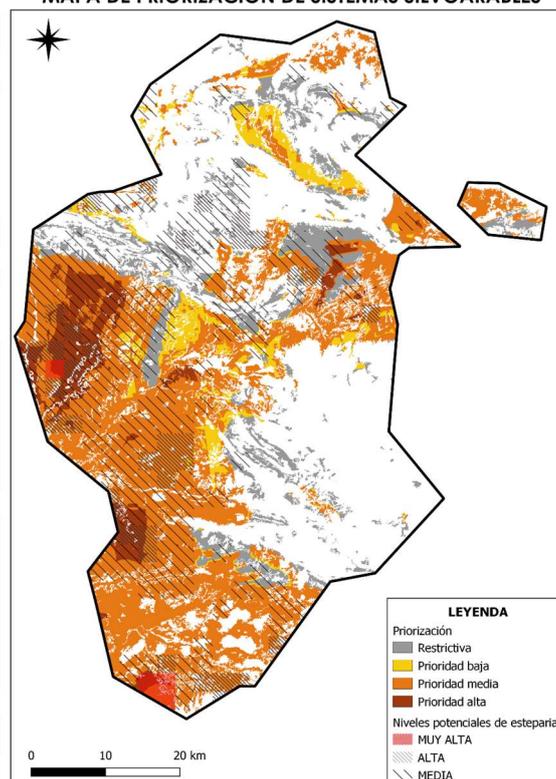
10/2021 – 09/2026

<https://agroforadapt.eu>

Entregable C5.1: Desarrollo de una herramienta para la priorización de áreas donde instalar sistemas silvoarables (PrioSilvAra)

Informe descriptivo de la herramienta

MAPA DE PRIORIZACION DE SISTEMAS SILVOARABLES



12/2024

[Entregable público]

Proyecto LIFE AgroForAdapt: Sistemas agroforestales para la adaptación al cambio climático de espacios agrícolas y forestales mediterráneos 10/2021 – 09/2026

Acción C5. Desarrollo de herramientas para identificar áreas prioritarias donde instalar sistemas agroforestales. C5.1. Desarrollo de una herramienta para la priorización de áreas donde instalar sistemas silvoarables (PrioSilvAra).

Beneficiarios del proyecto: Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya (CTFC; coordinador), Diputació de Barcelona (DiBa), Diputació de Girona (DiGi), Àrea Metropolitana de Barcelona (AMB), Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural de la Generalitat de Catalunya (DACCA), Fundació Emys (Emys), Agresta S. Coop. (Agresta), Agroof, SCOP (Agroof).

Cofinanciadors del projecte: Diputació de Tarragona (DipTa); Agencia del Agua Ródano Mediterráneo Córcega.

Autores del entregable: Pilar Durante¹, Beatriz de Torre¹, Lucía Yáñez¹, Jaime Coello²

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

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

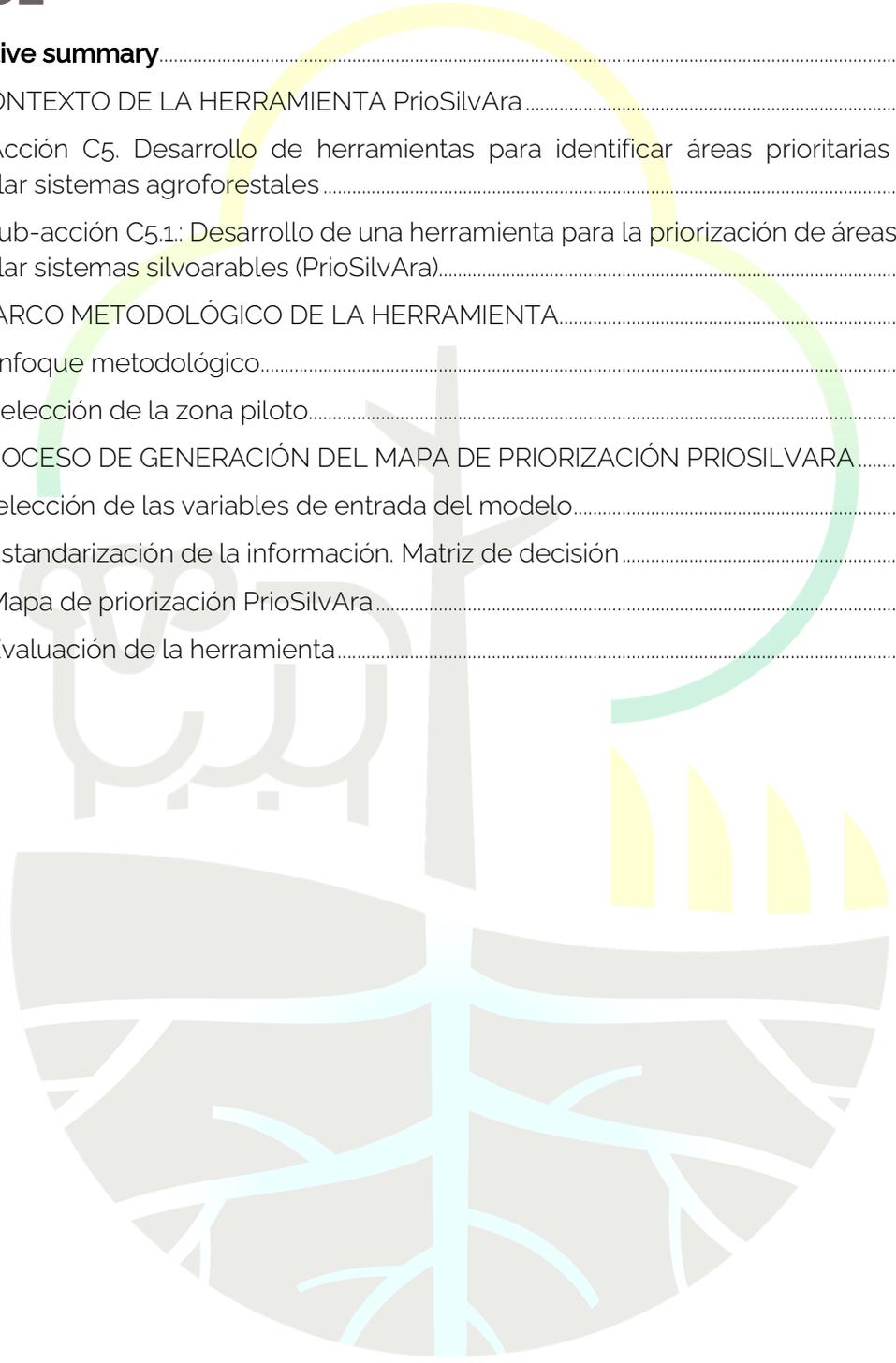
El proyecto LIFE AgroForAdapt (LIFE20 CCA/ES/001682; 10/2021 – 09/2026) está financiado por el programa LIFE de la Unión Europea

<https://agroforadapt.eu>

Esta publicación refleja únicamente el punto de vista de los autores. La Comisión Europea/CINEA no es responsable del uso que pueda hacerse de la información que contiene.

ÍNICE

Executive summary	4
1. CONTEXTO DE LA HERRAMIENTA PrioSilvAra.....	5
1.1. Acció C5. Desenvolupament de eines per identificar àrees prioritàries on s'instal·laran sistemes agroforestals.....	5
1.2. Sub-acció C5.1: Desenvolupament d'una eina per la prioritització de zones on s'instal·laran sistemes silvoarables (PrioSilvAra).....	5
2. MARCO METODOLÒGIC DE LA HERRAMIENTA.....	6
2.1. Enfoque metodològic.....	6
2.2. Selecció de la zona pilot.....	9
3. PROCESO DE GENERACIÓ DEL MAPA DE PRIORITZACIÓ PRIOSILVARA.....	10
3.1 Selecció de les variables d'entrada del model.....	11
3.2. Estandarització de la informació. Matriu de decisió.....	14
3.3. Mapa de prioritització PrioSilvAra.....	18
3.4. Evaluació de l'eina.....	20



Executive summary

The simplification of agricultural landscapes degrades soils, affecting key ecosystem services. Agroforestry systems can reverse this trend by improving climate change adaptation and diversifying productivity, with various co-benefits including soil, water and biodiversity protection. **PrioSilvAra**, is a tool developed to identify priority areas for implementing silvoarable systems in Mediterranean zones, focusing on the conservation and improvement of soils, and the restoration of the network of ecological corridors.

The following digital cartographic variables were used in this tool:

- Vegetation variables: Land use and land cover, ecological connectivity, tree cover density
- Soil variables: Depth to roots, soil erosion, storage and potential sequestration of soil organic carbon, potential nitrate contamination, river flows, flood zones
- Climate variables: climate scenarios, bioclimatic variables, land condition map, desertification risk, potential fluvial flood risk map
- Restrictions on Natura Network: presence of steppe birds

The result is a prioritization map (high, medium, low) with a resolution of 100 m, obtained through an GIS-based Analytical Hierarchy Process (AHP) model based on weighting criteria. This tool prioritizes areas with lower habitat connectivity and SOC content, as well as higher potential for nitrate contamination, soil erosion, and desertification risk. It has been applied on the pilot area of Burgos (Castilla y León, Spain) where there are 7,150 km² of target agricultural land and is replicable in other regions to support sustainable agroforestry deployment at province or county level.

The main outcome of this tool is the identification of 10% of agricultural land as "High priority", 64% as "Medium priority", 9% as "Low priority" and the remaining 17% correspond to areas where silvoarable agroforestry is not technically viable.

1. CONTEXTO DE LA HERRAMIENTA

PrioSilvAra

1.1. Acción C5. Desarrollo de herramientas para identificar áreas prioritarias donde instalar sistemas agroforestales

El objetivo de esta acción es el desarrollo de tres herramientas de ayuda a la decisión en la selección de áreas prioritarias para instalar sistemas agroforestales (silvoarables y silvopastorales) y para diseñar, gestionar y monitorear a largo plazo sistemas silvoarables. El objetivo en todos los casos es optimizar los beneficios de estos sistemas desde el punto de vista de la adaptación al cambio climático y la provisión de servicios ecosistémicos incluyendo la mitigación.

Este entregable se centra en la sub-acción C5.1 que contempla la descripción de una de las herramientas: PrioSilvAra, herramienta para la priorización de áreas donde instalar sistemas silvoarables.

Estas herramientas pueden ser utilizadas como apoyo a las propuestas de cambios normativos para el fomento de sistemas silvoarables (acción C6.2) y de fomento logístico de estos sistemas (acción C7.2)

1.2. Sub-acción C5.1.: Desarrollo de una herramienta para la priorización de áreas donde instalar sistemas silvoarables (PrioSilvAra)

El objetivo principal de esta sub-acción es crear una herramienta de ayuda a la identificación de zonas en las que la promoción de sistemas silvoarables sería especialmente estratégica desde el punto de vista de la adaptación al cambio climático y la conservación de la biodiversidad. Esta herramienta resulta de gran utilidad para profesionales y entidades involucradas en la gestión y planificación territorial y en el diseño e implementación de marcos de ayudas a nivel provincial y comarcal.

A continuación, se detalla la descripción de esta herramienta.

2. MARCO METODOLÓGICO DE LA HERRAMIENTA

2.1. Enfoque metodológico

Dado el objetivo de esta sub-acción, como paso previo para establecer el marco metodológico se hizo una valoración de diferentes metodologías aplicables a este estudio. De entre ellas, destacaron las siguientes enfocadas a la evaluación de alternativas:

- Métodos basados en sumas ponderadas (Weighted Linear Combination, WLC). Combina los valores de diferentes criterios ponderados según su importancia relativa. Se puede llevar a cabo mediante herramientas de análisis espacial de sistemas de información geográficas (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 (TOPSIS y VIKOR). 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 (Multi-objective Optimization). Este método resulta muy adecuado para problemas donde los objetivos son conflictivos (por ejemplo, costo 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 para personas no expertas.
- Métodos de aprendizaje automático (Machine Learning). Utiliza algoritmos de aprendizaje automático (e.g., Random Forest, SVM, 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, 2008¹). 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 AHP es que permite medir la consistencia del decisor al emitir sus juicios. Este método proporciona un marco sólido para decisiones complejas, aunque presenta una simplicidad moderada. Por lo que este enfoque es ampliamente utilizado en temas como la planificación territorial, la gestión de riesgos, la selección de sitios y la evaluación ambiental.

¹ SAATY, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. International journal of services sciences, 1(1), 83-98

De entre estas diferentes metodologías, se valoró aquellas que cumplieran con las siguientes premisas:

- establecer multicriterio, no solo entre las variables, si no también dentro de cada variable
- integrar los resultados en un SIG para el análisis y visualización espacial.
- simplicidad en el procedimiento, para una mejor replicabilidad

Por lo tanto, debido a la mayor adecuación de la metodología con la finalidad de la herramienta, se seleccionó el proceso de análisis jerárquico combinado con sistemas de información geográfica (**GIS-based Analytical Hierarchy Process (AHP)**) para la generación del mapa de priorización de áreas donde instalar sistemas silvoarables. El resultado de la aplicación de este método permite abordar problemas de toma de decisiones en la priorización que integren datos geoespaciales y múltiples criterios-subcriterios. Así mismo, al poder ser integrado directamente en un SIG, este método puede ser utilizado en programas libres y de código abierto como el software QGIS.

El esquema o marco metodológico aplicado en la obtención del mapa final se basó en el modelo jerárquico con base SIG, compuesto por los siguientes pasos clave (los cuales se visualizan en la Figura 1:):

1. Definir la jerarquía del problema:

Una vez establecidos los objetivos precisos para llevar a cabo la instalación de un sistema silvoarable, se identificaron y recopilamos todas las variables de entrada para la decisión de problema. Esta información fue recopilada en formato digital para poder ser integrada en un GIS y, tras su homogeneización, poder ser comparada para su selección final.

2. Identificación de criterios.

Dentro de este paso, se realizó la selección de los criterios o variables de entrada más relevantes para nuestra zona piloto. Una vez seleccionadas, se establecieron las restricciones y alternativas asociadas a las diferentes decisiones. Para ello, cada criterio o variable se categorizó en diferentes clases en base a sus valores específicos. Tanto las variables como su categorización (criterios/alternativas) se plasmaron en una matriz de decisión para poder realizar la comparación par a par y establecer las reglas de decisión según el nivel jerárquico asignado.

3. Calcular los pesos inter e intravariabes y verificar la consistencia.

Las reglas de decisión se normalizaron en valores para asignar los pesos de priorización tanto entre las variables como dentro de cada una, y construir la estructura de la jerarquización final. Es decir, dar prioridad a determinadas alternativas que aumenten o disminuyan el valor base de la ponderación. Según este método, la estimación de pesos propuestos ha de ser consistente, por lo que se realizó un análisis de sensibilidad para valorar la distribución y coherencia de esta distribución de pesos. Este análisis contrasta la afección de los cambios de los pesos en los resultados del método. Estos resultados sirven para retroalimentar de nuevo los pesos de la matriz de decisión, siendo este proceso iterativo hasta conseguir el resultado óptimo.

4. Integrar los resultados en un GIS para análisis espacial.

La utilización de capas digitales o variables temáticas georeferenciadas permitió la combinación de las mismas para generar un mapa final, fruto de la combinación de los valores específicos de cada capa. Para ello, las capas fueron previamente estandarizadas (proyección uniforme, resolución común...) y normalizadas sus leyendas en valores comparables. Posteriormente, se les asignó los pesos de ponderación establecidos en las reglas de decisión mediante la herramienta SIG.

Esto permitió la generación de una salida gráfica (mapa), contribuyendo a una mejor interpretación de los resultados en base a una leyenda general. Así mismo, se redefinieron y ajustaron los límites resultantes para obtener una mejor coherencia espacial. Esta visualización espacial del resultado es primordial en esta herramienta, permitiendo su integración en los procesos de toma de decisiones para la instalación de dichas áreas de sistemas silvoarables.

El resultado fue un mapa con una resolución de espacial de 100 m de tamaño de píxel, para identificar zonas potenciales de implementación de nuevos sistemas silvoarables.

Para la generación del mapa se utilizaron los softwares libres y de código abierto como R Statistical y QGIS.

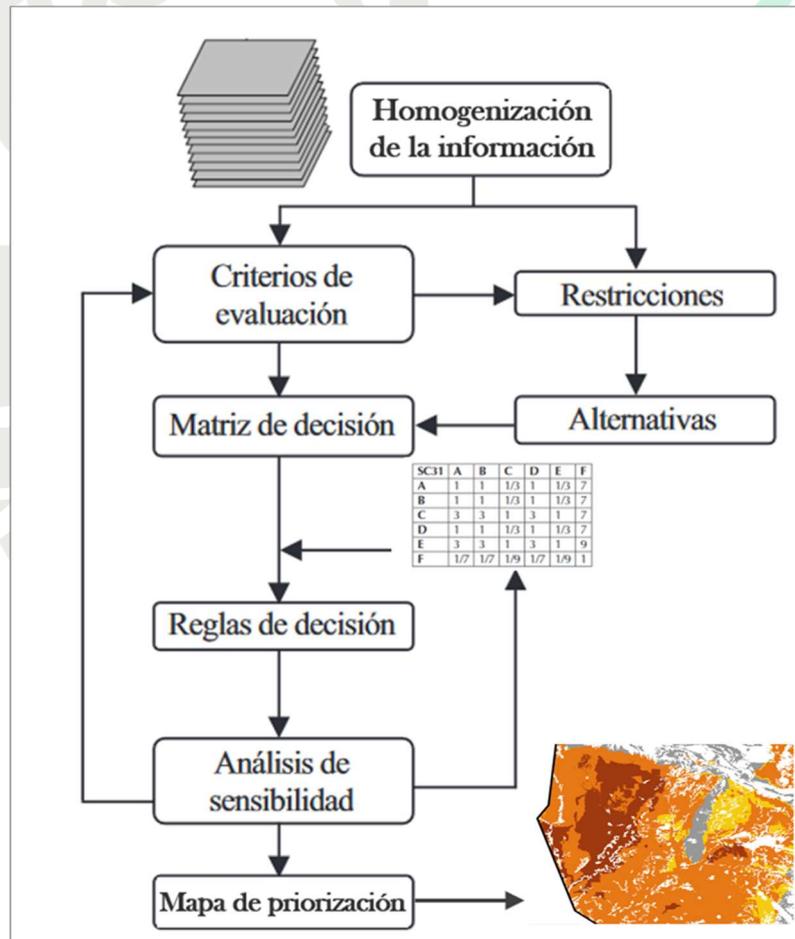


Figura 1: Esquema del marco metodológico de la herramienta

2.2. 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 comarcas de predominio agrícola, comarcas 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 Km², lo que supone un 2,76% del territorio nacional y el 14,95 del regional.

Su geografía (con un rango altitudinal de los 700 m a los 2.000 m) incluye montañas como la Sierra de la Demanda, mesetas como la Paramera del Cerrato y valles fluviales del río Ebro. Es clave en la cuenca del Duero, con ríos como el Arlanza y el Arlanzón. Predomina un clima continental con inviernos fríos y veranos secos. Las temperaturas medias oscilan entre los -10°C alcanzados en los meses invernales y los 35°C. La precipitación media anual se encuentra en 600 mm y 1.200 mm. La vegetación forestal predominante son los bosques de encinas, robles y hayedos. Espacios protegidos como las Hoces del Alto Ebro y Ojo Guareña reflejan su riqueza natural, aunque enfrenta riesgos como la despoblación y el cambio climático.



Figura 2: Localización de la zona piloto

3. PROCESO DE GENERACIÓN DEL MAPA DE PRIORIZACIÓN PRIOSILVARA

Se describen a continuación las fases de generación de la herramienta PrioSilvAra durante el período de ejecución del proyecto, indicando la duración aproximada de cada fase en base al cronograma previsto (Figura 3):

FASE 1 (apartados 2.2 y 3.1)

- Selección de zona de estudio (apartado 2.2)
- Generación de criterios y variables
- Selección de variables

FASE 2 (apartado 3.2)

- Categorización y priorización de variables. Matriz de decisión
- Ratificación de reglas de ponderación
- Versión BETA de la herramienta

FASE 3 (apartado 3.2)

- Análisis de sensibilidad
- Reglas de decisión contrastadas (criterio experto, nuevas fuentes)
- Integración de nuevos criterios de evaluación (variables): escenarios climáticos y de adaptación al CC

FASE 4 (apartado 3.3)

- Nueva categorización de variables
- Nueva priorización y ratificación de reglas de ponderación
- Mapa final de priorización de sistemas silvoarables
- Redacción del documento final

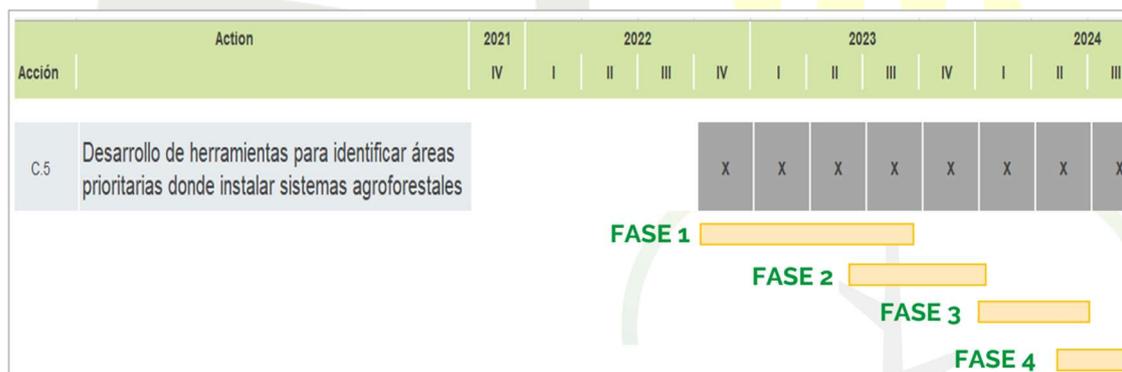


Figura 3: Evolución de la herramienta en base al cronograma previsto

3.1 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 influyentes en la instalación de un sistema silvoarable.

Dado que el desarrollo de esta herramienta se basa en su posible replicabilidad en otra región del territorio mediterráneo europeo, esto ha promovido la utilización de variables internacionales (europeas, principalmente). Dichas variables fueron 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 identificadas fue dividido en 4 categorías relacionadas con diferentes aspectos medioambientales:

- Cobertura de vegetación
- Suelo y geología (riesgo de contaminación de acuíferos)
- Escenarios climáticos
- Restricciones en Red Natura

En la siguiente tabla se detallan todas las variables identificadas y recopiladas, divididas por categorías, con una breve descripción, 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 original	Valoración categórica
1. Cobertura de vegetación				
<ul style="list-style-type: none"> Land cover: usos y coberturas de suelo con mayor potencial para la plantación de arbolado: <ul style="list-style-type: none"> - 211 cultivos de secano - 212 permanentes regados - 221 agricultural areas - Permanent crops - Vineyards - 231 pasto - 242 (patrones de cultivo complejos) - 243 (agricultura con áreas significativas de vegetación natural) - 244 agroforestería 		CORINE 2018	100 m	0= resto 1= todas
<ul style="list-style-type: none"> Conectividad de hábitats: <ul style="list-style-type: none"> - Mapa de resistencias 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 suelo. - Distancia de dispersión: priorización 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 SAS en las zonas prioritarias resultantes permitirá realizar la función de puente para la conectividad entre las áreas de hábitat de bosque. 		Elaboración propia	100 m	0<125 1>=125*
<ul style="list-style-type: none"> Tree cover density: Densidad de cobertura arbolada (%) en zonas de uso agrícolas densidad <1% 		COPERNICUS tree cover density (2018)	100 m	0= resto 1=densidad <=1%
2. Características del suelo.				
<ul style="list-style-type: none"> Profundidad para raíces arbóreas (Depth to roots), Profundidad limitante para el enraizamiento de arbolado. 		ESDB v2.0 (2013)	1 km	1= Sin obstáculo 0-80 cm 2= Obstáculos 60-80 cm 3= Obstáculos 40-60 cm 4= Restringido (obstáculos <40cm)
<ul style="list-style-type: none"> Erosión laminar: pérdidas de suelo (modelo RUSLE) para la determinación de erosión laminar y en regueros el cual puede ser mitigado por la plantación de arbolado. 		INES (2018)	25 m	0<10 t/ha/año 1>=10 t/ha/año*
<ul style="list-style-type: none"> Balance entre el COS y su potencial de absorción. Se ha combinado el almacenamiento y distribución espacial de la concentración del carbono orgánico del suelo (COS), con su capacidad potencial de secuestro en los 30 cm superficiales. 		Elaboración propia	90 m	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
3. Contaminación de acuíferos				
<ul style="list-style-type: none"> Nitratos: Zonas vulnerables a la contaminación por nitratos de origen agrario, con alto riesgo de lixiviación a los acuíferos. 		ITACYL (2023)		0= resto 1= nitratos
<ul style="list-style-type: none"> Flujos de ríos. Identificación de los cursos de agua por su influencia con la dispersión de nitratos 		Demarcación Hidrográfica del Duero	1:25.000	-----
<ul style="list-style-type: none"> Zonas de inundación (SNCZI). Periodos de retorno de T=100 y T=500 		MITECO	125.000.	-----

4. Escenarios climáticos

- **Mapa de Condición de la Tierra (2000-2010):**

Mapa de tendencias de la respuesta de la vegetación al curso del tiempo y a la variación climática interanual.

CSIC-Zonas Áridas (2014)

1 km

1 = Degradando
2 = Fluctuando
3 = Aumentando
4 = Estático

- **Variables bioclimáticas:** Variables bioclimáticas bajo diferentes escenarios de emisiones basadas en los Shared Socio-economic Pathways (SSPs), definidos en el Sexto Informe de Evaluación (AR6). Las variables bioclimáticas se calcularon a partir de una serie de variables climáticas consistentes en una serie histórica de valores medios mensuales de temperatura máxima y mínima (°C) y de precipitación (mm) generados a partir de 10 modelos climáticos globales (MCG) para el periodo histórico (1950-2014) y para escenarios futuros consistentes en tres periodos de tiempo ('2021-2040', '2041-2060', '2061-2080') y cuatro SSPs ('126', '245', '370', '585'). Los datos de T^a y precipitación a partir de los cuales se generaron estas variables bioclimáticas fueron generados por Fundación para la investigación por el Clima (FIC, <https://www.ficlma.org/>).

- o Seleccionada **bio4** = *Temperature seasonality (standard deviation *100)*: relacionada con riesgo de desertificación

1 <= 579.4 baja
2 = 579.4-642.08
3 > 642.08 alta

- o Seleccionada **bio12** = *Total (annual) precipitation*: relacionada con riesgo de desertificación

1 > 23.48
2 = 23.48-19.09
3 < 14.95

- **Escenarios PNACC 2018.** escenarios climáticos Representative Concentration Pathways (RCPs) definidos en el Quinto Informe de Evaluación (AR5). Los datos disponibles se nutren principalmente de dos fuentes: proyecciones puntuales de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y proyecciones en rejilla procedentes de la iniciativa internacional Euro-CORDEX.

AdapteCCa

5 km

- **Riesgo de desertificación.** Programa de Acción Nacional contra la Desertificación (PAND) 2009

MITECO (2009)

1:50.000

- **Mapa de riesgo potencial significativo de inundación fluvial** asociadas a periodos de retorno de T=500 y T=100. Información obtenida de estudios llevados a cabo por las autoridades competentes en materia de aguas, ordenación del territorio y Protección Civil.

MITECO-SNCZI (Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables) (2022)

1:25.000

5. Restricciones Red Natura 2000

- **Aves esteparias:** zonas con 4 niveles de sensibilidad ambiental para las aves esteparias. No considerada para la priorización, pero sí a nivel informativo, ya que se ha de considerar el diseño de plantación apropiado según la presencia de esteparias, al igual que evitar altas densidades de plantación.

ITACYL (2021)

1= muy alta
2= alta
3= media

Recomendación: al no haber restricciones específicas en la zona de estudio, se recomienda ponerse en contacto con la Dirección General de Medio Ambiente de la comunidad autónoma para que marque las directrices de los proyectos a desarrollare dentro de zonas de RRNN o hábitats protegidos



3.2. Estandarización de la información. Matriz de decisión

El siguiente paso fue realizar la homogenización y estandarización de todas las variables identificadas para que puedan ser comparables e integradas en modelos de análisis o toma de decisiones. Este proceso es clave para el posterior análisis e interpretación espacial de los resultados, especialmente cuando se integran diferentes tipos de variables (p.ej., vegetación, suelo, clima) con escalas o unidades distintas. 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: conversión y reclasificación a números enteros.
- Categorización de valores según la escala de priorización, con el fin de definir tanto las restricciones como las alternativas asociadas a las diferentes decisiones, teniendo en el rango inicial de valores de las diferentes variables (0-restrictivo, 1-baja hasta 4-alta). Sin embargo, para simplificar la interpretación de los resultados, el mapa final resultante del proceso, se redujeron 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 0.

Para la generación de las variables, así como para el procesado de las mismas, y siguiendo el principio de replicabilidad, se han utilizado los softwares libres y de código abierto R Statistical y QGIS.

Tras el análisis de la distribución espacial de las variables, así como la interpretación de sus valores, se seleccionaron las siguientes variables más significativas en nuestra zona de piloto, contribuyendo a los inputs finales de la matriz de decisión y a la delimitación de las unidades del mapa final fueron (Figura 4):

- 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:
 - o B4: relacionada con la temperatura
 - o B12: relacionada con la precipitación

En la siguiente figura se observa la distribución espacial de sus valores,

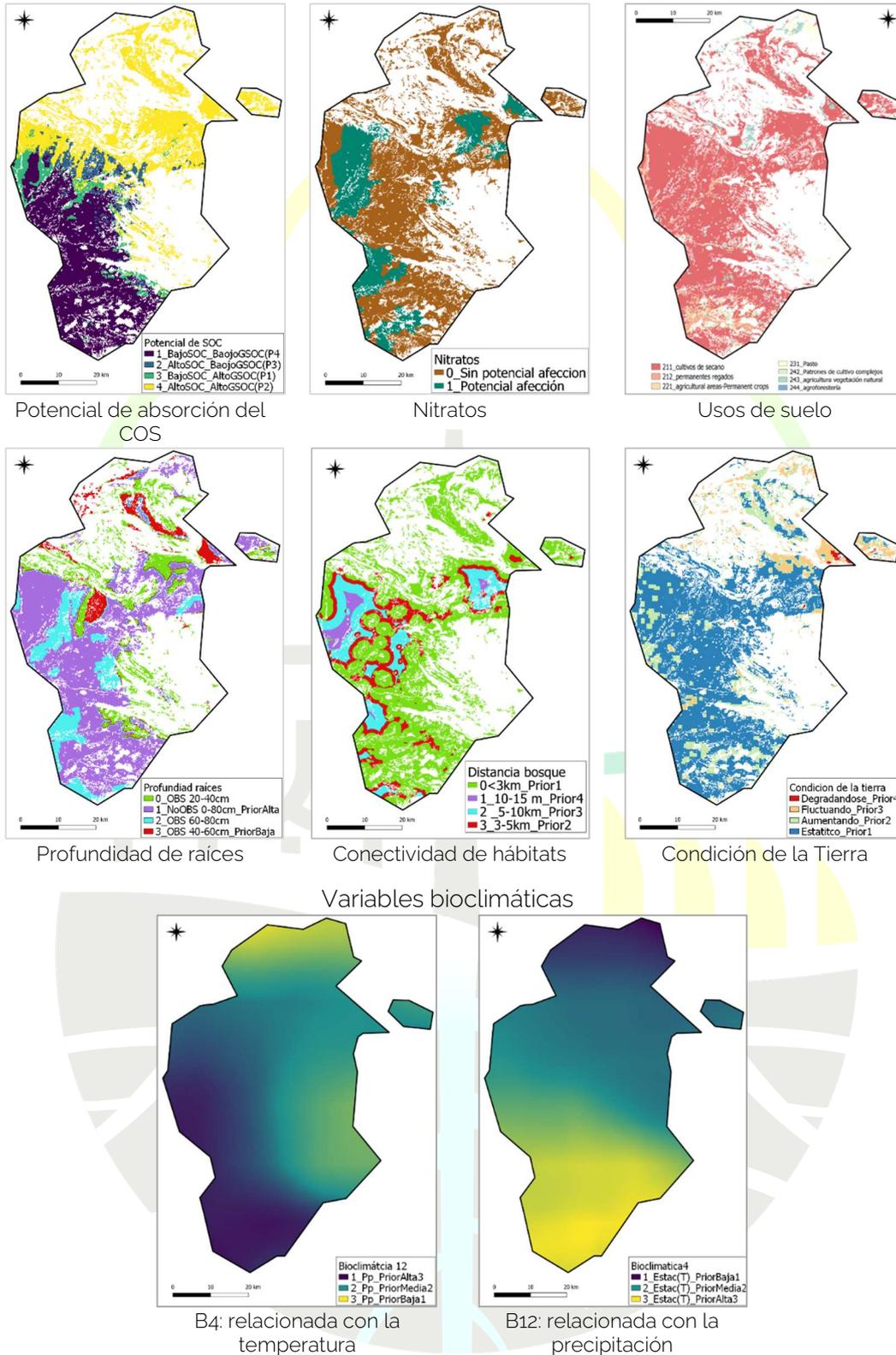


Figura 4: Variables finales seleccionadas para la implementación de la herramienta en la zona piloto

En base a la importancia de cada variable seleccionada con respecto al resto, se estableció un esquema jerárquico con la asignación de pesos o ponderaciones a cada variable, establecido por conocimiento experto aplicado a la zona piloto. Así mismo, los valores de cada variable fueron categorizados según la escala de priorización, con el fin de definir tanto las restricciones como las alternativas asociadas. Por tanto, la priorización de las alternativas está condicionadas por el valor de ponderación de la variable. Dado el gran potencial para la restauración medioambiental de los sistemas silvoarables, para esta categorización, se ha seguido la premisa 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: 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	Rest restrictivo 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

A pesar de que algunas variables incluyen hasta 4 niveles de priorización en función del rango de sus valores, el mapa final resultante se redujo a tres categorías (priorización baja, media y alta) con el fin simplificar la interpretación de los resultados,

En relación a este esquema jerárquico se estimó la consistencia los criterios siguiendo la metodología del proceso Analytical Hierarchy Process (AHP) propuesto por Saaty (2008). Para ello, se calculó la siguiente 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.

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 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 (w_i) 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). En este estudio, adoptamos un valor umbral estándar de $CR = 0.10$, ampliamente reconocido en la literatura como medida de consistencia para criterios con aplicaciones del AHP. Si $CR < 0.10$, se considera que la matriz de comparación por pares tiene una consistencia aceptable.

Según el análisis de consistencia, la ratio obtenida ha sido de **CR= 0.07 (<0.10)**, lo que significa que matriz de comparación por pares es consistente y que los valores de los pesos calculados son válidos y pueden ser utilizados.

Dado que la diferente distribución de los pesos de ponderación altera el resultado del análisis, se realizó un "análisis de sensibilidad" para determinar cómo afectaban diferentes alternativas de entrada (criterios de evaluación y preferencias) al mapa de prioridades final.

El resultado final es un mapa (100 m de tamaño de píxel) con diferentes niveles de priorización para la implementación de los sistemas silvoarables en la provincia de Burgos.

3.3. Mapa de priorización PrioSilvAra

El resultado final de esta herramienta es la salida gráfica o mapa de priorización PrioSilvAra, con una resolución espacial de 100 m de tamaño de píxel (Figura 5.). Este mapa representa, para la superficie objeto de la herramienta (categorías CORINE mencionadas en la Tabla 1 - 715.000 ha) la categorización de niveles de prioridad (exclusión, baja, media y alta), con la superposición (áreas con trama) de la información de los niveles de presencia de aves esteparias. Las zonas de exclusión o restrictivas (en gris) representan áreas con limitaciones significativas para implementar sistemas silvoarables, debido fundamentalmente a su inviabilidad edáfica (suelos muy rocosos o poco profundos). El resto representan zonas con diferentes niveles de aptitud o conveniencia para el desarrollo de estos sistemas, siendo las áreas en rojo las más favorables.

Como se puede observar en el mapa, las áreas predominantes son las de prioridad media, con igualdad de superficies entre las zonas de baja y alta prioridad. Las zonas con **prioridad alta** se encuentran concentradas principalmente en el oeste y suroeste. Estas zonas combinan un gran potencial para mejorar la conectividad de hábitats y el contenido de COS, y atenuar la contaminación de los acuíferos por nitratos, la erosión de suelo y el riesgo de desertificación. Estas zonas suponen un total de 69.570 (10% de la superficie objeto), siendo el resultado predominante las zonas de prioridad media (459.308 ha; Tabla 4.). Las áreas de **exclusión** o **restrictivas** representan el 17% de superficie objeto (125.199 ha).

La superposición de tramas para los niveles potenciales de presencia de esteparias sugiere una posible compatibilidad con sistemas silvoarables, siempre y cuando se adapten a la presencia de estas tanto el diseño como la densidad de plantación, para que sirvan de refugio sin limitar su transitabilidad (es decir, amplios marcos de plantación para evitar altas densidades, sin destrucción de su hábitat).

En la siguiente tabla se muestra la distribución por superficie para la provincia de Burgos de la categorización de los niveles de prioridad resultantes, con la superficie correspondiente por presencia de esteparias,

Tabla 4: Distribución superficial de priorización de zonas aptas para la instalación de sistemas silvoarables y su porcentaje correspondiente de zonas con sensibilidad ambiental para las aves esteparias.

Priorización	Área (ha)	Sensibilidad ambiental para las aves esteparias			
		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%
Total	714.950				

El mapa resultante quedará alojado en el portal web del proyecto, de carácter público, para proporcionar información a diferentes grupos del sector interesados

MAPA DE PRIORIZACION DE SISTEMAS SILVOARABLES

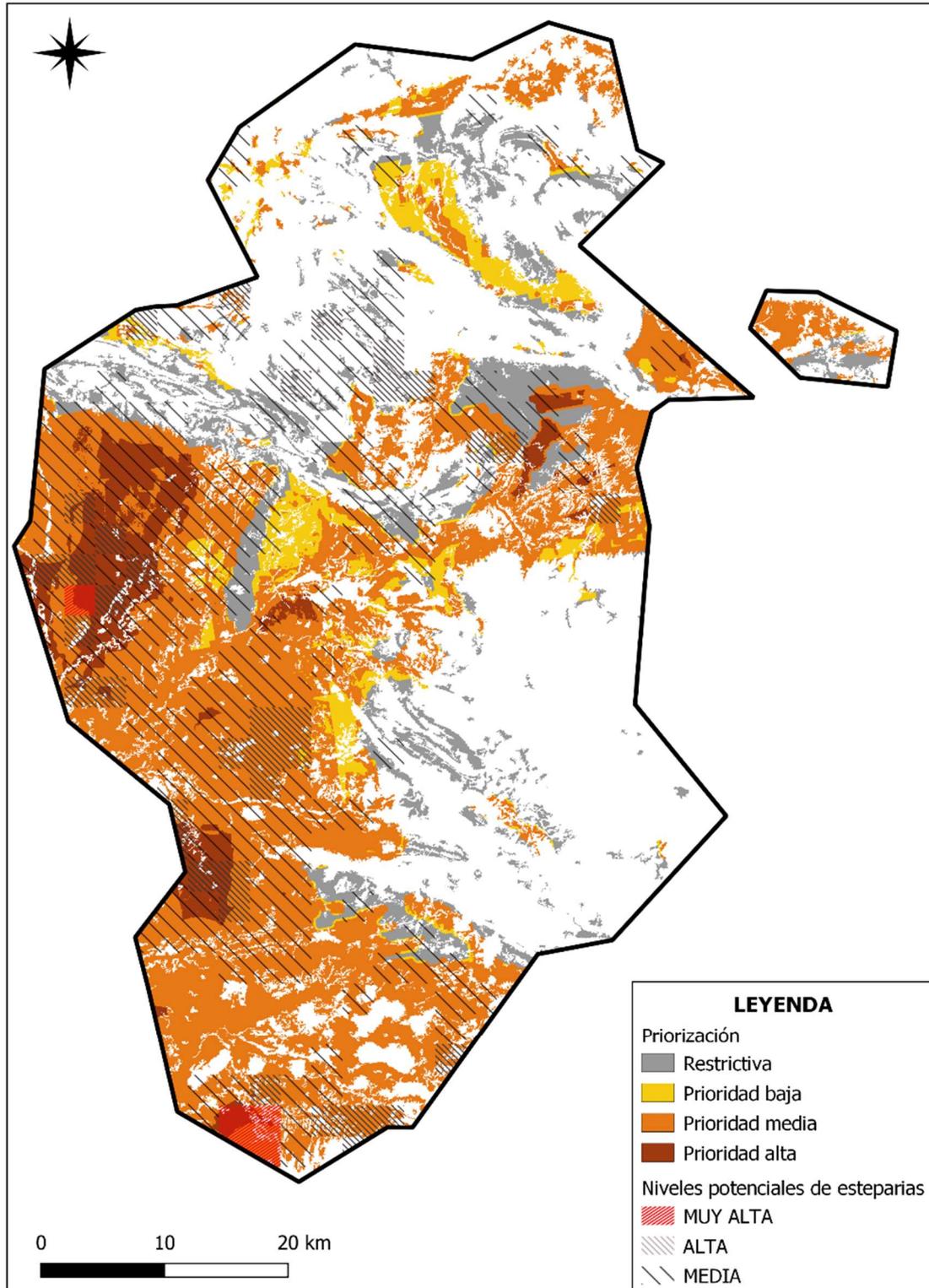


Figura 5: Mapa de priorización resultante para la instalación de sistemas silvoarables

3.4. Evaluación de la herramienta

La selección tan amplia de variables influyentes en el interés de los sistemas silvoarables proporciona versatilidad y replicabilidad a esta herramienta. Estas variables han sido seleccionadas en base a fuentes disponibles y aplicables a todo el territorio europeo mediterráneo, para poder ser comparables los resultados. Sin embargo, algunas de éstas han sido sustituidas por variables locales cuando la calidad, resolución y actualización de la información lo requerían. 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. Sin embargo, esta herramienta no es automática y requiere de conocimiento experto para la selección de aquellas variables específicas para cada zona.

A lo largo de las decisiones de inclusión de determinadas variables, se adoptaron ciertos criterios que pueden ser considerados en otros contextos geográficos, como es la exclusión de usos y coberturas de suelo 242 (patrones de cultivo complejos) o 243 (agricultura con áreas significativas de vegetación natural), ya que hay algunos estudios que no consideran estos usos como potencialmente viables para arbolado).

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. Por ello, por motivos de escala se pierde singularidad de priorización, que es importante en algunas zonas, especialmente para el caso de amortiguación de zonas inundables y restauración de vegetación riparia con sistemas silvoarables. Estas zonas quedaron relegadas a unidades lineales de baja representatividad a la escala del mapa, pero es necesario incluirlas cuando se descienda en la regionalización de la delimitación de las unidades.

En cuanto a la distribución de superficies por categoría de prioridad (Baja, Media, Alta) destaca la predominancia de la categoría "Media", con casi 2/3 de la superficie agraria, mientras "Alta" y "Baja" representan tan solo el 10% y el 9%, respectivamente de la superficie agraria en estudio, mientras que "Excluida" supone el 17%. Este resultado tiene dos conclusiones clave: i) la superficie de prioridad alta queda claramente identificada, con casi 70.000 ha en las que sería especialmente importante plantear una estrategia de restauración 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.

Como posibles mejoras de esta herramienta, sería deseable automatizar y sistematizar los criterios y alternativas de cada variable, así como la ponderación de toda la batería de variables, ya que la gran variabilidad en la influencia de los factores medioambientales implica valores muy cambiantes según las diferentes zonas de estudio.

Por último, este mismo proceso puede emplearse para priorizar la instalación de los sistemas silvoarables bajo diferentes objetivos de gestión (mitigación o adaptación al cambio climático) o bajo las distintas categorías (priorizando variables asociadas a la vegetación, al suelo o al clima, en cada caso).

En definitiva, esta herramienta puede resultar muy útil como apoyo a las propuestas de cambios normativos para el fomento de sistemas silvoarables (acción C6.2) y de fomento logístico de estos sistemas (acción C7.2), así como a la toma de decisiones en la planificación y gestión territorial a escala provincial y comarcal.