Cuad. Soc. Esp. Cienc. For. 50(1): 251-270 (2024)
Doi: https://doi.org/10.31167/csef.v0i50.19952
Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales
Acceso abierto disponible en http://secforestales.org/publicaciones/index.php/cuadernossecf/index

# ModERFoRest, una útil herramienta para orientar el tratamiento de masas mixtas en su adaptaciónal cambio climático. Caso de Retiendas (Guadalajara)

## ModERFoRest, a useful tool to guide treatments in mixed stands for climate change adaptation goals. The case of Retiendas (Guadalajara)

Alonso Ponce R.[*1, 2]; López-Senespleda, E.[2, 3]; Gómez-Sanz, V.[4]; Serrada Hierro, R.[5]

[1] *Fora Forest Technologies SLL.*

[2] *Instituto Universitario de Investigación Gestión Forestal Sostenible.*

[3] *Instituto de Ciencias Forestales (ICIFOR-INIA), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).*

[4] *Centro para la Conservación de la Biodiversidad y el Desarrollo Sostenible (CBDS), ETS de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural, Universidad Politécnica de Madrid,*

[5] *Sociedad Española de Ciencias Forestales.*

[*] Autor de correspondencia: rafa.alonso@fora.es

## Resumen

La aplicación informática ModERFoRest (*ModelingEnvironmentalRequirementsfor Forest Restoration*), distribuida como software gratuito para su difusión a la comunidad científica y técnica desde la página del INIA-CSIC, integra y facilita el uso de la información derivada de los estudios de Autoecología de Especies Forestales iniciados en la Sección de Ecología Forestal y Tipos de Monte del Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias. Dicha información engloba casi 3000 puntos de muestreo, incluyendo analíticas edáficas, relativas a 22 taxones.

Entre las utilidades mencionadas en el manual de ModERFoRest se indica: *«Para proponer tratamientos en masas existentes: información sobre la marginalidad de la especie o especies que pueblan el rodal y diagnóstico sobre su estabilidad; ambas cuestiones en la situación actual y para posibles escenarios de cambio climático»*.

Se presenta un caso práctico, una repoblación de cinco especies en masa mixta situada en Retiendas (Guadalajara), a una altitud media de 1000 m, con una edad del orden de 50 años. Contando con datos edáficos, se trata de evidenciar la utilidad de ModERFoRest para orientar los tratamientos selvícolas relacionados con la composición específica en el rodal frente a hipótesis de cambio climático.

Se han utilizadolos modelos climáticos del Atlas Climático Ibérico de la AEMET como representativo de las normales meteorológicas actuales, y los de WordClim, calibrados con los de la AEMET, para el escenario climático futuro SSP2-4.5 (~2º de aumento medio de la temperatura del planeta para finales de siglo) en la década 2040-2060.

Los índices de idoneidad e índices de marginalidad de las cinco especies repobladas (*Pinus sylvestris*, *Pinus nigra*, *Pinus pinaster* ssp. *mesogeensis*, *Quercus pyrenaica* y *Quercus ilex* ssp. *ballota*) en las dos hipótesis de cálculo, obtenidos para la localización estudiada permiten disponer de información especialmente útil para estimar el cambio que se puede esperar en la calidad de estación y para la selección y aplicación del mejor tratamiento selvícola que garantice la estabilidad ecológica futura de la masa.

**Palabras claves:** *autoecología paramétrica, calidad de estación, índices de idoneidad, índices de marginalidad, limitaciones ecológicas.*

## Abstract

The computer application ModERFoRest (Modeling Environmental Requirements for Forest Restoration), distributed as free software for dissemination to the scientific and technical community from the INIA-CSIC website, integrates and facilitates the use of information derived from autecology studies of forest species initiated in the Department of Forest Ecology and Types of Forests of the IFIE. This information includes nearly 3000 sampling points, including soil analyses, related to 22 taxa.

Among the utilities mentioned in the ModERFoRest manual, it is indicated: *"To propose treatments in existing stands: information on the marginality of the species or species populating the stand and diagnosis of their stability; both issues in the current situation and for possible scenarios of climate change."*

In this work we present a study case, a reforestation of five species in a mixed stand located in Retiendas (Guadalajara), at an average altitude of 1000 m and age about 50 years. Using soil data, the aim is to demonstrate the utility of ModERFoRest to guide silvicultural treatments related to the specific composition in the stand under the hypothesis of different climate change scenarios.

The climatic models of AEMET have been applied for the current situation, and those of WorldClim, calibrated with AEMET's model, for the future climatic scenario SSP2-4.5 (~2ºC average increase in global temperature by the end of the century) in the 2040-2060 decade.

The suitability indices and marginality indices of the five species (Scots pine, Corsican pine,maritime pine,Pyrenean oak and holm oak) in the two calculation hypotheses, obtained for the studied location, provide particularly useful information for estimating the expected change in station quality and for the selection and application of the best silvicultural treatment to ensure the future ecological stability of the stand.

**Keywords:** *parametric autecology, site quality, suitability indices, marginality indices, ecological constraints.*

## 1. Introducción

La presente comunicación se basa en numerosos y extensos antecedentes. El primero de ellos son los estudios de Autoecología de Especies Forestales iniciados, por los profesores Gandullo y Nicolás, en 1963 en la Sección de Ecología Forestal y Tipos de Monte del IFIE (Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias), y continuados y completados en el INIA.En 2015 se termina de recopilar la información para 22 taxones de especies forestales importantes, incluyendo analíticas edáficas de unos 3000 puntos de muestreo. El resumen de este proceso y sus resultados queda expuesto con detalle en López-Senespleda *et al.* (2018).

La importante y extensa base de datos derivada de esta línea de investigación permite la realización de la aplicación ModERFoRest (Alonso Ponce *et al.*, 2021; López-Senespleda *et al.*, 2023), a la que otorga gran fiabilidad y potencia.

Otro antecedente se refiere a la labor de repoblaciones forestales de carácter hidrológico-forestal realizada a lo largo del tiempo por diferentes administraciones en la provincia de Guadalajara, cuyo resumen se puede consultar en Serrada (2017). Entre ellas está el caso de los montes de Retiendas, cuyos datos edáficos figuran en Serrada y Gómez-Sanz (2017), y del que un análisis completo sobre ejecución y resultados se pueden consultar en Serrada *et al.* (2021).

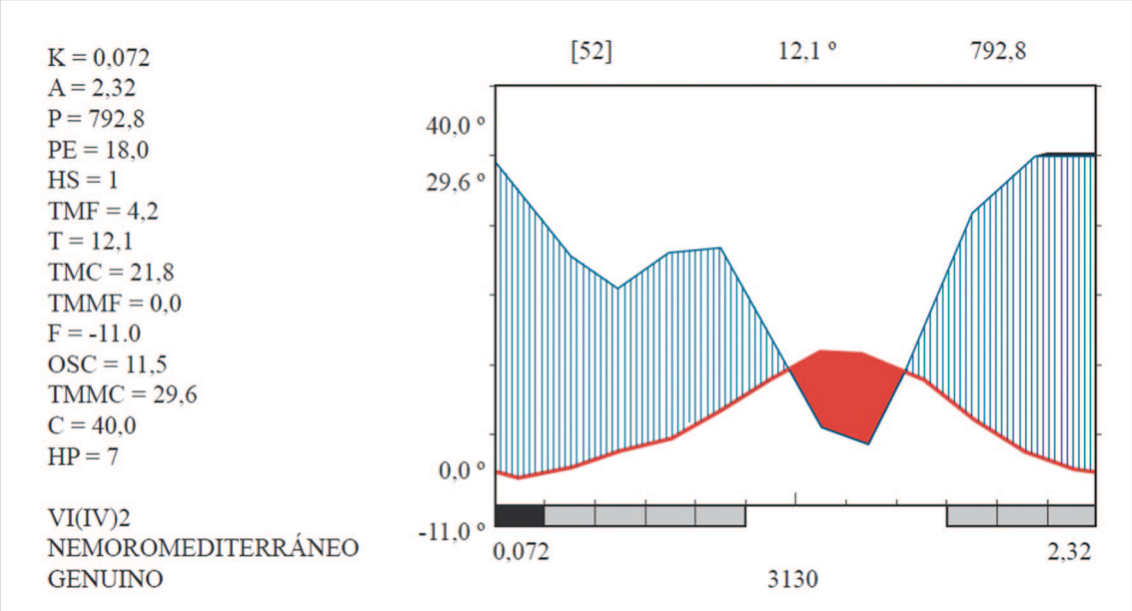


**Figura 1.** Climodiagrama de la estación meteorológica Pantano del Vado (donde; K, intensidad de la aridez; A, duración de la aridez (según Gaussen) en meses; P, precipitación media anual en mm; PE, precipitación estival en mm; HS, período de helada segura en meses; TMF, temperatura media del mes más frío en ºC, T, temperatura media anual en ºC; TMC, temperatura media del mes más cálido en ºC; TMMF, temperatura media de las mínimas del mes más frío en ºC; F, temperatura mínima absoluta en ºC, OSC, oscilación anual de las temperaturas medias mensuales en ºC; TMMC, temperatura media de las máximas del mes más cálido en ºC; C, temperatura máxima absoluta en ºC; HP, período de helada probable en meses).

Finalmente, existe una urgente necesidad de aplicar tratamientos selvícolas, de regeneración y de mejora, con el objeto de reforzar la estabilidad de las masas forestales españolas para adaptarlas a condiciones climáticas cambiantes. Estas masas presentan una amplia diversidad de condiciones estacionales, de estructura y de composición específica (Serrada *et al.*, 2011).

La diversidad de composición específica coincide, muy frecuentemente, con masas mixtas en las que la respuesta de las diferentes especies no es esperable que sean homogéneas. Por este motivo, es importante a la hora de planificar esta gestión adaptativa disponer de herramientas que permitan, con la mejor certidumbre posible, comparar el grado de homologación ecológica de distintas especies a unas condiciones edáficas particulares y a la simulación de distintos escenarios climáticos relativos a una estación determinada.

Esta capacidad la tiene, como se ha expresado en párrafos anteriores, la aplicación ModERFoRest. Uniendo antecedentes, se presenta la aplicación de una herra-

**Tabla 1.** Resumen de las características de los montes repoblados en Retiendas (Guadalajara), Fuente: Serrada *et al.* 2021.

| | |
|---|---|
| **Nombre** | Vallecina, Robledo y Bienes Comunales, nº 100 del CUP de la provincia de Guadalajara |
| **Superficie repoblada** | 421 ha, realizadas entre 1955 y 1964, sobre jarales (*Cistusladanifer*) mediante acaballonado con tracción animal y ahoyados manuales. Densidad inicial de 2.500 pies·ha$^{-1}$ de *Pinus pinaster* y algunos rodales con otras especies. |
| **Litofacies** | Formación de carácter aluvial conocida como raña. De edad miocena, es un material sedimentario detrítico, poco consolidado, no carbonatado, donde destaca una matriz de textura muy heterogénea de tierra fina, rica en óxidos de hierro –color rojizo–, que soporta elementos gruesos de esquistos y cuarcitas. Vulnerabilidad frente a la erosión hídrica y al abarrancamiento, pues a su falta de consistencia, con gran facilidad para el desmoronamiento, se une notable impermeabilidad, que potencia el flujo superficial de agua. Es muy frecuente la presencia de cárcavas, que destacan en el paisaje por el color rojizo. |
| **Fisiografía** | Rango altitudinal desde 900 a 1100 m sobre el nivel del mar, altitud media 1.000 m. Las exposiciones son laderas alternantes de exposición a NW y SE. Las pendientes entre el 15 y el 35% ocupan aproximadamente el 40% de la superficie y las comprendidas entre el 35 y el 55% representan el 30%. |
| **Clima** | Datos procedentes de la estación del Embalse de El Vado, Clima nemoromediterráneo genuino (VI (IV)$_2$) de la clasificación fitoclimática de Allué (1990). Ver climodiagrama en *Fig. 1*. |
| **Suelo** | El componente tierra fina es dominante, pero la elevada presencia de elementos gruesos condiciona aspectos como la fertilidad y la capacidad de retención de agua, que son reducidas. La tierra fina es de textura franca-arcillosa, de lo que se deduce una permeabilidad global escasa, con manifestación frecuente de discontinuidades por cambio en la abundancia de las fracciones más finas. Son suelos deficientemente humíferos. Desde un punto de vista químico, son suelos totalmente descarbonatados, de reacción moderadamente ácida y libres de influencia salina. |

mienta genérica (ModERFoRest) a un caso particular (Retiendas) para estimular su aplicabilidad.

El objetivo de esta comunicación es divulgar el uso de ModERFoRest para fomentar su uso al propósito concreto de planificar la gestión selvícola adaptativa a nivel de rodal.

## 2. Material y métodos

### *2.1 Los montes repoblados en Retiendas*

En la *Tabla 1* se presenta un resumen de las características de los montes repoblados en Retiendas, donde se han tomado los datos climáticos y edáficos para la aplicación práctica de ModERFoRest.

### *2.2 Proceso repoblador y estructura dasométrica de algunos rodales*

Los aspectos más importantes de la *planificación* de la repoblación fueron:

1. Teniendo en cuenta los muy notables procesos erosivos con abarrancamiento y la construcción del Embalse de El Vado, es evidente que el *objetivo* preferente de la repoblación fue la protección hidrológico-forestal en todo el monte.

2. Se consideraron como *especies compatibles* a: *Pinus pinaster*Aiton, Hort. Kew., *Pinus nigra*J.F. Arnold, ReiseMariazell, *Pinus sylvestris*L.ssp. *mesogeensis*, *Quercus ilex*L.ssp. *ballota* y *Quercus pyrenaica*Willd., siendo la especie preferente *Pinus pinaster*.

3. Como *método* de repoblación se aplicaron los dos posibles: plantación de modo generalizado para los pinos y siembras por casillas para encinas (*Quercus ilex* ssp. *ballota*) y rebollos (*Quercus pyrenaica*) (Epifanio Moreno, com. pers.) y, en pendientes muy bajas, siembra por fajas para el pino rodeno (*Pinus sylvestris*L.ssp. *mesogeensis*).

4. Finalmente, dentro de la planificación y en relación con la *densidad inicial*, en plantaciones se programó un marco de 2 x 2 m, es decir, una densidad de 2500 pies·ha$^{-1}$.

En relación con la *ejecución*, se caracterizó por:

1. La *preparación del suelo* fue diferente según la pendiente (en zonas de pendiente superior al 15% e inferior al 45%, la mayor parte de toda la superficie repoblada, se realizó una preparación del suelo con acaballonado mediante arado de vertederaBravant con tracción de bueyes; – en zonas con pendiente superior al 45%, se preparó el suelo por ahoyado manual).

2. En relación con los *desbroces*, el espeso matorral de jara pringosa fue tratado mediante desbroce selectivo, parcial y por arranque de los ejemplares de jara, que fue por puntos en rodales con preparación por ahoyado manual, y en líneas en rodales con preparación del suelo por acaballonado con tracción animal.

3. Las *siembras* por casillas con tres o cuatro bellotas de encina y de rebollo se hicieron en los primeros años (1955, 1956 y 1957) en una superficie de unas 138 ha (134 de ellas, públicas), sobre una preparación del suelo por ahoyado manual con plantación de pino rodeno como especie principal (Epifanio Moreno, com. pers.). En estos rodales, repoblados antes de la llegada de los bueyes, hubo muchas marras que fueron repuestas tras realizar el acaballonado, plantando pino rodeno, pino salgareño (*Pinus nigra*) y pino silvestre (*Pinus sylvestris*).

4. Las *plantaciones*, forma generalizada de realizar la introducción de la nueva vegetación en ambos modos de preparación del suelo, se hicieron con planta procedente del vivero de Jócar, planta a raíz desnuda de dos savias, de pino rodeno y, en menor medida, de pino salgareño y de pino silvestre (la distancia en línea recta entre el vivero y el monte es de unos 10 km y no consta en el expediente el origen del material forestal de reproducción utilizado). Se colocaban, cuando las había en cercanía, tres grandes piedras alrededor de la planta, a modo de castillete, con el fin de evitar vegetación competidora, reducir evaporación del suelo y proteger del viento. Muchos de estos castilletes son reconocibles en la actualidad.

Finalmente, en relación con el *mantenimiento*:

1. En una primera fase, expuesta en el Acta de Confrontación de 1970 (documento oficial que certificaba el resultado de la inspección realizada por la administración entonces competente de la ejecución del proyecto aprobado), se cita la realización de operaciones de "limpias de arbolado" aplicadas a la totalidad de la superficie arbolada en esa fecha. Esta operación se supone que consiste en un *deshermanamiento* y un desbroce puntual alrededor de la planta, si resulta necesario.

2. Posteriormente se hicieron *claras*, en diferentes superficies que no alcanzan a la totalidad del monte, en 1985, 1988, 1993, 1995, 2012 y 2015, es decir, a edades de la masa del orden de 25, 35 y 45 años, con rotación de unos 10 años. Todas estas claras han sido autofinanciadas e incluso han proporcionado ingresos a la entidad propietaria. Los ingresos procedentes de las claras entre 1985 y 2015 alcanzan el importe de 85-200 € (Pedro Díaz, com. pers.). Quedan rodales en los que nunca se han realizado claras, sobre todo en los bordes de las cárcavas.

Es de interés referir el *resultado* de la repoblación en algunos rodales que cuentan con inventario. Los rodales en los que entre 1955 y 1957, se realizó primero un ahoyado manual con plantación de pino rodeno y siembra por casillas de rebollo y encina, con numerosas marras que fueron repuestas mediante acaballonado y plantación posterior de pinos rodeno, salgareño y silvestre, cuya extensión como se ha expuesto es de 138 ha, presentan en la actualidad una composición específica mixta y estructura de tamaños compleja. En la *Tabla 2* se presentan, resumidos, los datos de distribución diamétrica de las cinco especies en dichos rodales, obtenidos por Hierro (2009) y que se comentan a continuación.

**Tabla 2.** Inventario (16 parcelas) de la densidad (pies·ha$^{-1}$) del rodal de 134 ha de masa mixta en el monte Bienes Comunales de Retiendas (Hierro, 2009).

| C.D. | *P. pinaster* | *P. nigra* | *P. sylvestris* | *Q. pyrenaica* | *Q. ilex* | TOTAL |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | | 33 | 6 | 36 | 29 | 104 |
| 10 | 3 | 48 | 14 | 9 | 16 | 90 |
| 15 | 14 | 55 | 16 | | 2 | 87 |
| 20 | 50 | 69 | 31 | | | 150 |
| 25 | 144 | 86 | 16 | | | 246 |
| 30 | 105 | 37 | 7 | | | 149 |
| 35 | 33 | | | | | 33 |
| 40 | 13 | | | | | 13 |
| 45 | 4 | | | | | 4 |
| TOTAL | 366 (42%) | 328 (37%) | 90 (10%) | 45 (5%) | 47 (6%) | 876 |

La densidad total en 2009 era de 876 pies·ha$^{-1}$, con valores relativos por especies en la *Tabla 2*. Tenía la masa unos 36 m$^2$·ha$^{-1}$ de área basimétrica, e índice de Hart del 21%. En esta fecha, la edad de referencia de los pinos es de 45 años, mientras que la de los rebollos y encinas es de 52 años. El mayor diámetro medio, 30 cm, corresponde al pino rodeno que alcanza las máximas alturas medias, de 14 m. Los rebollos y encinas, a pesar de tener una edad superior a los pinos del orden de 7 años, se presentan en mezcla pie a pie con éstos, con diámetros medios inferiores a 10 cm y alturas medias del orden de 5 m.

En 1986, por parte del CIFOR-INIA, se instala un dispositivo experimental para estudiar el efecto de las claras, dentro de la misma especie y edad, en diferentes calidades de estación (Ortega *et al.*, 1997). La masa en este momento tiene una edad de referencia de 30 años. Se replantean, en 1986, parcelas en tres calidades de estación definidas por la altura dominante a igualdad de edad, numeradas como:

1.— Ho de 12.5 m
2.— Ho de 10.5
3.— Ho de 9 m.

La explicación a la diferente calidad se relaciona con la pendiente del terreno y

con el estado edáfico, siendo las condiciones climáticas similares. Se realiza una primera clara en 1986, edad 30 años, una segunda clara en 1995, edad 39 años y una tercera clara en 2005, edad 49 años. En 2015 se realizó otro inventario. En la *Fig. 2* se presentan resultados resumidos que ayudan a comprender el estado de la masa y su evolución. Se puede ampliar información sobre los atributos descriptivos del caso de estudio en Serrada *et al.*, 2021.

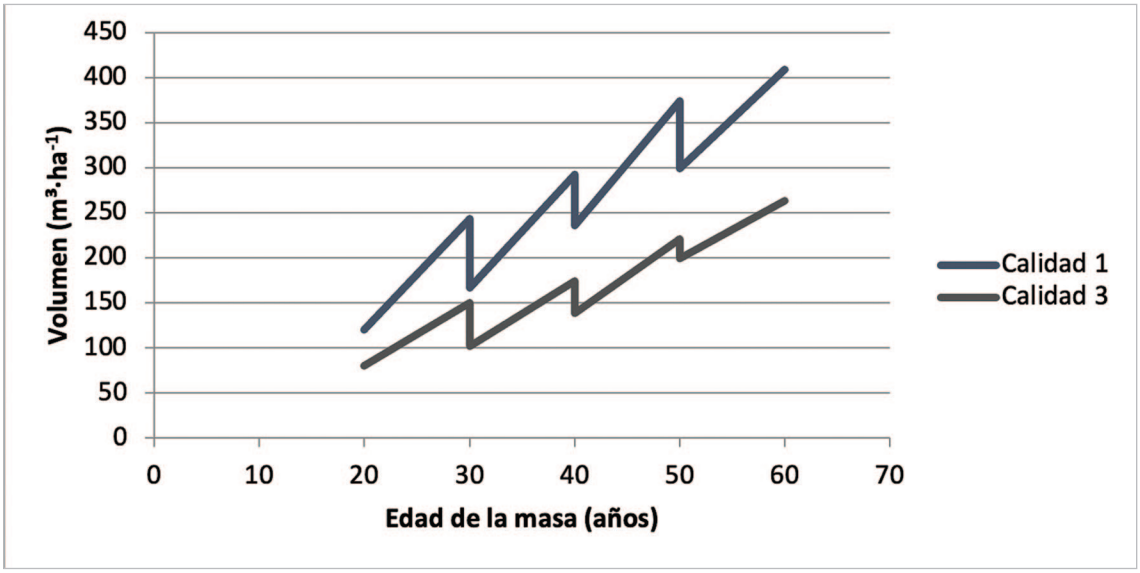


**Figura 2.** Representación gráfica del volumen en pie en las parcelas de calidades extremas. Datos de Ortega *et al.* (1997) y Gregorio Montero (com. pers.).

## *2.3 Aplicación de ModERFoRest*

El Programa ModERFoRest se ha aplicado a este monte tomando los modelos climáticos de la AEMET para el escenario actual (AEMET 2011), y los de WordClim (Fick andHijmans 2017), calibrados con los de la AEMET, para el escenario climático futuro SSP2-4.5 (~2º de aumento medio de la temperatura del planeta para finales de siglo) en la década 2040-2060.

En relación con los datos edáficos se han obtenido de lo publicado por Serrada y Gómez-Sanz (2017). El resumen de valores asignados al conjunto del perfil, calculados por ModERFoRest y utilizados en el programa, se presentan en la *Tabla 3*. Se comprueba que se trata de un perfil pedregoso, escasamente humificado, sin carbonatos, de reacción ácida, escasa permeabilidad global con notable discontinuidad entre primer horizonte y los subyacentes y capacidad de retención de agua de 82.4 mm.

**Tabla 3.** Resumen de valores de analítica edáfica referida al conjunto del perfil (TF, % tierra fina en tierra natural; ARE, % de arena USDA en tierra fina; LIM, % de limo USDA en tierra fina; ARC, % de arcilla USDA en tierra fina; MO, % de materia orgánica en tierra fina; % de materia orgánica en tierra fina en los 25 cm superficiales; PHA, pH en agua; PHK, pH en cloruro potásico; COND, conductividad eléctrica máxima en el perfil en _S·cm$^{-1}$; % de nitrógeno en tierra fina; NS, % de nitrógeno en tierra fina en los 25 cm superficiales; CNS, relación carbono-nitrógeno en el horizonte superficial; % de carbonatos inactivos en tierra fina; CIN, % de carbonatos activos en tierra fina; HE, humedad equivalente de la tierra fina en % según Gandullo (2000); PERM, valor del parámetro permeabilidad de Gandullo (2000); CRAD, capacidad de retención de agua disponible en el perfil en mm (Domingo Santos *et al.*, 2006); los valores de las variables TF, ARE, LIM, ARC, HE y PERM son el valor medio ponderado con el espesor de cada horizonte, los de las variables MO, PHA, PHK, N, CIN y CAC son el valor medio ponderado según el criterio de Russel-Moore, y los de las variables MOS, NS y CNS se corresponde con los valores medios ponderados según el criterio de Russel-Moore en los 25 cm superficiales del perfil).

| TF | ARE | LIM | ARC | MO | MOS | PHA | PHK | COND | N | NS | CNS | CIN | CAC | HE | PERM | CRAD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 20.9 | 61.9 | 20.8 | 17.3 | 0.51 | 0.73 | 5.2 | 4.7 | 0.09 | 362.5 | 670.3 | 6.37 | 0 | 0 | 17.8 | 1.6 | 82.4 |

Para calcular los valores de las variables climáticas del monte se ha elegido un punto central de la repoblación, a aproximadamente 1000 m de altitud. Se ha aplicado el módulo AERF (Adecuación de Especies para la Restauración Forestal), que ordena las especies en función de su idoneidad u homologación ecológica para una determinada estación o rodal.

Se han empleado los dos algoritmos, API (Índice aditivo de idoneidad, *AdditivePotentialIndex*, API) (Alonso Ponce *et al.* 2010) y FPI (Índice factorial de idoneidad, *Factorial PotentialIndex*, FPI) (Rubio and Sánchez-Palomares 2006) como ín-

**Tabla 4.** Definición y unidades de las variables empleadas en la modelización de la idoneidad ecológica.

| ID | IIdentificador | Unidades | Definición |
|---|---|---|---|
| TNF | Temperatura mínima del mes más frío | ºC | Temperatura mínima del mes con temperatura media más baja |
| TXC | Temperatura máxima del mes más cálido | ºC | Temperatura máxima del mes con temperatura media más alta |
| PP | Precipitación de primavera | mm | Suma de las precipitaciones de primavera (marzo, abril, mayo) |
| PV | Precipitación estival | mm | Suma de las precipitaciones de verano (junio, julio, agosto). |
| ISQ | Intensidad de la sequía | Tanto por uno | Cociente entre el área seca y el área húmeda |
| TF | Tierra fina | % | Media ponderada por espesor de horizontes de los % de partículas de diámetro inferior a 2 mm |
| ARE | Arena | % | Media ponderada por espesor de horizontes de los % de partículas de diámetro comprendido entre 2000 y 50 µm |
| PERM | Permeabilidad | adim | Gandullo, 2000 |
| CAC | Carbonatos activos | % | Media ponderada de los % de CAC de cada horizonte según criterio de Russell y Moore. |
| MO | Materia orgánica | % | Media ponderada de los % de materia orgánica oxidable de cada horizonte según criterio de Russell y Moore. |

dices de idoneidad, utilizado las variables recomendadas por ModERFoRest : TNF, TXC, PP, PV, ISQ, TF, ARE, PERM, CAC y MO (ver *Tabla 4* para la definición y unidades de cada variable). Respecto de estas variables se han calculado también los índices de marginalidad (Gómez-Sanz 2019).

## 3. Resutados

### *3.1 Efectos del cambio sobre valores que caracterizan a la estación*

El módulo AERF del programa ModERFoRest permite caracterizar la estación elaborando su ficha hídrica y calculando algunos índices. En la *Tabla 5* se presentan, comparativamente en las condiciones climáticas actuales y en la hipótesis de cambio según escenario SSP2-4.5, los valores anuales de la ficha hídrica en Retiendas.

**Tabla 5.** Resumen de valores anuales de la ficha hídrica para Retiendas (1000 m) en condición actual y en hipótesis de cambio (T, temperatura media anual; ETP, evapotranspiración potencial anual según Thornthwaite; P, precipitación media anual; ETRMP, evapotranspiración real máxima posible anual según Thornthwaite; SEQF, sequía fisiológica anual según Thornthwaite; DREN, drenaje calculado anual según Thornthwaite).

| | **Actual** | **Cambio (SSP2-4.5)** |
|---|---|---|
| T (ºC) | 12.1 | 14.5 |
| ETP (mm) | 683.2 | 779.5 |
| P (mm) | 749.2 | 741.0 |
| Reserva mínima (mm) | 1.94 | 0.66 |
| Superávit (mm) | 374.5 | 359.4 |
| Déficit (mm) | 308.5 | 397.9 |
| ETRMP (mm) | 455.2 | 463.3 |
| SEQF (mm) | 228.0 | 316.1 |
| DREN (mm) | 294.0 | 277.7 |

En la *Tabla 6* se presentan los valores de algunos índices calculados con base en el clima, en las dos situaciones, deducidos del resultado de la aplicación ModER-FoRest.

**Tabla 6.** Algunos valores de índices que caracterizan la estación en las dos condiciones de cálculo (DSQ=duración de la sequía en meses; ISQ=Intensidad de la sequía; G=Duración del periodo vegetativo en meses; IH=Índice hídrico; IVRNT=Índice de Vernet (ºC·mm$^{-1}$); M=Índice de Martonne (mm·ºC$^{-1}$); IP=Índice de Patterson (mm·mes); PPF=Productividad Potencial Forestal (m$^3$·ha$^{-1}$·año$^{-1}$)).

| | DSQ | ISQ | G | IH | IVRNT | M | IP | PPF |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Actual | 2.5 | 0.076 | 7 | 27.7 | -7.2 | 33.9 | 210.1 | 2.7 |
| Cambio (SSP2-4.5) | 3.0 | 0.137 | 9 | 15.5 | -8.8 | 30.2 | 289.0 | 3.1 |

### *3.2 Efectos del cambio sobre indicadores de idoneidad y de marginalidad de las principales especies forestales.*

La aplicación ModERFoRest, como se ha expresado, permite valorar la idoneidad de 22 taxones forestales para valorar su compatibilidad en un rodal concreto. El resultado de este cálculo, en las dos situaciones y para los dos índices de idoneidad, referidos a las cinco especies que se repoblaron en Retiendas y a otras cinco especies que manifiestan presencia en zonas cercanas, se presentan en la *Tabla 7*.

**Tabla 7.** Índices de idoneidad para las 5 especies forestales introducidas por repoblación y para otras 5 especies con presencia en zonas cercanas. Se indica en las columnas "cambio" la variación relativa de la idoneidad respecto de la situación actual.

| Especie | **Índice de idoneidad API** | | **Índice de idoneidad FPI** | |
|---|---|---|---|---|
| | Actual | Cambio (SSP2-4.5) | Actual | Cambio (SSP2-4.5) |
| *Pinus pinaster* ssp. *mesogeensis* | 0.153 | 0.067 (-56%) | 0.942 | 0.925 (-2%) |
| *Pinus nigra* | 0.073 | 0.017 (-76%) | 0.000 | 0.000 (--) |
| *Pinus sylvestris* | 0.022 | 0.001 (-95%) | 0.000 | 0.000 (--) |
| *Quercus pyrenaica* | 0.262 | 0.110 (-58%) | 0.940 | 0.889 (-5%) |
| *Quercus ilex* ssp. *ballota* | 0.194 | 0.176 (-9%) | 0.953 | 0.959 (+1%) |
| *Quercus faginea* | 0.099 | 0.036 (-63%) | 0.931 | 0.000 (-100%) |
| *Quercus suber* | 0.157 | 0.108 (-31%) | 0.931 | 0.935 (+1%) |
| *Castanea sativa* | 0.161 | 0.114 (-29%) | 0.920 | 0.894 (-3%) |
| *Pinus pinea* | 0.011 | 0.010 (-9%) | 0.000 | 0.000 (--) |
| *Pinus halepensis* | 0.097 | 0.094 (-3%) | 0.000 | 0.000 (--) |

En la *Tabla 8* se presentan los índices de marginalidad, de las 5 especies que figuran en la *Tabla 7*, respecto de las variables que se han usado en el diagnóstico, que son las que por defecto presenta la aplicación ModERFoRest. En la aplicación hay posibilidad de cambiar las variables de diagnóstico, eligiendo hasta 15 de las que el programa calcula. Para variables climáticas se hace comparación en dos situaciones, para las variables edáficas no hay comparación pues se entiende que no habrá cambio en la hipótesis de cambio climático.

**Tabla 8.** Índices de marginalidad para las 5 especies forestales introducidas por repoblación y para otras 5 especies con presencia en zonas cercanas.TXC=temperatura máxima del mes más cálido; TNF=temperatura mínima del mes más frío; ISQ=Intensidad de la sequía; PP=precipitación de primavera; MO=materia orgánica; TF=tierra fina; PERM=permeabilidad.

| Especie | Marginalidad climática | | Marginalidad edáfica |
|---|---|---|---|
| | Actual | Cambio (SSP2-4.5) | 8 |
| *Pinus pinaster*ssp. *mesogeensis* | 0 | +0.058 (TXC) | -0.097 (PERM) |
| *Pinus nigra* | 0 | +1.000 (TXC) | -0.785 (MO) |
| *Pinus sylvestris* | +0.819 (TXC) | +1.000 (TXC) | -0.364 (TF) |
| *Quercus pyrenaica* | 0 | +0.421 (TXC) | -0.024 (MO) |
| *Quercus ilex*ssp.*ballota* | 0 | 0 | -0.019 (MO) |
| *Quercus faginea* | 0 | +0.726 (TNF) | -0.135 (MO) |
| *Quercus suber* | 0 | 0 | -0.163 (MO) |
| *Castanea sativa* | -0.006 (PP) | +0.174 (TXC) | -0.385 (MO) |
| *Pinus pinea* | +0.001 (PP) | +0.006 (PP) | -0.775 (TF) |
| *Pinus halepensis* | 0 | +0.048 (TXC) | -0.791 (MO) |

Finalmente, en la *Tabla 9* se presentan los resultados de la estimación de la calidad de estación (índice de sitio) mediante la aplicación de las ecuaciones que predicen la altura alcanzada por los pies de la masa a una edad de referencia. No todas las especies disponen de estas ecuaciones, se presentan únicamente las que las poseen dentro de las analizadas en tablas anteriores.

**Tabla 9.** Valores predichos de altura a edad de referencia de algunas especies como indicador de la calidad de estación o del índice de sitio. Ho=Altura dominante; Hm=altura media; 50 años referencia de edad para todas; IS el valor de altura es directamente proporcional a la calidad de estación; CAL, el valor es inversamente proporcional a la calidad de estación. Se indica variación en valor relativo respecto de estado actual.

| Especie | Valoración | | Variación relativa |
|---|---|---|---|
| | Actual | Cambio (SSP2-4.5) | 9 |
| *Pinus pinaster* ssp.*mesogeensis* (Ho50;CAL) | 6.74 | 6.56 | + 2.5 % |
| *Pinus nigra* (Hm50;IS) | 11.83 | 12.91 | + 9.0 % |
| *Pinus sylvestris* (Hm50;CAL) | 6.28 | 6.99 | - 11.2 % |
| *Pinus pinea* (Hm50;IS) | 8.96 | 10.43 | + 16.4% |
| *Pinus halepensis* (Hm50;CAL) | 5.75 | 5.84 | - 1.5 % |

## 4. Discusión

Se discuten en este epígrafe los resultados presentados anteriormente en forma de tablas.

Los posibles cambios producidos por la hipótesis SSP2-4.5 que figuran en la *Tabla 5* sobre la ficha hídrica global de la estación se refieren al aumento de la temperatura que se ha indicado y un leve descenso de la precipitación media anual. Hay:

a. Reducción de la reserva, del superávit y del drenaje.

b. Aumento cercano al 2% de la evapotranspiración real máxima posible y del 38% de la sequía fisiológica. Son resultados esperables al cambiar los datos climáticos en el cálculo.

En la *Tabla 6* se presentan los valores de índices sintéticos que caracterizan una estación. La duración de la sequía pasa de 2.5 a 3 meses y su intensidad casi se duplica. En este sentido, la aridificación provocada por el aumento de las temperaturas se manifiesta en:

a. El valor del índice hídrico pasa la calificación del tipo de clima de húmedo a subhúmedo.

b. El índice de Vernet mantiene la calificación de clima mediterráneo creciendo un 22%

c. El índice de Martonne baja un 11% quedando en el límite de pasar del calificativo de húmedo a semiárido. Sin embargo, al aumentar la duración del periodo vegetativo por reducción del frío invernal, el índice de Patterson crece un 37% y la Productividad Potencial Forestal calculada con él sube un 15%.

No es contradictorio este análisis, el aumento moderado de la aridificación no se traduce necesariamente en una pérdida de productividad global, ya que en el desarrollo de la vegetación además del balance hídrico influye el régimen térmico. Por esto conviene analizar la variación en las respuestas al cambio climático de las diferentes especies en cada lugar concreto y con unas condiciones edáficas conocidas. A esto se dedican los siguientes resultados.

La *Tabla 7* resume el valor de los índices de idoneidad para 10 especies. Lo primero a analizar es que el índice factorial (FPI), por razón de su modo de cálculo, da a muchas especies como incompatibles en la situación actual (*P. sylvestris*, *P. nigra*, *P. pinea* y *P. halepensis*) a la vez que presenta escasa variación numérica entre las que da como compatibles. En la hipótesis de cambio climático por calentamiento da variaciones en valor relativo muy pequeñas para 5 especies. En relación con el quejigo, los resultados muestran que para las temperaturas invernales, la marginalidad superior se sitúa por encima de 0.5. Esto quiere decir que la estación tiene una media de las mínimas del mes más frío que toma valores más elevados que los del espec-

tro observado para la especie (los inviernos son más cálidos, lo que implica que el período vegetativo sea más dilatado) y en consecuencia el FPI pasa a tomar el valor 0. Esto no implica que los efectos de un período frío más reducido en la estación que el observado en la autoecología de la especie lleven a una situación de incompatibilidad o dificultades trascendentes para la especie, aunque la falta de frío puede implicar reducción de competitividad frente a otros taxones.

En la *Tabla 7*, los valores obtenidos por el índice de idoneidad aditivo (API) resultan más deflactados y no excluyen a ninguna de las 10 especies consideradas, a la vez que permiten una más precisa ordenación de las mismas según este criterio. Los valores obtenidos por este índice en la hipótesis de un calentamiento de 2ºC se traducen en:

a. Todas las especies sufren un descenso en su idoneidad ecológica, acorde con el esperado aumento de la aridificación, pero con diferencias significativas entre especies

b. Descenso más notable de idoneidad para las especies más higrófilas (pinos silvestre, salgareño y rodeno, y rebollo) superiores al 50% y predicción de la probable expulsión del pino silvestre.

c. Pérdida de idoneidad relativamente baja en las especies más xerófilas (encina y pinos piñonero y carrasco).

En la *Tabla 8* se presentan los índices de marginalidad para variables climáticas en las dos situaciones y con los parámetros edáficos que caracterizan el rodal en la actualidad. En relación con los parámetros climáticos utilizados (se pueden usar otros diferentes y más numerosos), la situación actual, valorada de modo general, sólo manifiesta una marginalidad apreciable, aunque no excluyente, para el pino silvestre en relación con la intensidad de la sequía. Valorando con mayor detalle, salvo para la encina y el alcornoque, que no muestran marginalidad ni actual ni futura, el resto de especies sufren un aumento de su marginalidad ecológica. Las marginalidades climáticas dominantes son relativas al régimen térmico: exceso de calor en verano especialmente para el pino silvestre prediciendo incompatibilidad; y en invierno para el quejigo. Las marginalidades de variables relativas al régimen de precipitaciones y al balance hídrico toman valores intranscendentes.

Valorando en modo general, las máximas marginalidades de los parámetros edáficos se refieren en 7 especies a la materia orgánica. No es de extrañar este resultado si se tiene en cuenta que los estudios de autoecología de las especies se realizaron sobre masas naturales mientras que el caso de Retiendas es una repoblación de escasa edad relativa sobre suelos muy degradados y por tanto con muy escasa humificación inicial. Con mayor detalle, las marginalidades edáficas muestran valores elevados para la MO en el caso del pino carrasco con cifras más bajas de las observadas para la especie. Para el pino piñonero, respecto de la TF, con valores también más bajos de los observados para la especie, cuyas masas se encuentran mayoritariamente en suelos arenosos. El exceso de pedregosidad para el pino silvestre

se debe a que la mayor parte de las masas estudiadas en su autoecología son naturales y están instaladas sobre suelos forestales protegidos largo tiempo. La falta de permeabilidad para el pino rodeno, muy escasa en esta valoración, se debe a la de los horizontes profundos.

Finalmente, el análisis de los resultados presentados en la *Tabla 9*, posible variación de las alturas alcanzadas en 5 especies que cuentan con ecuaciones de predicción en función de los parámetros ecológicos, indica lo siguiente:

a. Esta metodología resulta eficaz para los fines propuestos y tiene capacidad de predicción detectando variaciones en los valores de los parámetros utilizados para su cálculo.

b. El valor real de Ho a los 50 años en la III calidad de los rodales de Retiendas que aportan Ortega *et al.* (1997) es del orden de 12 m, similar al obtenido utilizando cifras del orden de 7 para cálculo de CAL con la aplicación ModERFoRest en esta ocasión.

c. Hay aumento de la calidad de estación con el cambio en 3 especies, lo que se corresponde con la mejora de la PPF.

d. Se detectan y confirman dificultades de desarrollo para el pino silvestre y no es trascendente la pérdida de calidad detectada para el pino carrasco.

De esta discusión se deduce que el futuro tratamiento de la masa debe tener muy presente la evolución estimada de las condiciones estacionales en el escenario de cambio climático contemplado, debiendo estar orientado a establecer unas condiciones de espesura que:

a. Suavicen las dificultades vegetativas que puedan sufrir los pinos silvestre y salgareño, consecuencia del acusado incremento de la marginalidad térmica que se prevé experimente la estación en los años venideros.

b. Amortigüen los efectos de la previsible pérdida sustancial de idoneidad ecológica de la estación para la instalación, desarrollo y regeneración del pino rodeno y del rebollo.

c. Controlen la esperable mejora en el desarrollo de los pies de encina. Y que, a su vez, en caso de que se decida favorecer la introducción de nuevas especies, una buena alternativa puede ser el uso del alcornoque y de los pinos piñonero y carrasco.

## 5. Conclusiones

Las conclusiones del análisis que se ha realizado, planteadas de forma genérica, se resumen en:

— Se comprueba la eficacia de la herramienta ModERFoRest para detectar posibles cambios en las características estacionales y en el comportamiento de las especies forestales por razón de variaciones en el clima.

— El índice de idoneidad API tiene mayor flexibilidad para valorar el comportamiento de las especies que el FPI, ya que este último descarta taxones en cuanto uno de los parámetros, independientemente de su influencia en el caso, resulta extramarginal.

— Los cambios por calentamiento de la temperatura del aire, y que se traducen en una aridificación, no siempre manifiestan perjuicios en la calidad de estación. Según el grado de variación del calentamiento y en unas condiciones edáficas concretas, la variación de la calidad de estación se puede manifestar como una mejora.

— Para el caso concreto de los montes de Retiendas y los de su comarca, y en relación con sus tratamiento de mejora y de regeneración, hay que tener en cuenta:

a. El posible decaimiento de los pies de pinos silvestre y salgareño, poco abundantes por otra parte.

b. La necesidad de aplicar planes de claras en las masas de pino rodeno y de rebollo.

c. Esperar refuerzo en el desarrollo de los pies de encina.

d. En caso de tratar de favorecer la introducción de nuevas especies, contar con el alcornoque tras un estudio más detallado de los suelos, y con el pino piñonero.

Con un planteamiento de mayor detalle, y en relación con las especies analizadas, se resumen otras conclusiones:

Sobre las especies que componen la masa principal del monte:

— La encina y el rebollo son las que presentan mayor *idoneidad ecológica* actual y futura (alta en el futuro, API > 0.1). No son esperables restricciones derivadas de las condiciones estacionales cambiantes, aunque para el rebollo aparece marginalidad respecto a las temperaturas estivales que no se valoran como limitantes o incompatibles.

— El pino rodeno manifiesta una pérdida notable de *idoneidad ecológica*, pues pasa en el futuro a tener un API < 0.1, con un ligero descenso de la altura dominante pronosticada, mientras que son irrelevantes los valores de marginalidad climática futura y también los de naturaleza edáfica.

— Los pinos silvestre y salgareño manifiestan una reducida *homologación ecológica* para la estación, con valores de API en un futuro muy bajos, menores de 0.01. Su marginalidad, respecto a valores de temperatura estival, puede resultar incompatible en el futuro con masas estables de estas especies, siendo el salgareño la especie que más incrementa su marginalidad.

Para las especies del entorno próximo al monte:

— El alcornoque y el castaño obtienen una buena *homologación ecológica* (API alto), con marginalidades irrelevantes.

— El pino carrasco y el quejigo presentan una *idoneidad ecológica* media, con marginalidad edáfica severa para el carrasco (MO) y marginalidad climática notable para el quejigo (TNF). Estas situaciones de marginalidad detectadas no necesariamente tienen que suponer inestabilidad estacional en su instalación y desarrollo, dada la naturaleza e influencia de los parámetros ecológicos mencionados.

De estos resultados se extrae que los valores obtenidos del API y de los indicadores de marginalidades (correspondientes a las variables incluidas en su cálculo) muestran una variabilidad ecológicamente coherente que permite, a partir de su interpretación conjunta, extraer valoraciones útiles sobre el impacto de las condiciones estacionales en la estabilidad ecológica de las poblaciones de las especies analizadas. Esta capacidad creemos que es una fortaleza a destacar de la aplicación informática desarrollada.

## Agradecimientos/Financiación

En primer lugar es necesario agradecer a los numerosos técnicos y guardas forestales que han intervenido a lo largo de 60 años en el proyecto, ejecución y mantenimiento de la repoblación forestal estudiada. En muy distintas, y a veces complicadas, condiciones administrativas y presupuestarias han sabido demostrar una dedicación y acierto que hace posible lo que ahora podemos ver y estudiar. También agradecemos a los técnicos forestales y agentes medioambientales que tienen en la actualidad este monte a su cargo.

Especial agradecimiento merecen Gregorio Montero y Ricardo Ruiz-Peinado que han intervenido en numerosas actividades a lo largo del tiempo que, aun siendo dispares, han contribuido a la exposición que se ha realizado: instalación y medición de las parcelas de estudio sobre claras en este monte; y desarrollo de meto-

dologías para la valoración del carbono fijado por las formaciones forestales, arbóreas y arbustivas. Finalmente, hay que agradecer a Javier Otero de Irízar y a Santiago Gamo Castel su colaboración en la toma de muestras edáficas.

## 6. Bibliografía

Aemet, I.; 2011. *Atlas climático ibérico/Iberianclimate atlas*. Agencia Estatal de Meteorología-Instituto de Meteorología de Portugal. 79 pp.

Allué, J.L.; 1990. *Atlas fitoclimático de España. Taxonomías*. MAPA, INIA, Madrid, 223 pp.

Alonso Ponce, R.; López Senespleda, E.; Sánchez Palomares, O.; 2010. A novel application of the ecological field theory to the definition of physiographic and climatic potential areas of forest species. *Eur. J. For. Res.* 129, 119–131. https://doi.org/10.1007/s10342-008-0254-2

Alonso Ponce, R.; López-Senespleda, E.; Gómez-Sanz, V.; Serrada, R.; Sánchez-Palomares, O.; Ruiz-Peinado, R.; Montero, G.; 2021. ModERFoRest v.3.10. CIFOR-INIA. https://www.inia.es/serviciosyrecursos/recur-sosinformaticos/modernforest/Paginas/ModERFoRest.aspx. Accessed 16 January 2024.

Domingo Santos, J.M.; Villarán, R.F. de; Juan, S.; Corral, E.M.; Arrarás, Í.R.; 2006. Estimación de la capacidad de retención de agua en el suelo: revisión del parámetro CRA. Investig. Agrar. Sist. y Recur. For. 15, 14–23. https://doi.org/10.5424/srf/2006151-00950

Fick, S.E.; Hijmans, R.J.; 2017. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International JournalofClimatology* 37 (12): 4302-4315. https://doi.org/10.1002/joc.5086

Gandullo, J.M.; 2000. *Climatología y ciencia del suelo*. ETSI de Montes. Madrid.

Gómez-Sanz, V.; 2019. Site-scale ecological marginality: Evaluation model and application to a case study. *Ecol. Modell.* 408. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.108739

Hierro, R. del; 2009. *Estudio general de los montes denominados: "Bienes Comunales" situado en el Término Municipal de Retiendas (GU-3029); y "Barranco de la Jara" nº 101 del C.U.P. situado en el Término Municipal de Tamajón (Guadalajara)*. Trabajo Fin de Carrera. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal. Madrid

López-Senespleda, E.; Montero, G.; Ruiz-Peinado, R.; Alonso Ponce, R.; Serrada, R.; Sánchez-Palomares, O.; 2018. Cincuenta años de autoecología forestal paramétrica en España. Foresta 70, 40–47.

López-Senespleda, E.; Alonso Ponce, R.; Ruiz-Peinado, R.; Gómez-Sanz, V.; Serrada, R.; Montero, G.; (2023). ModER-FoRest: A new software for assessing the environmental performance of forest species. *Forest Systems*, Volume 32, Issue 1, eRC01. https://doi.org/10.5424/fs/2023321-19406

Ortega, C.; Río, M. del; Montero, G.; Bachiller, A.; 1997. Resultados de una experiencia de claras en repoblaciones de *Pinus pinaster*Ait. en el norte de Guadalajara. Actas del II Congreso Forestal Español. SEFC. Pamplona.

Rubio, A.; Sánchez-Palomares, O.; 2006. Physiographic and climatic potential areas for Fagus sylvatica L. based on habitat suitability indicator models. *Forestry* 79, 439-451. https://doi.org/10.1093/forestry/cpl025

Serrada, R.; 2017. Prólogo. en Palacio, E.del, Martín, L., Hernández, J. Rojo, L. 2017. *Inventario Nacional de Erosión de Suelos. Guadalajara*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. 7-21.

Serrada, R.; Aroca, M.J.; Roig, S.; Bravo, A.; Gómez-Sanz, V.; 2011. *Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en el sector forestal. Notas sobre gestión adaptativa de las masas forestales ante el cambio climático*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones. http://www.marm.es/imagenes/es/SECTOR%20FORESTAL_DOCUMENTO%20COMPLETO_tcm7-185468.pdf

Serrada, R.; Gómez-Sanz, V.; 2017. Estado edáfico de una repoblación forestal protectora de 50 años en Retiendas (Guadalajara). Actas del 7 CFE. SECF. Plasencia.

Serrada Hierro, R.; Fernández Yuste, J.A.; Martínez Santa-María, C.; Gómez-Sanz, V.; García Viñas, J.I.; 2021. Caso Práctico I. Repoblación hidrológico-forestal en los montes Vallecina y Robledo (CUP 100, GU-3034) y Bienes Comunales (GU-3029), término municipal de Retiendas, Guadalajara. en Pemán, J.; Navarro; R.M.; Prada, M.A.; Serrada, R.; 2021. *Bases técnicas y ecológicas del proyecto de repoblación forestal*. Tomo 2. MITECO. Madrid. 263-292.