



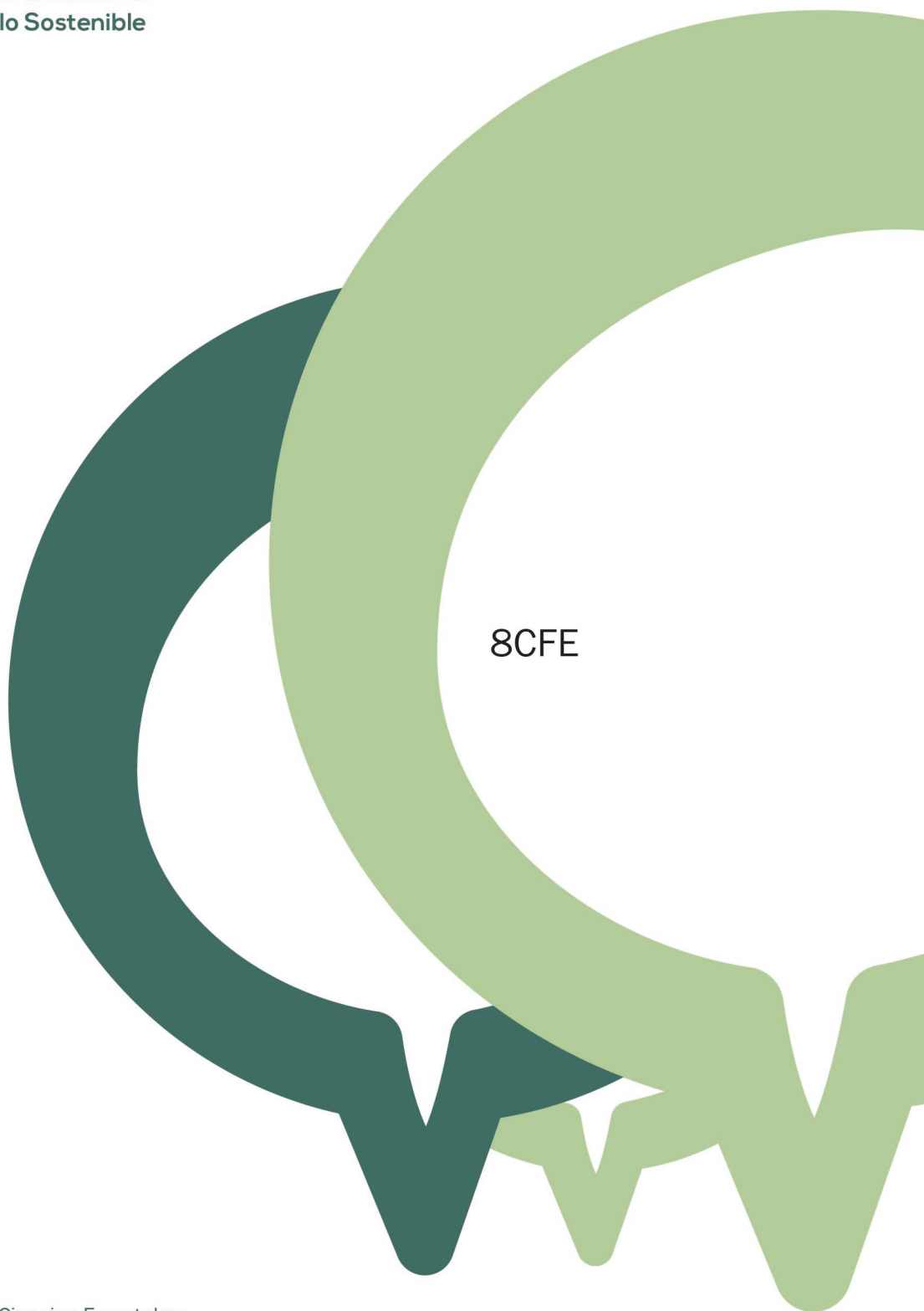
2022
Lleida

27·1
junio · juny
julio · juliol

Cataluña
Catalunya

8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**



8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



MODERFOREST: más que una aplicación para la elección de especie y origen de la semilla en repoblaciones forestales

ALONSO PONCE, R.^{1,4}, GÓMEZ-SANZ, V.², LÓPEZ-SENEPLEDA, E.^{3,4}, RUIZ-PEINADO, R.^{3,4}, MONTERO, G.⁵, SÁNCHEZ-PALOMARES, O.⁵ y SERRADA HIERRO, R.⁵

¹ fora forest technologies SLL

² ECOGESFOR-Universidad Politécnica de Madrid. ETS de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural

³ CIFOR-INIA

⁴ Instituto Universitario de Investigación Gestión Forestal Sostenible iuFOR

⁵ Sociedad Española de Ciencias Forestales

Resumen

ModERFoRest es el acrónimo de *Modelling Environmental Requirements for Forest Restoration* (Modelización de los requerimientos ambientales para la restauración forestal), ya que es una aplicación especialmente diseñada para la elección de especie y el origen del material forestal de reproducción idóneos en tareas de restauración de la vegetación. Sin embargo, la actual versión ya disponible de la aplicación facilita, además, otra serie de funcionalidades como son: i) la modelización de la distribución de especies, con dos algoritmos diferentes, a partir de datos exclusivamente de presencias; ii) el cálculo masivo de hasta 38 variables climáticas a partir de datos de precipitación y temperaturas mensuales; y iii) la síntesis de hasta 23 variables edáficas a escala perfil derivados de los datos brutos de laboratorio por horizontes, incluyendo la generación de fichas hídricas. La aplicación se distribuye de manera gratuita y recoge toda la información sobre autoecología de 22 taxones arbóreos de relevancia en España, así como de los rodales semilleros selectos cuya caracterización ecológica completa está disponible hasta la fecha. ModERFoRest constituye una herramienta de fácil manejo, versátil, de uso libre y en continuo desarrollo que puede ser de utilidad tanto a gestores como investigadores del ámbito de la restauración de la vegetación.

Palabras clave

Restauración, autoecología, modelización ecológica, similitud ecológica, parámetros climáticos, parámetros edáficos.

1. Introducción

Los estudios sobre autoecología de las principales especies forestales arbóreas españolas, cuya primera publicación data de 1967, son iniciados por los profesores J.M. Gandullo y A. Nicolás en el Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias (IFIE). Superando poco a poco las limitaciones tecnológicas del inicio, pero manteniendo la idea de caracterizar el hábitat de cada especie haciendo un muestreo en masas representativas que permitiera ligar la información sobre clima, suelo y estado selvícola, se fueron extendiendo estos estudios, y publicando mediante monografías, a las especies con mayor representación territorial e importancia económica.

Tras un largo proceso, no exento de dificultades administrativas y presupuestarias, los investigadores Otilio Sánchez-Palomares y Gregorio Montero y sus equipos en el INIA completan los estudios de todas las especies arbóreas más relevantes. En 2015 se termina de recopilar la información para 19 taxones (21, si consideramos sendas subespecies de dos de las especies) y una comunidad vegetal, incluyendo analíticas edáficas de unos 3000 puntos de muestreo. El resumen de este proceso y sus resultados quedó expuesto con detalle en López-Senespleda et al. (2018), trabajo en el que se incluye una exhaustiva información complementaria y en el que se

analiza también la evolución de las metodologías aplicadas, paralela a la innovación de los métodos estadísticos y al desarrollo de la informática.

Esta importante y única base de datos es la que otorga singularidad, gran fiabilidad y potencia a ModERFoRest (*Modelling Environmental Requirements for Forest Restoration*), aplicación informática que tiene su origen precisamente en esta línea de investigación iniciada hace más de medio siglo. Ha sido desarrollada por Föra forest technologies SLL, Carlos Rodríguez Núñez y Karontek S.L.U. en el lenguaje C++, y se distribuye como software gratuito, sin ningún tipo de garantía, lo que permite su difusión de manera libre a la comunidad científica y técnica. La versión actual únicamente funciona sobre el SO Windows. El instalador, junto con el manual de usuario y las plantillas y ejemplo de los archivos de entrada de datos pueden descargarse en el siguiente enlace: (<https://www.inia.es/serviciosyrecursos/recursosinformaticos/modernforest/Paginas/ModERFoRest.aspx>).

ModERFoRest sirve para un buen número de procesos de modelización y cálculo en el campo de la ecología forestal, aunque no sólo en ella, y permite integrar, divulgar y aplicar la información derivada de los estudios de Autoecología de Especies Forestales. Los modelos inspiradores para esta herramienta, en cuanto a su formato y usabilidad, han sido el programa MAXENT (Phillips et al. 2004) y el programa PINARES (Gandullo y Sánchez-Palomares 2000; Gandullo y Sánchez Palomares 1994)

2. Taxones y variables

Con el propósito de facilitar al máximo su manejo, en todos los módulos y herramientas de ModERFoRest se utiliza el mismo modelo de datos para los parámetros ecológicas (tanto de entrada como de salida) y la misma codificación de taxones. La base de datos interna cuenta con un total de 74 variables (3 fisiográficas, 42 climáticas, 25 edáficas y 4 edafoclimáticas), aunque no todos los taxones cuentan con todas ellas.

Por su parte, se ha empleado una abreviatura para cada uno de los taxones incluidos en la aplicación (Tabla 1). La información relativa a cada uno de ellos proviene de los respectivos trabajos de autoecología paramétrica, cuya finalización se alcanzó, como se ha mencionado más arriba, en 2015. En la Tabla 1 se muestra, además, el número de parcelas incluidas en la base de datos, sobre cuyos detalles remitimos al lector a la publicación relativa a cada taxón. Las referencias de todas ellas se recopilaron en López-Senespleda et al. (López-Senespleda et al. 2018)

Tabla 1. Codificación de taxones disponibles en ModERFoRest y, en su caso, del resultado devuelto por las ecuaciones predictivas de la calidad de estación. En el caso del Monteverde, obviamente, se trata de un sintaxón sensu lato.

Taxón	Número parcelas	Código	Calidad de estación-Variable respuesta
<i>Abies alba</i>	43	AAB	-
<i>Castanea sativa</i>	182	CST	-
<i>Fagus sylvatica</i>	235	FSY	Altura dominante (m) a los 100 años
<i>Juniperus thurifera</i>	120	JTH	Altura dominante (m) a los 100 años
Monteverde	44	MON	-
<i>Pinus canariensis</i>	61	PCA	Altura dominante (m) a los 50 años
<i>Pinus halepensis</i>	135	PHP	Clase de calidad
<i>Pinus nigra</i>	123	PNG	Altura media (m) a los 50 años
<i>Pinus pinaster ssp. atlantica</i>	20	PPTA	Clase de calidad
<i>Pinus pinaster ssp. mesogeensis</i>	115	PPTM	Clase de calidad
<i>Pinus pinea</i>	205	PPN	Altura media (m) a los 50 años

<i>Pinus radiata</i>	174	PRA	Clase de calidad
<i>Pinus sylvestris</i>	127	PSY	Clase de calidad
<i>Pinus uncinata</i>	48	PUN	-
<i>Prunus avium</i>	50	PAV	-
<i>Quercus faginea</i>	117	QFG	-
<i>Quercus ilex ssp. ballota</i>	336	QIXB	-
<i>Quercus ilex ssp. ilex</i>	64	QIXI	-
<i>Quercus petraea</i>	69	QPT	-
<i>Quercus pyrenaica</i>	340	QPY	-
<i>Quercus robur</i>	94	QRB	-
<i>Quercus suber</i>	173	QSB	-

3. Estructura de la aplicación y formatos soportados

En la versión más reciente de ModERFoRest (3.1.0) se proporciona un instalador. Basta con ejecutarlo y seguir sus instrucciones para completar con éxito la instalación. En caso de que al ejecutar la aplicación por primera vez aparezca una advertencia sobre seguridad de Windows, habrá que hacer clic en “Más información” y, a continuación, en “Ejecutar de todas formas”, para poder abrirla. También esta primera vez nos solicitará la elección de idioma (actualmente sólo disponible en castellano e inglés).

Una vez iniciada, aparecerá una ventana en la que hay disponibles cuatro menús (Figura 1).

- El menú *Fichero* permite cerrar la aplicación.
- El menú *Ayuda* contiene el manual completo de la aplicación en formato PDF.
- El menú *Módulos* permite acceder a cada uno de los tres módulos descritos más adelante. Como alternativa se puede acceder a cada uno de los módulos clicando en el icono correspondiente que aparece debajo de los menús.
- Por último, en el menú *Herramientas* se puede abrir cualquiera de las tres calculadoras (edáfica, climática o combinada) disponibles en la aplicación, tal y como se detalla más adelante.

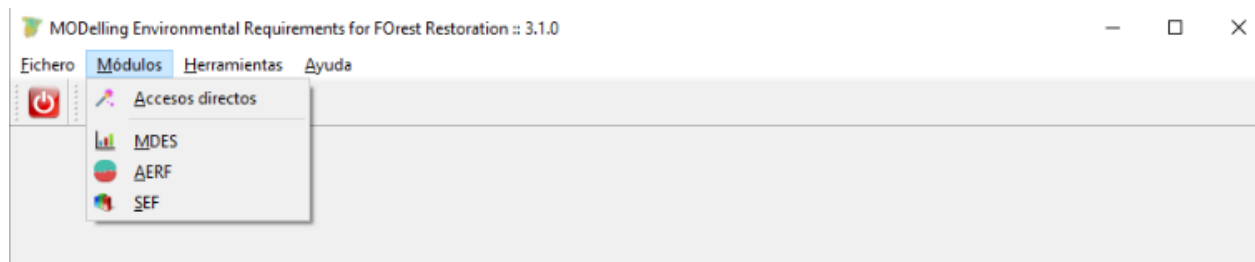


Figura 1. Ventana de inicio de ModERFoRest con el menú Módulos desplegado.

Como se ha mencionado, la aplicación consta de tres módulos que se integran en un núcleo común y tres herramientas de cálculo de datos, que permiten generar archivos directamente utilizables en los tres módulos.

Cada uno de los tres módulos desarrolla unas aplicaciones distintas:

1. Módulo MDES (Modelos de Distribución de Especies): permite la elaboración de modelos de distribución de la especie de interés a partir de variables ambientales en formato ráster y localizaciones de presencia del taxón estudiado.
2. Módulo AERF (Adecuación de Especies para la Restauración Forestal): ordena las especies en función de su idoneidad u homologación ecológica para una determinada estación o rodal, de manera análoga a como lo hacía el programa PINARES.

3. Módulo SEF (Similitud entre Estaciones Forestales): indica el punto de muestreo de la base de datos, con posibilidad de usarlo como fuente semillera, de la especie elegida que más se asemeja al rodal estudiado.

Por su parte, las tres calculadoras implementadas son:

1. Calculadora edáfica: permite obtener las variables edáficas, agregadas para cada perfil, a partir de datos obtenidos por analítica de horizontes. Además, permite el cálculo de dichas variables en la parte más superficial del perfil, pudiendo elegir la profundidad (espesor) que se desea asignar a ésta .
2. Calculadora climática: permite el cálculo de un amplio abanico de variables climáticas a partir de datos brutos de estaciones meteorológicas o de modelos ráster de precipitaciones y temperaturas mensuales.
3. Calculadora combinada: permite integrar, en un único procedimiento, las dos calculadoras anteriores para producir un único archivo de salida directamente utilizable en los módulos AERF y SEF.

Ambas calculadoras devuelven el resultado en el formato y las unidades necesarias para ser utilizados en cualquiera de los tres módulos arriba mencionados.

Tanto en los tres módulos como en las tres calculadoras, los archivos de tipo tabla se manejan en formato csv, estando soportadas tanto la configuración española (separador decimal la coma, separador de columnas, el punto y coma), como la anglosajona (separador decimal el punto, separador de columnas, la coma). En el caso de los archivos tipo ráster, el formato soportado es el asc en sistema de coordenadas proyectadas (UTM).

4. Módulo MDES

Este módulo permite generar, en formato ráster, modelos de distribución de especies a partir únicamente de un número suficiente de localizaciones de presencia de la especie a modelizar y de una serie de variables ambientales en formato ráster del territorio de interés. El módulo cuenta con tres submenús: Opciones de entrada, Opciones del modelo y Opciones de salida.

Opciones de entrada

Este submenú permite definir tanto los datos de presencia del taxón a modelizar como de los rásteres (en proyección UTM) de variables ambientales que definirán su hábitat. Todas las técnicas para modelizar la distribución de especies precisan, como mínimo, de una base de datos de presencias. Como presencias se entiende aquellas localizaciones geográficas, con sus características climáticas, fisiográficas o edáficas en las que una especie determinada es capaz de vivir y reproducirse en un momento dado. La localización de las observaciones incluidas en este archivo de presencias debe representar lo mejor posible la distribución actual del taxón a modelizar, por lo que lo óptimo es que se derive de un diseño estadístico. Además, es recomendable que se cuente al menos con 30 observaciones representativas de la variabilidad del hábitat del taxón para poder obtener unos resultados mínimamente fiables. Las observaciones consideradas como presencias se introducirán en el programa por medio de un archivo CSV, que debe contener únicamente tres columnas, siendo la primera de ellas un identificador del punto y las dos siguientes las coordenadas UTM en el sistema de referencia deseado que, como es obvio, ha de coincidir con el que tengan definidos los rásteres de variables ambientales.

Por su parte, los rásteres de variables ambientales han de compartir el mismo sistema de referencia de coordenadas (es indiferente cuál sea mientras se trate de coordenadas proyectadas), así como el paso de celda. Su extensión puede no ser la misma aunque, lógicamente, el resultado se podrá calcular únicamente en la intersección de todos los rásteres. La forma de indicar a la

aplicación los r stres a emplear es introduciendo en la ventana correspondiente la carpeta donde se ubican dichos archivos. Es importante tener en cuenta que cuantos más archivos ráster de variables ambientales se utilicen, más largo será el proceso de cálculo y no necesariamente será mejor el resultado. La existencia, a menudo, de fuertes correlaciones entre variables ambientales, implica que la introducción de más variables resulta redundante o incluso contraproducente, al enmascarar el efecto de otros parámetros.

Las variables ambientales empleadas se dejan al criterio del usuario (de hecho, ni siquiera es preceptivo que sean variables de tipo ambiental, podría emplearse cualquier otra siempre que se facilite en formato ráster asc). Sin embargo, la aplicación permite activar la opción de ‘‘Usar variables recomendadas para la especie’’, que será diferente para cada una de las especies estudiadas en el proyecto RTA2010-00095 en el que se realizó la síntesis de todos los proyectos de autoecología de esta línea de investigación. Si se activa dicha casilla, la aplicación solicitará al usuario unas variables ambientales concretas, siendo opcional el uso de variables sólo climáticas o de una combinación de variables climáticas y edáficas.

Opciones del modelo

En este submenú el usuario puede seleccionar tres tipos de opciones: algoritmo (y sus parámetros asociados) a utilizar, método de validación del modelo (y sus parámetros asociados) y territorio sobre el que aplicar la predicción del índice de adecuación (Figura 2).

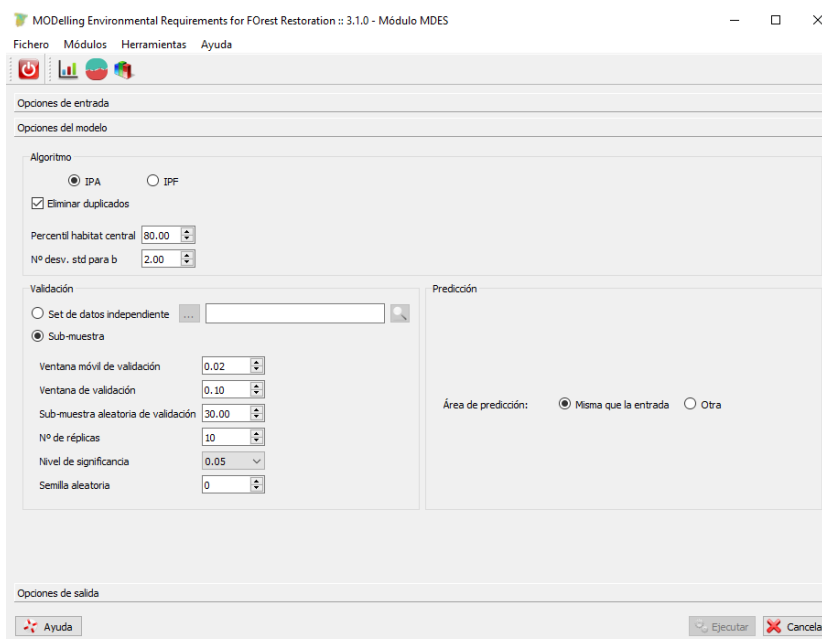


Figura 2. Ventana del submenú ‘‘Opciones del modelo’’.

Los algoritmos disponibles son los denominados índice de potencialidad aditivo (IPA) y el índice de potencialidad factorial (IPF). Aunque el sustantivo ‘‘potencialidad’’ fue el más empleado tradicionalmente en esta línea de investigación, en la actualidad se prefiere emplear los de ‘‘adecuación’’ o ‘‘idoneidad’’, para evitar confusiones con la connotación a la productividad que tiene el primero.

El algoritmo IPA se basa en la aplicación de la teoría de campos a la ecología, EFT en sus siglas en inglés (Wu et al. 1985), aplicada al espacio p-dimensional no euclídeo que definen los parámetros definidores el hábitat (Alonso Ponce et al. 2010a, 2010b). La forma de cuantificar la

influencia del conjunto de observaciones en cada punto de P consiste en una función dependiente de la distancia (función de potencial), definida de forma que permita al índice tener carácter aditivo, ser monótona decreciente con la distancia y que devuelva valores acotados entre 0 y 1 para facilitar la comparación entre distintas especies y territorios.

Por su parte, el algoritmo IPF se establece como la contribución de cada parámetro (variable ambiental) a la aptitud de la estación con respecto a la especie estudiada, en función de la posición que ocupa dentro del hábitat marginal o central el valor que toma el parámetro correspondiente. Cada parámetro tiene definidos sus límites superior (LSi) e inferior (Lli), sus umbrales superior (USi) e inferior (Uli) y su media (Mi). El índice de idoneidad se calcula mediante una función que implica el producto de los valores obtenidos para cada parámetro, de tal manera que quede acotado entre 0 y 1 (Rubio y Sánchez Palomares 2006).

En la sección de validación se proporcionan dos opciones generales: bien proporcionar una muestra independiente, en cuyo caso se solicitará la ubicación del archivo CSV con dicha muestra, o bien realizar una validación cruzada mediante una submuestra del archivo CSV de presencias facilitado en el submenú de opciones de entrada. En este caso, se pueden establecer tanto el porcentaje de las submuestras de entrenamiento y validación, el número de réplicas a realizar y el ancho y el desplazamiento de la ventana para construir la curva de Boyce-Hirzel. Esta curva constituye una herramienta clave para la diagnosis de la calidad del modelo conseguido, y es una adaptación (Alonso Ponce et al. 2011) del método propuesto por Hirzel et al. (Hirzel et al. 2006) y Boyce et al. (Boyce et al. 2002). En la diagnosis también se incluyen otros indicadores como la sensibilidad y el test de Kolmogorov-Smirnov para distribuciones empíricas con el fin de evaluar la semejanza entre las muestras de calibración y de validación (bien sea por submuestreo o bien con muestra independiente) para distribuciones empíricas. Se aplica la generalización robusta de dicho test (García Pérez 2005; Mee 1990).

Por último, en la sección del área de predicción, si se elige una distinta a la empleada para entrenar el modelo, se solicitará al usuario cargar los rásteres de las mismas variables ambientales empleadas en el entrenamiento pero referidas al área de predicción deseada. Ésta es la herramienta que permite la predicción de la distribución del taxón objetivo en un escenario climático diferente al actual, sin más que introducir los rásteres de las variables climáticas del escenario deseado.

Opciones de salida

Las Opciones de salida permiten definir el directorio donde se grabarán todos los resultados y el nombre de la subcarpeta correspondiente. La aplicación genera unos resultados por defecto que son:

- Cinco capas ráster de idoneidad: valor medio del índice, desviación típica, el máximo y el mínimo y el coeficiente de variación del modelo medio.
- Índices de marginalidad (Gómez-Sanz 2019): un ráster con el índice de marginalidad para cada variable ambiental, así como uno para el global de las variables climáticas (si existen), otro para las edáficas (si existen) y, por último, uno para el indicador global de marginalidad.
- Si entre los rásteres de variables ambientales cargados por el usuario están todas las variables necesarias para el cálculo de la calidad de estación de la especie seleccionada, también se devuelve un ráster con dicho cálculo. Esta calidad de estación se calcula según las ecuaciones predictivas publicadas en las respectivas publicaciones (ver Tabla 1). A fecha de hoy existen ecuaciones para los taxones FSY, JTH, PCA, PHP, PNG, PPN, PPTA, PPTM, PRA y PSY.

- Informe resumen (en pdf): incluye la información sobre las capas y datos introducidos, las condiciones de análisis, el hábitat derivado de los datos proporcionados y la validación del modelo.
- Validación del modelo: gráfico de Boyce-Hirzel, puntos de corte definidos por el usuario sin normalizar, sensibilidad y test de Kolmogorov-Smirnof.

5. Módulo AERF

La lógica que subyace a este módulo y sus fundamentos teóricos son los mismos que los ya expuestos en el módulo anterior. En este caso, sin embargo, no se trata de generar un modelo territorial de idoneidad para un taxón determinado sino de ordenar de mayor a menor idoneidad todos los taxones integrados en la base de datos (Tabla 1), para cada una de las localidades (parcelas, fincas, rodales, etc.) de interés.

Para poder operar, lógicamente, hemos de proporcionar a la aplicación los valores de las variables ambientales que el usuario considere relevantes. Esto se realiza sin más que cargando un archivo csv (del cual se proporciona una plantilla en formato excel para exportar a csv) en el que la primera columna debe tener un identificador de cada punto. El resto de columnas deben existir pero no es necesario que todas tengan datos; como es obvio, sólo podrán emplearse en el cálculo aquéllas para las que existan datos válidos.

La aplicación permite la utilización de hasta un máximo de 15 variables simultáneamente, del tipo que sea (fisiográficas, climáticas o edáficas), a escoger entre todas las disponibles en la base de datos. Sin embargo, es altamente recomendable no escamotear el empleo de variables edáficas en este módulo. Además, la aplicación también ofrece la posibilidad de utilizar una serie de variables recomendadas, fruto del análisis de todos los trabajos de autoecología paramétrica de las especies forestales españolas.

Una vez ejecutado el cálculo la aplicación genera dos archivos:

1. Un archivo txt con la lista de variables empleadas en el proceso.
2. Un archivo csv con tres columnas fijas y un número variable de columnas en función de las variables empleadas. Así, por ejemplo, en la Figura 3, las tres columnas fijas (resaltadas en naranja) corresponden al identificador del punto o estación (IdPunto), la segunda la especie y la tercera el índice de idoneidad (IPA o IPF, según el algoritmo elegido). Para cada estación se devuelven las especies ordenadas de mayor a menor índice de idoneidad. A continuación aparecen sendas columnas (en verde en la figura) con los índices de marginalidad de cada variable ambiental, así como de cada grupo de variables (edáficas y climáticas) y total (en azul).

Además, si las variables facilitadas por el usuario lo permiten, se calcula también el índice de calidad de estación o índice de sitio predicho (columna IS en la Figura 3) para cada especie en cada estación, según las ecuaciones publicadas en las monografías correspondientes. A fecha de hoy existen ecuaciones para los taxones FSY, JTH, PCA, PHP, PNG, PPN, PPTA, PPTM, PRA y PSY (ver Tabla 1).

IdPunto	Especie	FPI	IM TNF	IM TXC	IM PT	IM PP	IM PV	IM IH	IM ISQ	IM CLIMA	IM EDAF	IM	IS
19 PNG		0.973211	0.008218	0	0	0	0	0	0	0.008218	N/A	N/A	12.820632
19 FPTM		0.972633	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A	N/A	6.559521
19 QFG		0.969735	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A	N/A	N/A
19 QSB		0.967133	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A	N/A	N/A
19 CST		0.965377	0	0	-0.004335	0	0	0	0	0.004335	N/A	N/A	N/A
19 QFY		0.963343	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A	N/A	N/A
19 QIXB		0.951517	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A	N/A	N/A
19 FHP		0.927839	0	0	0.014445	0.006168	0	0.028421	0	0.028421	N/A	N/A	4.787624
19 TTH		0.914119	0.114585	0	0.008495	0.006561	0	0	0	0.114585	N/A	N/A	11.578095
19 FPN		0.89068	0	0	0.020465	0.028101	0	0.168339	-0.021691	0.168339	N/A	N/A	9.153852
19 FNV		0.889996	0	0.004415	0	0	0	0	0.191607	0.191607	N/A	N/A	N/A
19 FSY		0.874209	0.267158	0.267159	0	0	-0.017214	0	0.023855	0.267159	N/A	N/A	6.359272
19 AAB		0	0.930962	1	-0.749422	-0.619766	-1	-1	1	1	N/A	N/A	N/A
19 FSY		0	0	0.793832	0	-0.016691	-0.961401	-0.006985	1	1	N/A	N/A	15.879146
19 MON		0	-1	1	1	1	1	1	-1	1	N/A	N/A	N/A
19 PCA		0	-1	1	1	1	1	1	-1	1	N/A	N/A	24.522299
19 FPTA		0	-1	1	-0.218224	-0.10902	-0.005922	-0.097669	0.105691	1	N/A	N/A	5.484563
19 FRA		0	-0.11785	0.952856	-0.956392	-0.666801	-0.361601	-0.98729	0.946762	0.98729	N/A	N/A	10.045989
19 FUN		0	1	1	-0.022135	-0.022891	-1	-0.349231	1	1	N/A	N/A	N/A
19 QIXI		0	0	0.005359	0	0	-0.906332	0	0.127306	0.906332	N/A	N/A	N/A
19 QPT		0	0	0.088117	-0.018132	-0.129746	-1	-0.099779	1	1	N/A	N/A	N/A
19 QRB		0	0	0.756328	-0.30919	-0.212275	-0.033991	-0.219705	0.072915	0.756328	N/A	N/A	N/A

Figura 3. Ejemplo de resultado del módulo AERF.

6. Módulo SEF

En este módulo la aplicación calcula, para cada estación (parcela, finca, rodal, etc.) facilitada por el usuario, el posible origen de la semilla más adecuado, por su similitud ecológica, de entre todas las localizaciones contenidas en las bases de datos de ModERFoRest, bien procedentes de los trabajos de autoecología (López-Senespleda et al. 2018), bien de rodales semilleros selectos estudiados desde una perspectiva autoecológica (Gómez-Sanz et al. 2014). Estos últimos únicamente están disponibles en esta versión para *Abies alba*, *Fagus sylvatica*, *Pinus sylvestris* y *Pinus uncinata*.

La similitud ecológica se evalúa mediante la distancia de Mahalanobis, empleando como matriz de varianzas-covarianzas la calculada a partir de la base de datos de los trabajos de autoecología de la especie correspondiente. El valor de la distancia de Mahalanobis puede oscilar entre 0 (igualdad exacta en todas las variables de las dos estaciones comparadas) e infinito, siendo mayor la distancia cuando menor es la homologación entre estaciones.

La forma de operar es análoga al módulo AERF (hay que proporcionar un archivo csv con las variables de interés para cada estación, así como seleccionar las variables ambientales que se deseen o las recomendadas por la aplicación), si bien en este caso, lógicamente, hay que seleccionar la especie objetivo. Otra diferencia sustancial es que, en este módulo, entre las variables recomendadas siempre van a existir variables edáficas. Es altamente recomendable no utilizar este módulo sin información edáfica disponible.

Una vez ejecutado el cálculo la aplicación genera:

1. Un archivo txt con la lista de variables empleadas en el proceso.
2. Un archivo csv con el resultado del análisis relativo a las localizaciones contenidas en las bases de datos de los trabajos de autoecología, con seis columnas (Figura 4): la primera corresponde al identificador del punto o estación (IdPunto) del usuario; la segunda, a la parcela de la base de datos de autoecología; la tercera y la cuarta a la provincia y el municipio donde se ubica dicha parcela; la quinta al identificador original de la parcela según aparece en la publicación correspondiente; por último, la sexta es la distancia calculada entre las dos estaciones. Para cada estación se devuelven las parcelas de autoecología ordenadas de menor a mayor distancia (es decir, de mayor a menor similitud).
3. Si la especie elegida está entre las cuatro para las que existen datos de Rodales Semilleros Selectos oficiales, se genera también un fichero extra análogo al anterior, salvo que en él no existen columnas de provincia, municipio e identificador de parcela.

IdPunto	IdPunto (aut)	Provincia	Municipio	Parcela	Distancia
19	635	Tarragona	Vimbodí i Poblet	IV2	1.190143
19	634	Tarragona	Vimbodí i Poblet	IV1	1.233577
19	4076	Castellón	Castell de Cabres	CS02PS	1.685993
19	636	Tarragona	La Sénia	IV3	1.730397
19	589	Barcelona	Santa Eulàlia de Riuprimer	IA07	1.756924
19	1410	Granada	Monachil	VI2	1.805296
19	588	Barcelona	Santa Eulàlia de Riuprimer	IA06	1.864314
19	1409	Granada	Monachil	VI1	1.928313
19	637	Tarragona	La Sénia	IV4	1.952978
19	590	Barcelona	Gurb	IA08	1.979876
19	4088	Orense	Bande	OU01PS	2.024095
19	625	Zaragoza	Luesia	IC07	2.138574
19	963	Segovia	Real Sitio de San Ildefonso	IIIA06	2.272353
19	4078	Ávila	Navarredonda de Gredos	AV01PS	2.284324
19	965	Segovia	El Espinar	IIIA08	2.290728
19	593	Barcelona	Vilanova de Sau	IA11	2.293409
19	592	Barcelona	Vilanova de Sau	IA10	2.314485
19	591	Barcelona	Sant Julià de Vilatorrada	IA09	2.31452
19	975	Guadalajara	Condemios de Arriba	IIIC03	2.367005
19	623	Zaragoza	Salvaterra de Esca	IC05	2.395282
19	969	Madrid	Guadarrama	IIIB01	2.430199
19	971	Madrid	Rascafría	IIIB03	2.453113
19	973	Guadalajara	Cantalojas	IIIC01	2.469354
19	594	Barcelona	Vilanova de Sau	IA12	2.475642
19	974	Guadalajara	Galve de Sorbe	IIIC02	2.476915
19	621	Navarra	Navascués/Nabaskoze	IC03	2.482919
19	945	Soria	Santa María de las Hoyas	IIB12	2.494773

Figura 4. Ejemplo de resultado del módulo SEF.

7. Calculadoras de ModERFoRest.

ModERFoRest proporciona sendas herramientas para calcular de manera ágil variables tanto climáticas como edáficas a partir de datos brutos de campo o de estación meteorológica (datos mensuales), de tal manera que sean fácilmente utilizables en los tres módulos de la aplicación, o en cualesquiera otros trabajos. Así mismo, existe una calculadora que permite integrar ambas calculadoras y generar un único archivo de salida con todas las variables (edáficas y climáticas) listo para ser utilizado como entrada en los módulos AERF y SEF. Para acceder a las calculadoras basta con clicar en Herramientas y elegir la que se desee.

Calculadora climática

La calculadora climática computa hasta 38 parámetros climáticos a partir de datos medios mensuales de precipitación y temperatura (tanto media como máximas y mínimas), además de otros valores adicionales específicos para ciertos parámetros, como a continuación se verá. La herramienta permite la introducción de datos tanto en forma de tabla (formato CSV) o en forma de ráster (formato asc) (Figura 5).

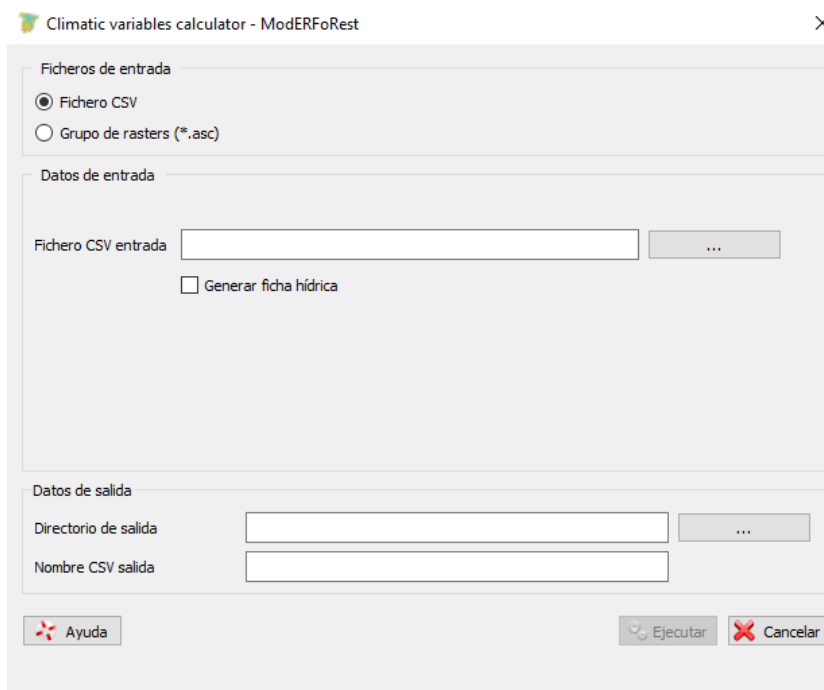


Figura 5. Interfaz de la calculadora climática.

Si el formato elegido es el csv, el archivo ha de tener las siguientes 53 columnas (en este orden), aunque no tengan datos:

- PointId: identificador de fila.
- PT1-PT12: las doce precipitaciones mensuales.
- TMAX1-TMAX12: las doce temperaturas medias de las máximas mensuales.
- TMIN1-TMIN12: las doce temperaturas medias de las mínimas mensuales.
- AVGT1-AVGT12: las doce temperaturas medias mensuales.
- LAT: latitud del punto en grados decimales.
- NH: número de horas de sol al año.
- KP: coeficiente de corrección litológica para la productividad potencial (Gandullo y Serrada 1977).
- CRAD: capacidad de retención de agua disponible del suelo (mm) (Domingo Santos et al. 2006).

Únicamente es indispensable introducir, aparte del identificador de punto, las columnas PT1-PT12 y AVGT1-AVGT12. El resto de variables no son obligatorias, pero si no están disponibles no se podrán calcular todos los parámetros climáticos. Además, si se activa la opción correspondiente, se generará una ficha hídrica para cada estación incluida en el archivo de entrada, siempre que esté disponible el valor de CRAD. Como es obvio, estos valores de entrada a la calculadora pueden ser relativos a condiciones climáticas actuales, futuras o hipotéticas (para simulaciones).

En el caso de que se desee realizar el cálculo en formato ráster, hay que indicarle a la aplicación cuál es la carpeta donde se ubican los rústeres (formato ASC) con las mismas 48 variables de precipitación y temperatura que en el caso anterior, así como los rústeres de horas de sol, coeficiente de corrección litológica y CRAD, si se dispone de ellos. Estos tres, así como los de temperaturas máximas y mínimas no es obligatorio que existan pero, al igual que en el formato CSV, en caso de ausencia no se podrán calcular todos los parámetros. No es necesario incluir un ráster con la latitud, ya que el programa la calcula a partir de los rústeres facilitados, siempre que se introduzca en la ventana el hemisferio y el huso UTM correspondiente. Somos conscientes de la

dificultad (por no decir imposibilidad) de disponer de rásteres de CRAD para territorios incluso pequeños; sin embargo, es necesario destacar la potencia que supone contar con esta herramienta ya que permite simular cuáles serían las condiciones edafoclimáticas del territorio estudiado sin más que generar mediante SIG rásteres con distintas hipótesis de CRAD en el territorio de interés.

Calculadora edáfica

La calculadora edáfica computa hasta 23 parámetros a nivel de perfil a partir de la información bruta por horizontes (Figura 6). La ponderación se realiza por espesor de los horizontes en el caso de las propiedades físicas del suelo, mientras que sigue el criterio de Russel-Moore para las propiedades químicas (Russel y Moore 1968). Además, permite calcular tanto la materia orgánica como el contenido en nitrógeno y la relación carbono-nitrógeno también para la parte superficial del perfil, siendo la profundidad que define dicho espacio modificable por el usuario y establecido por defecto en 25 cm.

El usuario debe proporcionar un archivo en formato csv con los valores de las variables de propiedades edáficas por horizontes, así como un identificador de cada perfil, de cada horizonte (puede ser genético o no, si bien es altamente recomendable que sea lo primero) y su espesor en centímetros. Además, en la columna “Roca continua” debe introducirse un 1 en caso de que el horizonte inmediatamente inferior lo constituya un estrato rocoso continuo no fisurado, y 0 en caso contrario. Por último, en la columna “Pendiente” ha de introducirse la pendiente del terreno donde se realizó la calicata, en porcentaje.

Figura 6. Interfaz de la calculadora edáfica.

Una vez cargado el archivo CSV y clicando en “Procesar datos”, en la parte inferior de la calculadora aparecerán los parámetros calculados por perfiles, pudiendo ser exportados en formato CSV (Exportar salida como CSV).

Calculadora combinada

Esta herramienta permite, con los mismos archivos de entrada empleados en las dos calculadoras anteriores, generar un archivo único de salida con todos las variables calculadas, listo para ser empleado a su vez como entrada para los módulos AERF y SEF. En la calculadora combinada no es posible trabajar con formato ráster, como se hacía en la calculadora climática. Resulta necesario aclarar que, dado que el valor de CRAD puede introducirse en el archivo de entrada de datos climáticos, pero también puede calcularse a partir de los datos edáficos, el valor

derivado de estos últimos tendrá prioridad sobre el primero en el caso de que se proporcione por las dos vías. En cualquier caso, el usuario puede, en un mismo proceso de cálculo, proporcionar el valor de CRAD a través del archivo de entrada climática para unas estaciones, y para otras calcularlo a partir de los datos edáficos.

8. Discusión

En esta comunicación se presentan los principales atributos de ModERFoRest, una aplicación fácil de manejar que realiza análisis en los campos de la modelización de la distribución de especies, la homologación ecológica y la planificación forestal, entre otros. El programa está particularmente diseñado para ayudar a la toma de decisiones en proyectos de reforestación y de diagnóstico de la estabilidad de los bosques existentes frente a las condiciones ambientales actuales y futuras. Además, ModERFoRest ofrece la oportunidad de poner al servicio de técnicos e investigadores un gran cúmulo de información de gran valor, particularmente edáfica, cuya utilización, dado el número y dispersión temporal de publicaciones y la variedad de sus formatos, resultaría de otra manera imposible.

El primer módulo de la aplicación (MDES), pensado para trabajar a gran escala, permite la elaboración de modelos de distribución de especies basados en variables ambientales en formato ráster. Así, se puede obtener información sobre la homologación ecológica de un territorio para todas las especies que se deseen. Para ello se necesita información ambiental (fisiografía, clima o suelo) y un buen número de coordenadas en las que la especie está presente.

En este módulo, un aspecto crítico es la selección de las variables ambientales a emplear (p.ej. Austin 2002; Araújo y Guisan 2006). La aplicación no está concebida para determinar automáticamente qué variables utilizar de entre las disponibles, sino para ayudar a la toma de la decisión mediante: (i) recomendación del conjunto de variables ambientales óptimo para cada taxón (basada en los resultados de los trabajos autoecológicos correspondientes) y (ii) ofreciendo algoritmos (IPA) cuyo diseño matemático está específicamente orientado a manejar variables altamente correlacionadas (Alonso Ponce et al. 2010b). Además, la resolución espacial de los rásteres ambientales debe ser determinada en función de la extensión del área de interés: para escalas regionales o mayores, un tamaño de celda de un orden de magnitud de 1 km debe ser suficiente para obtener resultados solventes, a no ser que la zona de estudio sea muy montañosa. Por último, el número de registros en el conjunto de datos de presencias no necesita ser particularmente elevado, pero debería superar siempre en torno a 30-50, dependiendo de la variabilidad ambiental del área de ocupación actual del taxón. Si se dispone de una gran muestra, recomendamos, además de activar la opción “eliminar duplicados”, reservar una gran proporción de los registros para el proceso de validación.

Resulta igualmente destacable la gran eficiencia de la aplicación en el uso de recursos: un modelo de distribución de especies construido con el algoritmo IPA (notablemente más demandante que el IPF), una muestra de presencias de 3876 registros (con un 90% de observaciones reservadas para validación) y cinco rásteres ambientales (de 1 km² de resolución), para toda la Península Ibérica y el Archipiélago Balear (aproximadamente 600.000 km²) tardó 5 min para cada réplica en un Intel Core i7-4712MQ a 2.30GHz con 16.0 GB de RAM.

Para otros tipos de consulta, análisis y diagnóstico a nivel de rodal (módulos AERF y SEF), requeridos especialmente por los gestores forestales, se suelen plantear dos tipos de diagnósticos:

- A. Para proyectistas de repoblaciones forestales: información sobre especies compatibles con el rodal a repoblar y sobre la mejor procedencia de semilla para la o las especies elegidas; ambas cuestiones en la situación actual y para posibles escenarios de cambio climático:

1. Tras el estudio ecológico y florístico de un rodal a repoblar, incluidas calicata y analítica edáficas, la aplicación devuelve todas las variables necesarias para su caracterización ecológica (parámetros climáticos, edáficos y edafoclimáticos). Esta caracterización permite generar hipótesis sobre los atributos ecológicos de la estación en diferentes escenarios de cambio climático si se proporciona la información adecuada.
 2. Tras hacer el estudio ecológico y florístico de un rodal a repoblar, incluidas calicata y analítica edáficas, se puede obtener un listado ordenado, de mayor a menor idoneidad, de los 22 taxones, con información sobre el nivel de compatibilidad de cada taxón y del grado de marginalidad con respecto a cada una de las variables ambientales empleadas.
 3. Si el usuario facilita datos correspondientes a la hipótesis de cambio climático que decida, se pueden simular variaciones de la lista anterior (especies que desaparecen, aparecen o cambian su adaptabilidad).
 4. Procedencia de semilla. Una vez elegido un taxón para la repoblación, aplicando el módulo SEF se obtiene el Rodal Semillero Selecto (RSS) o Fuente Semillera (FS) que tenga las condiciones ecológicas más semejantes al rodal a repoblar. Se puede encontrar la procedencia (FS) más adecuada o semejante a la situación definida entre todos los puntos muestreados de la especie elegida y que han servido para definir su hábitat y de los rodales selectos productores de semilla (RSS) de algunas especies.
- B. 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 también en la situación actual y para posibles escenarios de cambio climático.
1. Esta utilidad es análoga al caso A1, salvo que el objetivo no es caracterizar la estación con fines de restauración sino de tratamiento de la masa.
 2. Identificar el grado de marginalidad de las especies presentes a través de los factores que puedan resultar más limitantes.
 3. Con base en la posible marginalidad detectada y teniendo en cuenta los posibles escenarios de cambio climático, realizar un diagnóstico de estabilidad actual y futura de las especies. La comparación de la situación de inestabilidad en diferentes rodales aporta un criterio seguro para otorgar prioridad en la aplicación de tratamientos de mejora dentro de los montes de una comarca.

Como en cualquier otro ejercicio de modelización, tanto la calidad de los datos como la interpretación de los resultados son aspectos críticos a valorar. Por ejemplo, aunque la aplicación permite la utilización exclusiva de datos climáticos en todos sus módulos, es extremadamente recomendable incluir variables edáficas en el análisis, principalmente en los módulos AERF y SEF, es decir, en investigaciones a escalas menores. Así pues, los resultados deber ser empleados, principalmente, para comparar diferentes situaciones temporales y espaciales, más que como una solución o propuesta inamovible.

9. Para el futuro

No ha estado nunca en el ánimo del equipo de personas que han desarrollado la aplicación el generar un producto definitivo y cerrado, sino, por el contrario, ofrecer a la comunidad científico-técnica un herramienta viva y en continua mejora. De hecho, desde su publicación en septiembre de

2021 y hasta enero de 2022, se han contabilizado ya más de 330 descargas y numerosas consultas y sugerencias tanto a través de la cuenta de correo habilitada para la aplicación (moderforest@inia.es) como en el curso de formación ofrecido a través de los Colegios de Ingenieros Forestales y de Ingenieros de Montes.

Son numerosas las mejoras incorporadas a la agenda de futuras versiones de la aplicación (además de, por supuesto, la corrección de pequeños *bugs* detectados en estos meses), entre las que destacan:

- Soportar rásteres en coordenadas geográficas.
- Soportar rásteres en formatos distintos a asc.
- Soportar tablas en formato excel.
- Distribuir versión compatible con el SO Linux.
- Incorporar nuevos parámetros.
- Incorporar nuevos rodales semilleros selectos.
- Desarrollar calculadora de Mahalanobis para permitir al usuario la evaluación de la distancia ecológica entre sus estaciones de interés.
- Guardar configuración para no tener que parametrizar todo cada vez que el usuario repite un análisis con pequeñas variaciones.
- Traducir a otros idiomas.

10. Conclusiones

La aplicación que se presenta tiene su origen en una longeva línea de investigación que ha generado una ingente cantidad de información de gran valor en el ámbito de la restauración y gestión forestales y en modelización ecológica, permitiendo su utilización gratuita de manera sencilla y versátil.

Aunque los algoritmos integrados en ModERFoRest fueron desarrollados en el ámbito de la modelización de la distribución de especies y, efectivamente, la aplicación permite este tipo de simulaciones a gran escala, el programa ofrece otras funcionalidades de gran valor para fundamentar decisiones en el ámbito de la gestión forestal y para colaborar en la investigación ecológica, para las cuales además, se apoya en un conjunto de datos, particularmente los edáficos, cuya exhaustividad, coherencia y rigor son difícilmente sustituibles.

ModERFoRest pretende ser una herramienta dinámica en continuo desarrollo, tanto para la corrección de posibles errores de funcionamiento como para la introducción de mejoras en su desempeño, fruto de la interacción con los usuarios. Para ello se ha habilitado una dirección de correo electrónico exclusiva para recibir todo tipo de sugerencias y avisos de mal funcionamiento.

11. Agradecimientos

Esta aplicación no habría sido posible sin la colaboración de los siguientes organismos (o de sus antecesores en el tiempo): CIFOR-INIA-CSIC; Universidad Politécnica de Madrid; Subdirección General de Política Forestal y Lucha contra la Desertificación (Dirección General de Biodiversidad, Bosques y Desertificación-MITECO). A lo largo de 48 años han colaborado en la toma de datos y elaboración de memorias 30 personas que quedan enumeradas en López-Senespleda et al. (2018). El último impulso hay que agradecerlo a Föra forest technologies SLL, Carlos Rodríguez Núñez y Karontek SLU. También queremos hacer mención a los futuros usuarios: siempre han estado presentes en la elaboración y serán los que en el futuro impulsen la mejora de la herramienta.

12. Bibliografía

Alonso Ponce, R.; Águeda, B.; Ágreda, T.; Modrego, M.P.; Aldea, J.; Fernández-Toirán, L.M. y Martínez-Peña, F., 2011. Rockroses and *Boletus edulis* ectomycorrhizal association: Realized niche and climatic suitability in Spain. *Fungal Ecol.* 4, 224-232.

Alonso Ponce, R.; Águeda, B.; Ágreda, T.; Modrego, M.P.; Aldea, J. y Martínez-Peña, F., 2010a. Un modelo de potencialidad climática para la trufa negra (*Tuber melanosporum*) en Teruel (España). *For. Syst.* 19, 208-220.

Alonso Ponce, R.; López Senespleda, E. y Sánchez Palomares, O., 2010b. 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.

Araújo, M.B., Guisan, A., 2006. Five (or so) challenges for species distribution modelling. *J. Biogeogr.* 33(10):1677-1688 Available online at: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01584.x>.

Austin, M.P., 2002. Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modelling. *Ecol. Modell.* 157(2-3):101-118.

Boyce, M.S.; Vernier, P.R.; Nielsen, S.E. y Schmiegelow, F.K.A., 2002. Evaluating resource selection functions. *Ecol. Modell.* 157, 281-300.

Domingo Santos, J.M.; Villarán, R.F. De; Juan, S.; Provens, E.C.P. De y 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.

Gandullo, J. y Sánchez-Palomares, O., 2000. Programa Pinares. *Montes* 60, 5-9.

Gandullo, J.M. y Sánchez Palomares, O., 1994. Estaciones ecológicas de los pinares españoles. ICONA. 188 pp. Madrid.

Gandullo, J.M. y Serrada, R., 1977. Mapa de Productividad Potencial Forestal de España E=1:1.000.000. INIA col. Monografías nº16. Madrid.

García Pérez, A., 2005. Métodos avanzados de estadística aplicada. Métodos robustos y de remuestreo. UNED. 255 pp. Madrid.

Gómez-Sanz, V., 2019. Site-scale ecological marginality: Evaluation model and application to a case study. *Ecol. Modell.* 408.

Gómez-Sanz, V.; Serrada, R.; Elena Roselló, R.; Fernández Yuste, J.A.; Garía Viñas, J.I. y López Leiva, C., 2014. Medio físico de rodales selectos de especies de forestales: *Pinus sylvestris* L. 144 pp. ECOGESFOR.

Hirzel, A.; Le Lay, G.; Helfer, V.; Randin, C.F. y Guisan, A., 2006. Evaluating the ability of habitat suitability models to predict species presences. *Ecol. Modell.* 199, 142-152.

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

Mee, R.W., 1990. Confidence-Intervals for Probabilities and Tolerance Regions Based on a Generalization of the Mann-Whitney Statistic. *J. Am. Stat. Assoc.* 85, 793-800.

Phillips, S.J.; Dudík, M. y Schapire, R.E., 2004. A maximum entropy approach to species distribution modeling, en: Proceedings, Twenty-First International Conference on Machine Learning, ICML 2004.

Rubio, A. y Sánchez Palomares, O., 2006. Physiographic and climatic potential areas for *Fagus sylvatica* L. based on habitat suitability indicator models. *Forestry* 79, 439-451.

Russel, J.S. y Moore, A.W., 1968. Comparison of different depth weightings in the numerical analysis of anisotropic soil profile data. *Proc. 9th Int. Cong. Soil Sci.* 4, 205-213.

Wu, H.; Sharpe, P.J.H.; Walker, J. y Penridge, L.K., 1985. Ecological field theory: a spatial analysis of resource interference among plants. *Ecol. Modell.* 29, 215-243.