

DEFINICIÓN DE ÁREAS POTENCIALES PARAMÉTRICAS DE ESPECIES FORESTALES. EL CASO DE *PINUS UNCINATA*

Agustín Rubio Sánchez ¹ y Otilio Sánchez Palomares ²

¹ Dpto. Silvopascicultura. E.T.S.I. de Montes. U.P.M. 28040-MADRID (España). Correo electrónico: agustin.rubio@upm.es

² CIFOR-INIA. Ctra. La Coruña km 7,5. 28040 MADRID (España)

Resumen

El interés por los estudios ecológicos de las estaciones forestales de determinadas especies forestales surge en la década de los años sesenta del siglo XX como apoyo para los trabajos de repoblación forestal. Desde entonces los distintos trabajos abordados por el antiguo I.F.I.E., el CIFOR del INIA y el Departamento de Silvopascicultura de la E.T.S.I. de Montes de la U.P.M. han ido dando entidad propia esta línea de trabajo que hoy en día se proyecta sobre otros centros de investigación forestal españoles y sobre otras universidades de nuestro país y de Sudamérica. La utilidad de estos trabajos se ve reflejada en el uso creciente de los resultados de la investigación por los servicios forestales de las distintas regiones españolas, tanto en los proyectos técnicos de repoblación forestal y en los estudios de evaluación de impacto ambiental de las repoblaciones, como en la planificación de la gestión forestal plasmada en los Planes Forestales Regionales. La consecución de uno de los objetivos fundamentales de estos trabajos, la cartografía de las áreas potenciales de expansión de la especie, basado en la definición del hábitat de la misma, se está pudiendo llevar a cabo ahora que se dispone de información geográfica de los parámetros estudiados. Ello implica obtener tantos índices de aptitud como parámetros ecológicos se hayan podido elaborar, los cuales se integran mediante un indicador de potencialidad en un sistema de información geográfico para la representación cartográfica. En concreto para el caso del pino negro, al no disponer de información edáfica de carácter paramétrico la definición del área potencial es fisiográfica y climática, aunque hemos realizado una corrección litológica. La validación de los modelos la hemos realizado con otras fuentes de información, una en relación a la vegetación real y otra por comparación con la propuesta de vegetación potencial fitosociológica.

Palabras claves: *Ecología forestal, Hábitat paramétrico, Área potencial, Pinus uncinata*

INTRODUCCIÓN

En la década de los años 60 se comienza a reconocer el interés e incluso la necesidad de que se realicen estudios ecológicos de las estaciones forestales de determinadas especies forestales a fin de disponer de un apoyo para los trabajos de repoblación forestal que se pretendían llevar a

cabo. En esos años la mayor parte de las repoblaciones que se proyectaba efectuar se iban a llevar a cabo sobre terrenos más o menos despoblados de matorral y las especies del género *Pinus* iban a ser las empleadas mayoritariamente por su robusto temperamento. Por ello se consideró oportuno comenzar los estudios autoecológicos con las especies propias de los pinares españoles.

Estos trabajos pioneros fueron realizados por el antiguo I.F.I.E. (Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias) hasta su extinción en el año 1972 e inicialmente abarcaron *Pinus sylvestris*, *P. pinaster*, *P. halepensis* y *P. radiata* (NICOLÁS Y GANDULLO, 1967, 1969; GANDULLO *et al.*, 1972, 1974). Animados por las conclusiones finales de la I Asamblea Nacional de Investigación Forestal celebrada en 1982 entre las que se establece *la necesidad de estudiar la ecología de las especies forestales* se promueven diversos estudios sobre *Pinus nigra* (SÁNCHEZ PALOMARES *et al.*, 1990, 1991) desde el INIA y *Pinus canariensis* (BLANCO *et al.*, 1989) desde el Departamento de Silvopascicultura de la U.P.M. Todos estos trabajos fueron posteriormente sintetizados en un análisis conjunto de la ecología paramétrica de las distintas especies de *Pinus* de España (GANDULLO Y SÁNCHEZ PALOMARES, 1994). En la década de los años ochenta se comienzan a asumir las incipientes sensibilidades de la sociedad española sobre conservación de la naturaleza y especial atención a las especies autóctonas de frondosas, se inician el estudio autoecológico de especies forestales autóctonas de la familia de las *Fagaceae*: robles, hayas y castaños a lo largo de toda la Península Ibérica, cuyos resultados han sido progresivamente difundidos en numerosas publicaciones, entre las que se pueden destacar, por su reciente aparición, las monografías en las que se han sintetizado los de hayas y castaños (GANDULLO *et al.*, 2004a, 2004b).

A pesar de que el origen de esta línea de investigación no es reciente, no por ello ha dejado de mostrar su interés y necesidad. Su validez se ha venido renovando al ir utilizando técnicas cada vez más modernas en la toma de datos de campo, en el análisis conjunto de dichos datos y en la generalización de sus resultados. Su necesidad se ve reflejada en el uso creciente de resultados de la investigación por los servicios forestales de las distintas regiones españolas, tanto en los proyectos técnicos de repoblación forestal y en los estudios de evaluación de impacto ambiental de las repoblaciones, como en la planificación de la gestión forestal plasmada en los Planes Forestales Regionales.

AUTOECOLOGÍA PARAMÉTRICA DE ESPECIES FORESTALES

El desarrollo de estos trabajos supone la realización de estudios ecosistémicos a través de modelos paramétricos denominados de *caja negra*, basados en la identificación de relaciones estadísticamente significativas entre variables (parámetros) que se suponen importantes y de las cuales se dispone de una cantidad razonable de datos, estudiando únicamente las *entradas y salidas* principales, sin tener en cuenta totalmente las relaciones causa efecto internas.

Los estudios autoecológicos paramétricos de especies forestales se han centrado en la consecución de los siguientes objetivos generales: (1º) Definición y clasificación paramétrica de los hábitats de la especie en su área de distribución, (2º) Elaboración de modelos de estimación de la calidad de la estación para la especie, en función de los parámetros ambientales más significativos, (3º) Identificación y cartografía de las áreas potenciales de expansión de la especie. Al margen del aspecto estrictamente paramétrico, estos objetivos se pueden complementar con otros con los que se intente analizar y tipificar diferentes elementos que integran los ecosistemas estudiados.

A continuación se repasa sucintamente la metodología llevada a cabo para la consecución de los objetivos reseñados.

FASE 1.- Estratificación del territorio

En primer lugar procede realizar una estratificación del territorio que ocupa la especie en estudio. Es decir, conseguir agrupamientos tales que cada parte presente una estructura de mayor homogeneidad interna que la que presenta el conjunto total o entre los distintos grupos. Ello permitirá un diseño objetivo del muestreo, que se realizará de forma independiente para cada estrato. La aplicación de la clasificación territorial de España (ELENA *et al.*, 1990; SÁNCHEZ PALOMARES *et al.*, 1991), obtenida a partir de datos del medio físico, puede ser un buen punto de partida para el establecimiento de los estratos. Los estratos se establecen fundamentalmente en base a las clases territoriales definidas en la

clasificación junto con la información relativa a las diferentes densidades de las masas existentes y su situación espacial en el territorio.

FASE 2.- Muestreo y toma de datos de las parcelas

Fijados los estratos y diseñado el muestreo de campo, este se efectuará estableciendo un conjunto de parcelas en cuya prospección se recogerá una serie de datos en relación con los siguientes aspectos:

- Datos fisiográficos, tales como el posicionamiento de la parcela, la altitud del centro de la misma, su pendiente media, su orientación y la pedregosidad superficial existente.
- Datos edáficos correspondientes a la descripción y muestreo de un perfil de suelo en el centro de la parcela. Para ello se procede a la apertura de una calicata, diferenciando los distintos horizontes edáficos existentes, anotando su espesor, color, grado de presencia de raíces, pedregosidad no muestreable, tránsito al horizonte subyacente, estructura, etc. Se toman muestras de tierra de cada horizonte y se envían al laboratorio para la realización de los correspondientes análisis edafológicos.
- Datos florísticos correspondientes a la realización de inventarios botánicos en cada parcela siguiendo la tradicional escala de cobertura-abundancia de BRAUN-BLANQUET (1964).
- Datos selvícolas que atienden a aquellas mediciones a realizar en las parcelas con vistas a la obtención de parámetros de esa naturaleza caracterizadores de la forma de masa, espesura, etc., así como para la búsqueda de índices de calidad de estación.

FASE 3.- Toma de datos climáticos

En relación con la necesidad de efectuar una asignación de valores climáticos a cada una de las parcelas de muestreo, conviene señalar la dificultad que acarrea el escaso número de observatorios meteorológicos situados en áreas forestales. La base de partida proviene de los datos suministrados por la red de observatorios meteo-

rológicos pertenecientes al Instituto Nacional de Meteorología u otras entidades que hayan instalado estaciones repartidas por todo el territorio afectado por el estudio correspondiente. Otra solución puede venir de modelos de estimaciones termoplumométricas para la España peninsular, desarrollados por SÁNCHEZ PALOMARES *et al.* (1999) que, en general, aporta unos datos muy ajustados. Estos modelos son del tipo de regresión múltiple en función de la altitud, de la posición geográfica (coordenadas x-utm e y-utm) y de la cuenca o subcuenca hidrográfica a que pertenece el punto considerado.

FASE 4.- Elaboración de parámetros ecológicos

La siguiente fase del desarrollo de este tipo de estudios es la elaboración de parámetros ecológicos, entendiendo como tales aquellas relaciones numéricas que tratan de cuantificar la influencia que los distintos factores ecológicos del medio ejercen sobre la vegetación y en concreto sobre la especie cuya autoecología se pretende estudiar. Esta fase es de gran importancia puesto que constituye la base del estudio (paramétrico); los parámetros elaborados serán siempre los protagonistas como materia prima de la base de datos a considerar en las fases posteriores de la elaboración de modelos.

Sin perjuicio de que a lo largo del estudio se estime conveniente la elaboración de algún parámetro específico, con carácter general se suelen elaborar los parámetros siguientes:

Parámetros fisiográficos: Son aquellos que cuantifican las condiciones fisiográficas de posición de cada parcela en su entorno geográfico. Se definen los siguientes parámetros: Altitud, pendiente, pedregosidad superficial (estos tres coincidentes con el dato tomado en la parcela), insolación (parámetro calculado en función de la pendiente y de la orientación de la parcela, GANDULLO, 1974), complejidad del entorno (evalúa la mayor o menor simplificación del relieve en las proximidades de la parcela, BLANCO *et al.*, 1989), coeficiente de resguardo de vientos (se estima que resguardan sensiblemente a la parcela los terrenos situados a menos de 500 metros de la misma y que tienen cota superior en más de 40 metros a la altura media de la parcela, BLANCO *et al.*, 1989).

Parámetros climáticos: Son aquellos que caracterizan la climatología de las parcelas estudiadas. Su elaboración parte de los datos climáticos asignados previamente. Se establecen, con carácter general, un total de 14 parámetros que podemos agrupar de la forma siguiente.

Evaluadores del régimen pluviométrico: precipitación total anual (suma en milímetros de las doce precipitaciones mensuales), de primavera (suma en milímetros de las precipitaciones de los meses de marzo, abril y mayo), de verano (análogamente para los meses de junio, julio y agosto) de otoño (análogamente para septiembre, octubre y noviembre) y de invierno (análogamente para diciembre, enero y febrero). **Evaluadores del régimen térmico:** temperatura media anual (como media aritmética de las doce temperaturas medias mensuales), oscilación térmica (como diferencia entre la media de las máximas del mes más cálido y la media de las mínimas del mes más frío, GORSZINSKY, 1920) y ETP (suma de las doce evapotranspiraciones potenciales mensuales, THORNTHWAITE, 1948). **Evaluadores del régimen hídrico:** Suma de superávits (suma de las diferencias P - ETP, en todos los meses en los que la precipitación supera la evapotranspiración potencial, THORNTHWAITE & MATHER, 1957), suma de déficits (suma de las diferencias ETP-P, en todos los meses en los que la evapotranspiración potencial supera la precipitación, THORNTHWAITE & MATHER, 1957), índice hídrico anual (THORNTHWAITE & MATHER, 1957), duración de la sequía (en meses, WALTER & LIETH, 1960) e intensidad de la sequía (cociente entre el área seca y el área húmeda en los climodiagramas de Gausson, WALTER & LIETH, 1960).

Parámetros edáficos: Son aquellos parámetros elaborados a partir de los resultados analíticos obtenidos de las muestras de suelo tomadas en las parcelas, así como de los datos procedentes de la descripción de los perfiles estudiados. Agrupados en tres bloques, se consideran los siguientes. **Evaluadores de las propiedades físicas de los suelos:** Todos ellos se elaboran calculando la media ponderada por espesor de horizonte en los 125 cm superiores del perfil, salvo el último que se obtiene por suma de los valores obtenidos en todos los horizontes. Son: tierra fina, arena, limo, arcilla, coeficiente de capacidad de cementación

(GANDULLO, 1985), coeficiente de impermeabilidad debida al limo (NICOLÁS Y GANDULLO, 1966), humedad equivalente (SÁNCHEZ PALOMARES Y BLANCO, 1985), permeabilidad y capacidad de retención de agua (GANDULLO, 1985). **Evaluadores de las propiedades químicas y de la fertilidad de los suelos:** Estos parámetros se obtienen efectuando la media de los datos de cada horizonte, dando a cada uno un peso, función de su espesor y de la profundidad a que está situado, de acuerdo con el criterio de RUSSELL & MORE (1968). Son los siguientes: materia orgánica, acidez actual (pH en agua), acidez de cambio (pH en KCl), nitrógeno, relación carbono/nitrógeno, carbonato cálcico activo, carbonato cálcico inactivo, fósforo y potasio. **Parámetros edafoclimáticos:** Surgen como consecuencia de introducir el parámetro capacidad de retención de agua en el cálculo de una ficha hídrica, determinando las variaciones de reserva de agua a lo largo de los distintos meses del año, en función de aquél y de los valores mensuales de precipitación y evapotranspiración potencial (THORNTHWAITE & MATHER, 1957; GANDULLO, 1985). Son los tres siguientes: evapotranspiración real máxima posible en el conjunto del año, sequía fisiológica en el conjunto del año y drenaje calculado del suelo (como evaluación del agua que escurre del terreno, bien superficial, bien en vertical hacia profundidades extraedafológicas).

Parámetros de la fitocenosis: índices de calidad de estación. La evaluación cuantificada de la respuesta biológica de las estaciones forestales a estudiar, supone la consideración de una serie de parámetros deducibles de las características morfológicas y selvícolas de las masas en cada parcela y de la propia composición florística. Dependiendo de la especie a estudiar, estos parámetros pueden ser diferentes. No obstante, con carácter, general se pueden considerar los siguientes: densidad de pies (como número de pies por ha, de diámetro normal igual o mayor de 5 cm), área basimétrica total (como superficie en m² / ha que supone las secciones de los troncos de todos los pies de la parcela existentes, con diámetro normal igual o superior a 5 cm), área basimétrica del monte bajo (como la parte del área basimétrica total correspondiente a los pies agrupados en cepas,

en el caso de estudiar una especie que presente estas características), fracción de cubierta (como relación entre la superficie ocupada por la proyección de las partes aéreas de la masa arbórea y el total de la parcela, altura máxima de los pies, índice de Hart (como evaluador de la espesura, función de la altura dominante de la masa y el espaciamiento medio del arbolado).

Sería extraordinariamente importante, con vistas a la consecución del segundo de los objetivos establecidos en estos estudios, contar con un parámetro evaluador de la calidad de la estación, como medida de la productividad de la misma, sin embargo, tan sólo en montes formados por masas monoespecíficas de monte alto, con tendencia a la regularidad ha sido tradicionalmente empleado el índice de calidad de estación con base selvícola (Site Index), determinado por la altura de la masa a una edad predeterminada (ASSMANN, 1957). Para especies de diferente morfología, el índice de calidad puede ser distinto y su evaluación será motivo de estudio particular en cada caso.

FASE 5.- Definición de hábitats.

Elaborados los parámetros anteriormente reseñados, estamos en condiciones de abordar el primero de los objetivos establecidos en este tipo de estudios autoecológicos paramétricos: la definición y clasificación paramétrica de los hábitats de la especie en su área de distribución. Para ello y para el conjunto de los parámetros del biotopo (fisiográficos, climáticos, y edáficos), se procede a examinar la distinta variabilidad existente, lo cual permitirá establecer los posibles límites de aptitud ecológica de dichos biótopos para servir de asiento a las masas de la especie estudiada, de acuerdo con el siguiente esquema metodológico:

Con los valores de los parámetros estableceremos los límites inferior y superior de variación (LI, LS) como el mínimo absoluto y el máximo absoluto para cada parámetro. Situamos los umbrales inferior y superior (UI, US) excluyendo el 10% de los puntos en los que el parámetro toma los valores menores y otro 10% excluyendo los valores mayores. A

partir de ellos, para cada parámetro definimos el tramo central (intervalo entre UI y US) y los tramos marginales (intervalo entre LI y UI junto con el intervalo entre US y LS) (GANDULLO *et al.*, 1974, 1991).

Para el conjunto de todos los parámetros considerados se establecen como **hábitats óptimos o centrales** aquellos donde los parámetros se encuentran dentro de los tramos centrales. Cuando algunos parámetros se sitúan en los tramos marginales se consideran como **hábitats marginales**. Si alguno de los parámetros se sitúa fuera de los límites establecidos por los valores del intervalo (LI, LS), corresponderán a **hábitats extramarginales**.

FASE 6.- Modelos predictivos de la calidad.

El segundo de los objetivos generales propuestos para este tipo de estudios autoecológicos paramétricos lo constituye la selección de los parámetros ecológicos significativamente más correlacionados con la producción de la especie estudiada, así como la obtención de índices multifactoriales como ecuaciones predictivas de dicha producción. Se trata por consiguiente de abordar un tratamiento estadístico multivariable de regresión en el que la variable dependiente es un parámetro de la biocenosis, generalmente la calidad de la masa, y las variables independientes (regresoras) los parámetros ecológicos disponibles.

FASE 7- Identificación y cartografía de las áreas potenciales de expansión de la especie.

Uno de los aspectos más importantes en la gestión de los montes es la valoración precisa de la estación forestal en términos de productividad de madera (MONSRERUD *et al.*, 1990; TYLER *et al.*, 1996; STEINBRENNER, 1979). Sin embargo, en países mediterráneos como España, la escasa rentabilidad en productos comerciales de los montes pone de especial relevancia la importancia de externalidades positivas evaluables en términos históricos, culturales, sociales y ambientales (MADRIGAL *et al.*, 1999). Este último aspecto entendido tanto por actuar contra fenó-

menos desertizadores, como por ser garantes de la conservación de la riqueza florística y faunística. En este contexto la estimación de la productividad forestal en países como España puede pasar a un segundo plano ante la necesidad de que previamente se valore la adecuación de un terreno para una especie.

En los estudios sobre autoecología paramétrica de especies forestales conseguidos los dos primeros objetivos, implícitamente también se puede conseguir automáticamente el tercero. Así, para la identificación de la aptitud de un punto del territorio se desarrolló el programa PINARES (GANDULLO Y SÁNCHEZ PALOMARES, 2000) que ha sido muy ampliamente utilizado en algunos servicios forestales territoriales. Por fortuna hoy en día disponemos de potentes herramientas que nos permiten generalizar estos resultados para el conjunto del territorio mediante la generación de modelos territoriales. El empleo de dichos modelos hace más manejables los resultados y ofrece unas herramientas de gran utilidad que permitirán al planificador o gestor forestal el manejo de la información a nivel de todo el territorio de actuación, en relación con el conocimiento de su aptitud o potencialidad para la existencia de determinadas especies forestales.

La definición del hábitat de una especie es la base para poder evaluar la aptitud de una estación en relación con la mayor o menor posibilidad de éxito a la hora de realizar una introducción o restauración de una determinada especie forestal. De manera práctica habrá que considerar aquellos territorios cuya ubicación está definida por valores de los parámetros comprendidos dentro del área central, frente a aquellas localizaciones cuyos parámetros se sitúen total o parcialmente dentro de lo que se ha denominado hábitat marginal. Es razonable pensar que la restauración de masas de la especie en los segundos será problemática presentando, por el contrario, mayores garantías de éxito los territorios que correspondan a los señalados en primer lugar. Evidentemente, las probabilidades de fracaso aumentarán en aquellos biótopos que presenten valores de los parámetros fuera de los límites definidos por los máximos y los mínimos absolutos. A efectos de una aplicación práctica de estos planteamientos intentaremos valorar la

mayor o menor aptitud de la estación estudiada para la especie considerada mediante un indicador numérico en el que se tenga en cuenta una distinta contribución de cada parámetro según la posición en que el valor del parámetro se sitúe dentro de los tramos centrales o marginales. La obtención de cada uno se hace según el siguiente planteamiento:

Dada una estación determinada, para el parámetro i , conocemos los valores que definen los hábitats: LI_i , UI_i , M_i (valor medio), US_i y LS_i . Para un valor del parámetro x_i , evaluamos un **índice de aptitud** en relación a p_i de la siguiente forma:

- p_i igual a 1 si x_i es igual a M_i .
- p_i proporcional a la distancia $(x_i - M_i)$ e inferior a 1 mientras nos encontremos en el intervalo (UI_i, US_i) ; es decir, $p_i = 1 - (|M_i - x_i| / (US_i - UI_i))$ para el intervalo (UI_i, US_i) .
- p_i disminuyendo linealmente desde el valor que toma en UI_i hasta alcanzar el valor cero en LI_i y, análogamente, entre US_i y LS_i ; es decir, $p_i = (US_i - M_i)(x_i - LI_i) / ((US_i - UI_i)(UI_i - LI_i))$ para el intervalo (LI_i, UI_i) y $p_i = (M_i - UI_i)(LS_i - x_i) / ((US_i - UI_i)(LS_i - US_i))$ para el intervalo (US_i, LS_i) .
- $p_i = 0$ para cualquier valor fuera de (LI_i, LS_i) .

El indicador final, denominado **indicador de potencialidad** (IPot) queda definido como el producto de todos los **índices de aptitud** obtenidos de manera individual para cada parámetro, de forma análoga a como se definen otros índices factoriales, tales como índices de fertilidad de suelos (TEUCHER & ADLER, 1960), índice de productividad agrícola (RIQUIER *et al.*, 1970), etc. Con objeto de hacer más manejables los resultados y obtener un valor numérico sencillo del **indicador de potencialidad** lo expresamos como sigue: $Pot = (1 / NP) \cdot \log(p_1 \cdot 10^4 \cdot p_2 \cdot 10^4 \dots p_N \cdot 10^4)$, siendo NP el número de parámetros considerados. Si alguno de los **indicadores de aptitud** fuese cero se situaría fuera del intervalo definido entre los límites inferior y superior y, por consiguiente, estaríamos en el hábitat extramarginal, no procediendo valoración de aptitud alguna. Con esta manera de obtener el **indicador de potencialidad** se consiguen detectar valores muy próximos a cero, hacerse máximos cuando haya pocas diferencias entre los valores y no verse muy afectado por cambios extremos en los valores.

INTEGRACIÓN DEL INDICADOR DE POTENCIALIDAD PARAMÉTRICA EN SIG'S

Esta tarea se puede abordar gracias al desarrollo de herramientas informáticas capaces de integrar y manejar bases de datos georreferenciadas: los Sistemas de Información Geográfica (S.I.G). La información a integrar y la resultante de un posterior manejo de los SIG constituyen, de forma genérica, los modelos digitales que, cuando se refieren a cualidades emanadas de la naturaleza fisiográfica de cada punto, se conocen como modelos digitales del terreno (MDT). Como ejemplo más generalizado de MDT tenemos el Modelo Digital de Elevaciones (MDE), que consiste en un fichero digital de datos de elevaciones (Z), de posición espacial conocida (X e Y). De los tipos de MDE que existen los más prácticos, y los más ampliamente utilizados, son los de tipo ráster. En ellos, se utiliza una matriz de puntos, de distribución regular, cada uno de los cuales (denominado pixel o celda) tiene un valor definido de la elevación del terreno. Si tomamos como referencia las características de los modelos digitales mencionados y fuéramos capaces de tener tantos modelos digitales como parámetros ecológicos hayamos considerado, estaríamos entonces en condiciones de aplicar a nivel territorial las tipificaciones realizadas a nivel de punto.

Recordemos que los valores climáticos necesarios para el cálculo de los correspondientes parámetros climáticos utilizados en la fase de definición del hábitat se han obtenido mediante el empleo de unos modelos de estimaciones climáticas (SÁNCHEZ Y PALOMARES et al., 1999). Dichos modelos ahora pueden ser aplicados a cada una de las celdas que integran la malla del MDE tipo ráster, procedente de la integración en el SIG del MDT ya que los datos intrínsecos al propio MDE son los datos necesarios para la estimación de esos valores climáticos (la posición del punto, la altitud topográfica y la cuenca o subcuenca a la que pertenece el punto). Todo ello permite obtener sendos modelos digitales para cada uno de los parámetros climáticos considerados

En cuanto al conjunto de los parámetros fisiográficos, el parámetro relativo a la altitud corresponde al valor directo del MDE. El parámetro pen-

diente es calculable de forma inmediata mediante un algoritmo propio del GIS, así como la orientación. Otros índices fisiográficos, como el índice de insolación, que dependen de la orientación y de la pendiente también son susceptibles de ser generados a partir de las mallas anteriores aplicando la formulación propuesta por GANDULLO (1974).

Así pues, podemos disponer con carácter general para cualquier territorio, a partir del MDE, de modelos digitales correspondientes a parámetros climáticos y fisiográficos. Lamentablemente, por ahora, no existe la información digital de las propiedades del suelo referidas a las que expresan los parámetros edáficos, para todo el conjunto del territorio español. En consecuencia, la aportación que, para el establecimiento de las áreas potenciales de expansión de una especie, proporcionan los parámetros edáficos no es factible con carácter general.

Las consideraciones anteriores nos llevan a la posibilidad de elaborar modelos digitales de las áreas potenciales para diferentes especies forestales desde el punto de vista fisiográfico y climático.

ELABORACIÓN DE AREAS POTENCIALES DE EXPANSIÓN DE *PINUS UNCINATA*

El pino negro (*Pinus uncinata* Miller) que debe su nombre tanto al color negruzco-ceniciento de su escamoso ritidoma, como al color verde oscuro de sus hojas, es un árbol que puede alcanzar hasta 25 m de altura cuando vive en suelos profundos y ricos. Su área de distribución natural se reparte por los Alpes occidentales y por los Pirineos, con algunas poblaciones en los Alpes centrales y el Sistema Ibérico. Esta especie que, según el IFN ocupa 75.000 ha de las más de 14 millones de hectáreas de superficie forestal arbolada española, es un elemento clave en la flora forestal española porque desempeña un importante papel en la vegetación pirenaica, formando el límite altitudinal del bosque.

El punto de partida para la obtención de los modelos territoriales que nos permitan construir el área potencial de *Pinus uncinata* es la definición paramétrica del hábitat de la especie (primer objetivo de estos estudios). Dado que sólo vamos a considerar parámetros fisiográficos y climáti-

cos, tenemos la oportunidad de utilizar un colectivo inicial de puntos de referencia mayor que el disponible en un estudio autoecológico general: las parcelas del Inventario Forestal Nacional (IFN) en las que la especie principal es *Pinus uncinata*, que son 690 para toda España. Sin embargo, hemos eliminado los puntos localizados en las provincias de Soria, Madrid y Zamora, por dos motivos. En primer lugar, por considerar que en dichas provincias se han efectuado algunas repoblaciones con esta especie fuera de su posible área de distribución natural. Y en segundo lugar porque también en dichas provincias se encuentran numerosos ejemplares híbridos con *Pinus sylvestris* que dificultan notablemente la correcta identificación de la especie muestreada en el IFN. Por ello finalmente hemos considerado 662 puntos del IFN cuya representación geográfica se muestra en la figura 1.

Para este estudio hemos considerado que los parámetros que mejor reflejan las características fisiográfico-climáticas del territorio son 14: 3 fisiográficos y 11 climáticos. Así pues, con los valores de estos 14 parámetros en los 662 puntos del IFN en los que la especie principal es *Pinus uncinata* hemos definido el hábitat central y marginal desde el punto de vista fisiográfico y climático. La Tabla 1 muestra los valores que

definen el hábitat fisiográfico y climático de los pinares negros para cada parámetro.

En función de esta definición paramétrica del hábitat se puede asignar para cada parámetro un valor del *indicador de aptitud* (p_i) en cada punto del territorio y, en consecuencia, se puede generar de cada parámetro un modelo digital. El territorio queda así calificado para el pino negro desde el punto de vista fisiográfico y climático para cada parámetro individualmente. El conjunto de los 14 parámetros y de sus respectivos indicadores de aptitud es integrado en un único *indicador de potencialidad* (I_{pot}) mediante un SIG (ArcInfo ver. 8.3) de manera que estamos en condiciones de abordar la aplicación a la totalidad de un territorio. El MDT utilizado tiene una resolución de 25 metros y pertenece al Ministerio de Agricultura de España, que nos lo ha facilitado para la realización de este estudio.

Para que la cartografía a realizar tenga una representación suficientemente clara y para que su utilización pueda tener carácter práctico para el gestor y planificador forestal, hemos creído conveniente establecer unas clases de potencialidad que, en función de los valores que alcanza el indicador correspondiente, y tras examinar la distribución mostrada por los valores del indica-



Figura 1. Distribución de los 662 puntos del IFN tenidos en consideración para el estudio en los que *Pinus uncinata* es la especie principal

	LI	UI	M	US	LS
Altitud	967	1.627	1.872,9	2.129	2.499
Pendiente	2,9	11,2	24,9	37,6	55,7
Insolación	0	0,38	0,81	1,23	1,41
Precipitación anual	571	875	1.173,6	1.405	3.024
Precipitación de primavera	142	243	309,3	377	530
Precipitación de verano	134	275	329,6	377	530
Precipitación de otoño	160	225	319,4	394	903
Precipitación de invierno	104	131	215,2	284	833
Temperatura media anual	2,7	4,2	5,6	7,0	10,7
Oscilación térmica	18,1	21,7	24,5	27,2	31,5
Evapotranspiración potencial	268	404	473,6	536	658
Superávits	218	404	716	978	2.589
Déficits	0	0	15,9	36	210
Duración de la sequía	0	0	0,01	0,03	1,3

Tabla 1. Valores que definen los hábitats fisiográfico y climático de *Pinus uncinata*

dor en el territorio estudiado, proponemos que sea la que se muestra en la tabla 2.

En este trabajo, dada la carencia de información digital sobre parámetros edáficos que ya hemos mencionado, hemos querido avanzar algo sobre este aspecto. Para ello hemos querido tener en cuenta la posible información litológica que hubiera del territorio estudiado. Esta información digital se está elaborando ahora mismo, motivo por el que tuvimos que considerar la existente en el "Mapa Geológico E: 1:1.000.000" del IGME. El territorio estudiado fue digitalizado y las unidades afectadas interpretadas desde un punto de vista litológico a fin de identificar los materiales sobre los que se sitúan las parcelas del IFN que tienen a *Pinus uncinata* como especie principal. Una vez identificadas estas procedimos a depurar todavía más dichas litofacies a fin de quedarnos tan sólo que aquellas en las que esta especie forestal pueda abundar, descartando apariciones poco representativas. De esta manera tuvimos un nuevo criterio para restringir algo más todavía el

área potencial paramétrica, ahora añadiendo una perspectiva litológica. El resultado se puede observar en el mapa de la figura 2. Las superficies a penas difieren en menos de 1000 ha con respecto de la generada sin la restricción litológica.

Con el objeto de comprobar la fiabilidad del área potencial obtenida para *Pinus uncinata*, ésta puede ser validada mediante otras fuentes externas de información. Para ello hemos contrastado la superficie que hemos definido como potencialmente adecuada para *Pinus uncinata* con la vegetación real presente en dicho territorio y también lo hemos contrastado con las series de vegetación climática, propuestas por RIVAS-MARTÍNEZ (1987) desde su tradicional metodología fitosociológica.

Contraste con la vegetación real

Para realizar este contraste, disponemos de los datos del IFN, cuya información nos ilustra sobre la presencia y localización de otras especies arbóreas importantes, además de *Pinus*

Valor del indicador IPot	Clase	Denominación
mayor que 3,80	1	Potencialidad óptima
entre 3,80 y 3,70	2	Potencialidad alta
entre 3,70 y 3,60	3	Potencialidad media
menor que 3,60	4	Potencialidad baja

Tabla 2. Criterios para establecimiento de hábitats

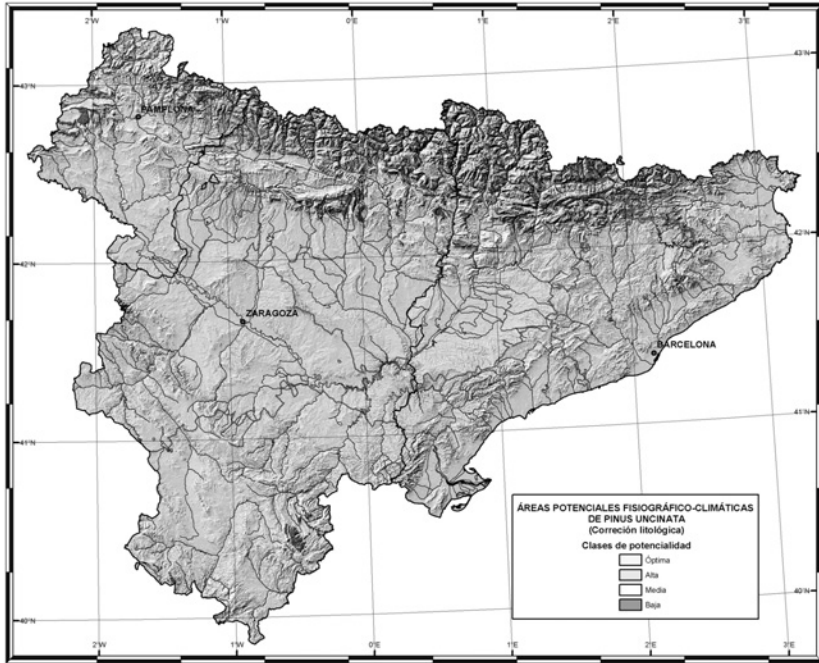


Figura 2. Mapa de las áreas potenciales fisiográfico-climáticas de *Pinus unciata* corregida con la litología

uncinata, que ocupan las áreas potenciales que para esta especie se han establecido en el Norte de España. Atendiendo al grado de ocupación, medido por el número de parcelas del IFN que, para cada especie considerada, aparecen dentro de los recintos establecidos como áreas potenciales fisiográfico-climáticas en sus diferentes clases de potencialidad, generamos la tabla 3.

En el territorio estudiado el pino negro es la especie que con mayor presencia aparece dentro de las áreas potenciales denominadas como óptimas, con un 47,4% del total de los puntos de IFN que ocupan dicho territorio, descendiendo progresivamente a las clases más bajas. Del

resto de las especies forestales consideradas destaca, a continuación, *Pinus sylvestris* con un 31,5% de ocupación en el área potencial óptima y bastante más importante en las peores clases de potencialidad. Otra conífera que también muestra una cierta presencia en cuanto al número de parcelas del IFN presentes en el área potencial óptima del pino negro es *Abies alba*, con un 10,1%. Las demás especies aparecen de manera muy poco representativa.

Contraste con la vegetación climática

Esta tarea nos permite observar cómo se distribuye la superficie del área potencial paramé-

	CLASE DE POTENCIALIDAD				Total
	óptima	buena	media	baja	
<i>Pinus unciata</i>	399	189	28	29	645
<i>Pinus sylvestris</i>	265	451	531	385	1.632
<i>Abies alba</i>	85	42	16	3	146
Otros	92	196	427	495	1.210
Total	841	878	1.002	912	3.633

Tabla 3. Número de parcelas del IFN por especies en las áreas de distribución potencial de *Pinus unciata*

trica del pino negro en las regiones corológicas mediterránea y eurosiberiana, así como en sus distintos pisos bioclimáticos (Tabla 4). Podemos comprobar que la clase de potencialidad óptima se sitúa mayoritariamente en los pisos subalpino y montano de la región eurosiberiana, pudiendo ser considerada su presencia en la región mediterránea prácticamente accidental.

El reparto superficial que las unidades sintaxonómicas presentes en el área potencial paramétrica de *Pinus uncinata*, para las diferentes clases de potencialidad se refleja en la tabla 5. De acuerdo con lo anterior, la agrupación de series de vegetación correspondiente a los pinares negros de *Rhododendro-Pineto uncinatae* y *Arctostaphylo-Pineto uncinatae* son los que en mayor modo ocupan el área potencial paramétrica, destacando que fundamentalmente lo hacen en la clase de potencialidad óptima. Le siguen en importancia otras series de pinares albares y abetares, así como hayedos, pero nunca en tan elevada presencia en la mejor de las clases de potencialidad.

La definición del término vegetación potencial supone la asunción de la teoría ecológica clásica por la que los cambios que ocurren en las comunidades de seres vivos, en las que unas especies van sucediendo a otras, se detienen cuando se alcanza una comunidad que es estable y que persistirá indefinidamente, salvo perturbaciones importantes. Establecer los límites de las diferentes comunidades vegetales potenciales y la consecuente elaboración de una cartografía de vegetación potencial siempre es una tarea ardua y bastante comprometida, sujeta a todo tipo de críticas metodológicas y conceptuales. En este sentido merece la pena destacar el valor de la clásica aproximación de la escuela fitosociológica, que se apoya en la Geobotánica sigmatista. El planteamiento de nuestro trabajo es radicalmente diferente pues establece sus fundamentos en el estudio de una serie de características ecológicas que permiten definir un ambiente paramétrico para una especie dada. La elevada coincidencia de nuestra propuesta de área potencial para los

CLASE DE POTENCIALIDAD						
Región	Piso	Óptima	Buena	Media	Baja	Total
Eurosiberiana	alpino	173	2.202	4.875	7.979	15.230
	subalpino	144.644	72.952	36.558	32.901	287.054
	montano	98.547	164.558	202.262	198.375	663.742
	colino-montano		240	347	77	664
Total eurosiberiana		243.365	239.952	244.042	239.332	966.691
Mediterránea	oromediterráneo		8	652	12.310	12.971
	supramediterráneo		179	3.040	10.752	13.972
	mesomediterráneo			43	970	1.014
Total mediterránea			188	3.736	24.070	27.994
Total		243.365	240.139	247.778	263.403	994.685

Tabla 4. Regiones y pisos bioclimáticos

CLASE DE POTENCIALIDAD					
	Óptima	Buena	Media	Baja	Total
<i>Rhododendro/Arctostaphylo-Pineto uncinatae</i>	133.423	60.182	33.869	32.305	259.779
<i>Veronico officinalis-Pineto sylvestris</i>	49.775	46.677	24.783	13.395	134.629
<i>Echinosparto horridae-Pineto sylvestris</i>	22.578	28.076	22.582	6.514	79.749
<i>Homogyno alpinae-Abieteto albae</i>	7.408	3.848	875	380	12.510
Otras	30.181	101.356	165.669	210.809	508.018

Tabla 5. Series de vegetación presentes en el área potencial de *Pinus uncinata*

pinos negros frente a las series de vegetación potencial llevadas a cabo con otros métodos (RIVAS-MARTÍNEZ, 1987) confirma la bondad del método y valida los resultados obtenidos.

En este proceso hemos tenido que tomar una serie de decisiones en las que siempre hemos sido muy restrictivos. Así, a la hora de tomar como fuente de información las parcelas del IFN hemos seleccionado sólo aquellas en las que el pino negro era la especie principal, y no todas aquellas en las que dicha especie pudiera aparecer como secundaria. También es por lo que cuando se calcula un único valor numérico para el indicador de potencialidad hemos optado por hacer dicho valor nulo en cuanto uno sólo de los indicadores de potencialidad de cada parámetro cayera fuera del los márgenes de los hábitats marginales, con independencia de que en realidad pudieran existir compensaciones entre los parámetros que solventara el valor de ese parámetro en el hábitat extra-marginal. Incluso hemos descartado aquellos territorios que tuvieran una litología que fuera poco frecuente. Esta postura conservadora intenta añadir mayor robustez a los resultados y mayor confianza a los posibles gestores interesados en conocer los límites del área potencial de la especie al haber conseguido un mayor rigor en la definición y delimitación de los límites, paramétricos y geográficos, de las áreas potenciales.

Por último, hay que insistir en que estas áreas potenciales fisiográfico-climáticas definidas son solo una aproximación puesto que no ha sido posible tener en cuenta parámetros edáficos, que habrían acotado más las áreas establecidas. Además, como limitaciones generales, hay que recordar, entre otras, la circunstancia derivada de la distinta naturaleza de los parámetros, la posibilidad de que existan mecanismos de compensación entre factores ecológicos, así como la diferente amplitud que pueden presentar los intervalos marginales, lo que implicaría una variación en la sensibilidad de los mismos, a la hora de aportar la información al conjunto, en relación con la potencialidad de la estación.

BIBLIOGRAFIA

- ASSMANN, E.; 1957. *Principles of Forest Yield Study*. Pergamon Press. Oxford.
- BLANCO, A.; CASTROVIEJO, M.; FRAILE, J.L.; GANDULLO, J.M.; MUÑOZ, L.A. Y SÁNCHEZ PALOMARES, O.; 1989. *Estudio ecológico del Pino Canario*. ICONA. Serie Técnica 6: 1-190. Madrid.
- BRAUN-BLANQUET, J.; 1964. *Pflanzensoziologie. Grundzüge der Vegetationskunde*. Springer-Verlag. Wien.
- ELENA, R.; 1996. *Clasificación biogeoclimática de España peninsular y balear*. M.A.P.A Madrid.
- ELENA, R.; SÁNCHEZ, F.; RUBIO, A.; GÓMEZ, V.; AUNÓS, A.; BLANCO, A. Y SÁNCHEZ, O.; 2000. Autoecología de los hayedos catalanes. *Invest. Agrar.: Sist. Recur. For.* 10(1): 21-42.
- GANDULLO, J.M.; 1974. Ensayo de evaluación cuantitativa de la insolación en función de la orientación y de la pendiente del terreno. *An. INIA, ser. Recursos Naturales* 1: 95-107.
- GANDULLO, J.M.; 1985. *Ecología vegetal*. Fundación Conde del Valle Salazar. ETSIM. Madrid. 208 pp.
- GANDULLO, J.M. Y SÁNCHEZ-PALOMARES, O.; 1994. *Estaciones ecológicas de los pinares españoles*. I.C.O.N.A. Madrid.
- GANDULLO, J.M. Y SÁNCHEZ-PALOMARES, O.; 2000. Programa Pinares. *Montes* 60: 5-9.
- GANDULLO, J.M.; NICOLÁS, A.; MORO, J. Y SÁNCHEZ PALOMARES, O.; 1972. *Ecología de los pinares españoles. Vol. 3 Pinus halepensis*. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- GANDULLO, J.M.; GONZÁLEZ ALONSO, S. Y SÁNCHEZ PALOMARES, O.; 1974. *Ecología de los pinares españoles IV. Pinus radiata D. Don*. Monografías INIA nº 13. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- GANDULLO, J.M.; BLANCO, A.; SÁNCHEZ, O.; RUBIO, A.; GÓMEZ, V. Y ELENA, R.; 2004a. *Las estaciones ecológicas de los hayedos españoles*. Monografías INIA: Serie Forestal nº 8. Ministerio de Educación y Ciencia. Madrid.
- GANDULLO, J.M.; RUBIO, A.; SÁNCHEZ, O.; BLANCO, A.; ELENA, R. Y GÓMEZ, V.; 2004b. *Las estaciones ecológicas de los castaños españoles*. Monografías INIA: Serie

- Forestal. nº 7. Ministerio de Educación y Ciencia. Madrid.
- GORZINSKY, P.; 1920. Sur le calcul du degré du continentalisme et son application dans la climatologie. *Geog. Ann.* 324.
- MADRIGAL, A.; FERNÁNDEZ-CABADA, J.L.; ORTUÑO S.F. Y NOTARIO, A.; 1999. *El sector forestal español*. Fundación Conde del Valle de Salazar. E.T.S.I. de Montes. U.P.M. Madrid.
- MONSERUD, R.A.; MOODY, U. & BREUER, D.W.; 1990. A soil-site study for inland Douglas-fir. *Can. J. For. Res.* 20: 686-695.
- NICOLÁS, A. Y GANDULLO, J.M.; 1966. *Los estudios ecológicos selvícolas y los trabajos de repoblación forestal*. I.F.I.E. Madrid.
- NICOLÁS, A. Y GANDULLO, J.M.; 1967. *Ecología de los pinares españoles: Pinus pinaster Ait.* IFIE. Madrid.
- NICOLÁS, A. Y GANDULLO, J.M.; 1969. *Ecología de los pinares españoles: II Pinus sylvestris L.* IFIE. Madrid.
- RQUIER, J., BRAMAO, D.L. & CORNET, S.P.; 1970. *A new system of soil appraisal in terms of actual and potential productivity (first approximation)*. Soil Resource, Development and Conservation Service, Land and Water Development División, F.A.O. Roma.
- RIVAS-MARTÍNEZ, S.; 1987. *Memoria del mapa de series de vegetación de España, 1:400.000*. Ser. Técnica, ICONA, M.A.P.A. Madrid.
- RUSSELL, J.S., & MOORE, A.W.; 1968. Comparison of different depth weightings in the numerical of anisotropic soil profile data. *Proc. 9th. Int. Congr. Soil. Sci.* 4: 205-213.
- SÁNCHEZ PALOMARES, O.; ELENA, R. Y CARRETERO CARRERO, M^ºP.; 1990. *Caracterización edáfica de los pinares autóctonos españoles de Pinus nigra Am.* Comunicaciones INIA. Ser. Rec. Nat. nº 55. Madrid.
- SÁNCHEZ PALOMARES, O., ELENA, R.; TELLA, G.; CARRETERO CARRERO & ALLUÉ, J.L.; M^ºP.; 1991. Clasificaciones Biogeoclimáticas Territoriales en España: Aplicaciones a la evaluación de los recursos forestales. *Rev. For. Franç., Hors Série 4*: 43- 51.
- SÁNCHEZ-PALOMARES, O.; SÁNCHEZ, F. Y CARRETERO, M^º P.; 1999. *Modelos y cartografía de estimaciones climáticas termopluriométricas para la España peninsular*. INIA, col. Fuera de Serie. Madrid.
- SÁNCHEZ PALOMARES, O. Y BLANCO, A.; 1985. Un modelo de estimación del equivalente de humedad de los suelos. *Montes 4*: 26-30.
- STEINBRENNER, E.D.; 1979. *Forest soil productivity relationships*. In: P.E. Heilman, H.W. Anderson and D.M. Baumgartner (eds.), *Forest soils of the Douglas-fir region*: 199-229. Washington State University. Coop. Ext. Serv. USA.
- TEUSCHER, H. & ADLER, D.; 1960. *The Soil and its Fertility*. Reinhold Publishing. New York.
- THORNTHWAITE, C.W.; 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Rev.* 38: 55-94.
- THORNTHWAITE, C.W. & MATHER, J.R.; 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balances. *Climatology 10*: 185-311.
- TYLER, A. L.; MACMILLAN., D.C. & DUTCH, J.; 1996. Models to predict the general yield class of Douglas-fir, Japanese larch and Scots pine on better quality land in Scotland. *Forestry 69*: 13-24.
- WALTER, H. & LIETH, H.; 1960. *Klimadiagramman Weltatlas*. Verlag Gustav Fische. Jena.