



6º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

6CFE01-186

Montes: Servicios y desarrollo rural
10-14 junio 2013
Vitoria-Gasteiz



Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Vitoria-Gasteiz, 10-14 junio de 2013
ISBN: 978-84-937964-9-5
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Modelo integral de regeneración de *P. pinea* L.: esquemas óptimos de gestión bajo el clima actual y futuro

MANSO, R.^{1,2}, CALAMA, R.¹, PUKKALA, T.³, MIINA, J.⁴, PARDOS, M.¹

¹Departamento de Selvicultura y Gestión de Sistemas Forestales. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Centro de Investigación Forestal (INIA-CIFOR).

²Laboratoire d'Etude de Ressources Forêt-Bois (LERFoB). Institut National de la Recherche Agronomique (INRA-Nancy).

³University of Eastern Finland (ISY), Faculty of Forest Sciences

⁴Finnish Forest Research Institute (METLA), Joensuu Research Unit

Resumen

La regeneración natural de *P. pinea* en la Meseta Norte supone un reto bajo los esquemas selvícolas actuales. Se presenta un modelo integral de regeneración para la especie con el objetivo de aportar propuestas de gestión adecuadas para conseguir un regenerado suficiente y uniforme. La regeneración debe entenderse como un proceso multietápico donde una serie de subprocesos consecutivos (fructificación, dispersión, germinación, predación y establecimiento) se identifican con umbrales de supervivencia para los futuros brinzales. En consecuencia, cada uno de los subprocesos se modeliza mediante un submodelo espacio-temporal empírico y determinista de base climática, a partir de los datos de campo recogidos entre 2005 y 2012. La salida de cada submodelo representa la probabilidad de superar la correspondiente fase. El producto secuencial de todas ellas, tras su aleatorización, constituye el modelo estocástico integral. Su uso conjunto con un optimizador permite conocer el esquema óptimo de gestión. Las simulaciones llevadas a cabo indican que las densidades actuales al inicio del periodo de regeneración resultan defectivas. En un escenario de cambio climático, además, los turnos bajos resultarían ineficientes. Finalmente, el esquema óptimo de regeneración implicaría la eliminación de los pies más pequeños en las zonas más densas mediante cortas de baja intensidad.

Palabras clave

Regeneración natural, cambio climático, modelización estocástica, optimización espacial estocástica.

1. Introducción

La regeneración natural en rodales regulares de *Pinus pinea* L. de la Meseta Norte no siempre se consigue de forma satisfactoria, a pesar de más de un siglo de gestión centrada en la producción de piñón (GORDO, 1999). Como consecuencia, la regeneración natural es en la actualidad una cuestión de gran interés para los gestores, en un momento de racionalización de los recursos destinados a la gestión forestal (GORDO et al., 2012). Este aspecto justifica la búsqueda de herramientas avanzadas de apoyo a la gestión, tal como la modelización del proceso.

La modelización de la regeneración natural en especies forestales se ha venido realizando desde dos aproximaciones diferenciadas: los modelos multietápico y los modelos

de regenerado. En la primera alternativa, la regeneración se entiende como una secuencia de fases que son modelizadas de forma independiente (ej. LEAK, 1968; FERGUSON et al., 1986; PUKKALA & KOLSTRÖM, 1992; ORDÓÑEZ et al., 2004). Por su parte, los modelos de regenerado relacionan directamente la ocurrencia y abundancia del regenerado establecido con variables ambientales, climáticas y/o selvícolas (ej. EERIKÄINEN et al., 2007; FORTIN & DEBLOIS, 2007; BARBEITO et al., 2011).

Dadas las dificultades existentes para la regeneración de los montes de *P. pinea* en la Meseta Norte bajo los actuales esquemas selvícolas y la alta probabilidad de que cualquiera de las fases del proceso de regeneración constituya un cuello de botella (CALAMA et al., 2011; MANSO et al., 2012a; MANSO et al., 2012b; MANSO et al., 2012c; MANSO et al., 2013), la adopción de un modelo multietápico resulta más ventajosa, al ser necesario detectar en qué fase o fases el sistema colapsa, qué determina ese colapso y, por tanto, proponer soluciones de tipo selvícola al respecto.

Por otra parte, cuando los submodelos correspondientes a cada subproceso incorporan variables climáticas, es posible realizar simulaciones bajo diferentes escenarios de clima, permitiendo derivar recomendaciones de silvicultura adaptativa en un contexto de cambio climático.

2. Objetivos

Los objetivos del presente trabajo son (i) desarrollar un modelo multietápico de regeneración para la especie, a partir del cual se puedan (ii) evaluar diferentes alternativas selvícolas bajo distintos escenarios climáticos y (iii) proponer un esquema de cortas de regeneración óptimo para la consecución de la regeneración natural de la especie. Nuestras hipótesis de partida son que (i) la regeneración natural no se consigue satisfactoriamente en estos pinares debido a un conocimiento incompleto de la dinámica de regeneración de las masas y, por tanto, (ii) la aplicación de tratamientos adecuados debería conducir a la consecución de ese objetivo. Asimismo, (iii) las condiciones climáticas actuales determinan los posibles cuellos de botella en el proceso, hecho que (iv) podría empeorar en un escenario de cambio climático.

3. Metodología

3.1. Área de estudio

Para el desarrollo de un modelo multietápico, es necesaria la obtención de datos independientes de cada uno de los subprocesos implicados en la regeneración. Derivado de esta necesidad, se instalaron en el área de estudio sendos experimentos independientes a los efectos de estudiar la dispersión, la germinación, la predación y la supervivencia de plántulas de la especie, disponiéndose de series de datos del intervalo 2005-2011. Para realizar estos experimentos, se escogieron tramos en regeneración de rodales localizados en áreas representativas de las condiciones medias en las que se desarrollan las masas de *P. pinea* de la Meseta Norte, en la provincia de Valladolid. Así, el área de estudio principal se situó en el Monte de Utilidad Pública (MUP) *Corbejón y Quemados*, término municipal de La Pedraja de Portillo, con seis parcelas de 0.48 ha (60 m × 80 m) donde las cortas de regeneración se habían iniciado mediante los métodos de regeneración aclareo sucesivo uniforme y corta a hecho en dos tiempos, con tres réplicas cada uno. Adicionalmente, se estableció una parcela

control, sin cortas. Asimismo, se instalaron dos parcelas auxiliares de características similares tratadas por el aclareo sucesivo uniforme en el MUP *Común y Escobares* (Nava del Rey).

Para una información detallada de los diferentes dispositivos experimentales, se remite al lector a la bibliografía correspondiente (MANSO et al., 2012a; MANSO et al., 2012b; MANSO et al., 2012c; MANSO, 2013; MANSO et al., 2013).

3.2. Componentes del modelo

El presente modelo idealiza la regeneración como un proceso multietápico. Este proceso queda definido por (i) una serie de estados consecutivos que se identifican con las diferentes fases de la regeneración (producción de fruto, dispersión, germinación, predación y supervivencia de plántulas) y (ii) unas probabilidades de transición entre un estado y otro. De esta forma, el número S_{ij} de brinzales esperados en una localización i hasta el instante j vendrá determinado en primer lugar por las semillas que con probabilidad Pd_{ijk} hayan alcanzado dicha localización de entre las N_{kl} semillas producidas en el año l por los árboles k del entorno, más las semillas remanentes del periodo $j-1$. Para cada localización i e instante j , las semillas que allí se encuentren germinarán con probabilidad Pg_{ij} , dando lugar a nuevas plántulas. Aquellas que no hayan germinado podrán ser predadas con probabilidad Pp_{ij} , no estando disponibles en lo sucesivo. Finalmente, las plántulas instaladas hasta el instante j tienen una probabilidad Ps_j de sobrevivir en dicho instante. Esta secuencia da lugar a un modelo multiplicativo que cuando $j=1$ se expresa como

$$S_{i1} = \sum_k N_{kl} \cdot Pd_{i1k} \cdot Pg_{i1} \cdot (1 - Pp_{i1}) \cdot Ps_1 \quad (1)$$

y de forma generalizada como

$$S_{ij} = [S_{ij-1} + \sum_k (N_{kl} \cdot Pd_{ijk} + N_{ij-1}) \cdot Pg_{ij} \cdot (1 - Pp_{ij})] \cdot Ps_j \quad (2)$$

De esta forma, la correcta definición del proceso de fructificación y de las distintas probabilidades de transición debe de servir para predecir el patrón espaciotemporal del regenerado establecido. A continuación se describen los modelos, de carácter empírico, que definen las distintas probabilidades de transición así como la fructificación en *P. pinea* en la Meseta castellana. La precisión temporal del modelo multietápico se ha fijado en un mes.

Producción de fruto

El modelo, desarrollado por CALAMA et al.(2011), predice el peso de piña producido anualmente condicionado a la ocurrencia de fructificación para un año dado (vecería) a nivel árbol. Se trata por tanto de un modelo que identifica dos subprocesos (ocurrencia y abundancia) dependientes de variables climáticas, ecológicas, selvícolas y propias del árbol. La producción esperada para un árbol k en el año l y localizado en un área i viene dada por el producto de la probabilidad de ocurrencia y el peso de conos estimado, de forma que

$$N_{ijk} = \frac{\exp(x_{ikl}\alpha + u)}{1 + \exp(x_{ikl}\alpha + u)} \cdot \exp \left[z_{ikl}\beta + v + \frac{\sigma_v^2}{2} + \frac{\sigma^2}{2} \right] \cdot q \quad (3)$$

donde x_{ikl} y z_{ikl} son las covariables que definen ambos subprocesos; α y β son los parámetros correspondientes; u y v son efectos aleatorios aditivos a nivel rodal; $\sigma_v^2/2$ y $\sigma^2/2$

son términos de la varianza que corrigen el sesgo de la transformación antilogarítmica; y q es la corrección dimensional (421 piñones/kg de piña) propuesta por MORALES (2009).

Dado el alto número de variables y parámetros implicados (12 y 41, respectivamente), remitimos al lector a CALAMA et al. (2011) para una relación detallada de esta información.

Dispersión

Para el cálculo de la probabilidad de que una semilla producida por el árbol k alcance el punto i se utiliza el modelo 2Dt (CLARK et al., 1999), reparametrizado por MANSO et al.(2012c) para *P. pinea*:

$$Pd_{ik} = \frac{24,84}{\pi 253,6(1+r_{ik}^2/253,6)^{24,84}} \quad (4)$$

donde r_{ik} es la distancia entre el árbol k y el punto i .

Por otra parte, la probabilidad de que una semilla sea liberada el mes j se deduce del modelo basado en la aproximación de MANSO et al.(2012c):

$$Pd_j = (8,99 + 3,81pp_j^{1/2}) \cdot \left(1 - \frac{\sum_1^j N_j}{N_l}\right) \quad (5)$$

donde pp_j es la precipitación total del mes j , N_l es el número total de semillas producidas el año 1 y $\sum_1^j N_j$ son las semillas dispersadas hasta el mes j . El comienzo de la dispersión se produce una vez que se ha superado el umbral de los 16 °C de temperatura media mensual.

Del producto de Pd_{ik} y Pd_j resulta la probabilidad de transición Pd_{ijk} incluida en las ecuaciones 1 y 2.

Germinación

Para el cálculo de la probabilidad mensual de germinación Pg_{ij} se adaptó el modelo de tasa diaria de MANSO et al.(2013). Así, Pg_{ij} es una función de suma de la tasa de germinación diaria ($hg_{im}(x)$; "riesgo" de germinación) hasta el día m :

$$Pg_{ij} = 1 - \exp(-\sum_{m=1}^t hg_{im}(x)) \quad (6)$$

En este modelo, el efecto de las covariables se especifica mediante el producto de una serie de subfunciones cuyo valor puede variar entre 0 y 1 y la inclusión de un término aditivo que representa un efecto autocorrelativo:

$$hg_{im}(x) = (0,025 + u') \cdot (1 - \exp(-8,40IPOT_i)) \cdot (1 - \exp(-0,01fr_m)) \cdot \exp\left(\frac{-(temp_m - 14,17)^2}{2 \cdot 0,75}\right) + 0,96hg_{im-1} \quad (7)$$

donde $IPOT_i$ es un índice de competencia (KUULUVAINEN & PUKKALA, 1989), fr_m es el número de días transcurridos tras la última helada, $temp_m$ es la temperatura máxima del día m y u' es un efecto aleatorio que actúa a nivel de año

Predación

En el caso de la predación se empleó el modelo propuesto por MANSO et al.(2012b), capaz de predecir dos eventos claramente diferenciados: por un lado, la probabilidad de predación del total de semillas dispersadas en un punto y, por otro, la tasa de semillas no predadas en un punto, condicional a la no ocurrencia de predación del total de semillas en ese punto. La probabilidad de cada proceso (Ppa_{ij} y Ppb_{ij} , respectivamente) tiene naturaleza binomial, de manera que la probabilidad de transición Pp_{ij} se puede expresar:

$$Pp_{ij} = Ppa_{ij} \cdot Ppb_{ij} \quad (8)$$

$$\log(Ppa_{ij}/(1 - Ppa_{ij})) = 1,98 + u'' - 0,63N_0 - 0,05sf_j + 1,88 \sum_{j=3}^j pp_j + 0,01IPOTt_i$$

$$\log(Ppb_{ij}/(1 - Ppb_{ij})) = -0,96 + v' + 0,29N_0 + 0,02sf_j - 0,64IPOTS_i$$

donde N_0 es el número total de semillas N_i producidas a nivel rodal dividido por la duración del periodo de dispersión; sf_j es la sequía fisiológica en el mes j ; $\sum_{j=3}^j pp_j$ es la suma de precipitaciones entre $j-3$ y j ; $IPOTt_i$ e $IPOTS_i$ son índices de competencia/influencia referidos a árboles y tocones respectivamente.

Supervivencia de plántulas

La probabilidad de supervivencia Ps_j se calcula mediante el modelo de MANSO et al.(2012a). Ps_j se define como una función de la tasa de mortalidad $hm_m(x)$ diaria hasta el día m :

$$Ps_j = \exp(-\sum_{m=1}^t hm_m(x)) \quad (8)$$

En este modelo, $hm_m(x)$ se especifica como la línea base de la tasa de mortalidad ($h_0(t)$), que describe la agregación de todos los efectos involucrados en la evolución de tasa de mortalidad en el tiempo (t) desde la instalación de la plántula ($m=1$). Asumiendo que el tiempo transcurrido hasta el evento (mortalidad) sigue una distribución Gompertz, se puede deducir la forma funcional de $hm_m(x)$, cuya parametrización es:

$$hm_m(x) = h_0(t) = 0,01 \cdot \exp(-0,0031t)$$

3.3. Simulación y optimización estocástica

Simulación estocástica

El modelo propuesto en la ecuación 2 fue utilizado como simulador estocástico de establecimiento de regenerado bajo diferentes alternativas selvícolas y escenarios climáticos mediante el software RODAL5.0 (PUKKALA, 2003, 2012), siguiendo la metodología desarrollada por ROCKAFELLAR & WETS(1987), en el que el resultado final es el valor medio de n simulaciones estocásticas.

Para ello, en primer lugar, se generaron 12 alternativas selvícolas: parcelas de *P. pinea* de 1 ha que resultan de la combinación de cuatro densidades al comienzo del periodo de regeneración (50, 100, 150 y 200 pies·ha⁻¹) y tres turnos (80, 100 y 120 años) con el simulador PINEA2 (CALAMA et al., 2007). Las coordenadas de los pies en cada parcela se simularon mediante un proceso de Poisson. Posteriormente se definieron dos escenarios climáticos a partir de las series climáticas de siete estaciones meteorológicas próximas a la zona de estudio (138 registros): el actual y el correspondiente al último tercio del siglo XXI, en un contexto de incremento de emisiones de CO₂, que se obtiene de aplicar a las series disponibles las modificaciones derivadas de las previsiones del escenario A2 (DE CASTRO et al., 2005).

Con esta información, además de la edad del rodal y la calidad de estación, RODAL5.0 puede estimar, para cada alternativa selvícola y escenario climático, la probabilidad de que se establezca al menos una plántula a una escala de 1 m². En cada una de las n simulaciones, RODAL5.0 realiza los siguientes pasos: (i) llama a la ecuación 2, (ii) aleatoriza sus componentes mediante la inclusión de realizaciones aleatorias de la distribución de errores de cada modelo y sus efectos aleatorios, (iii) selecciona aleatoriamente el número de años climáticos necesario de la base climática y (iv) calcula, en cada cuadrícula i de 1 m² de la parcela, el número S_i de plántulas establecidas a lo largo de un periodo de regeneración dado. Después, (v) si S_i es mayor que 1, se asigna el valor de 1 a la cuadrícula mientras que en caso contrario, se fija el valor 0. Al final de las n simulaciones, la probabilidad de encontrar una plántula en una cuadrícula i será la suma de los n valores booleanos asignados a la misma dividido por n . A partir de esta información, se puede calcular la probabilidad media μ y la desviación típica σ en cada parcela de encontrar al menos una plántula a una escala de 1 m². Dado el alto grado de estocasticidad del proceso, el número de simulaciones mínimo para obtener predicciones realistas es de $n = 500$.

En estas simulaciones se evalúa la cantidad de plántulas incorporadas durante los primeros 10 años del periodo de regeneración (asumiendo la densidad del rodal invariable) así como la evolución de las S_i plántulas instaladas en esos primeros 10 años a lo largo del periodo de regeneración completo, fijado en 20 años.

Optimización estocástica

RODAL5.0 incorpora, además, una rutina de optimización estocástica basada en el algoritmo de HOOKE & JEEVES(1961). En este caso, el objetivo es maximizar la probabilidad de instalación del regenerado y que el mismo esté distribuido de la manera más uniforme posible, al finalizar la primera mitad del periodo de regeneración. En consecuencia, la función objetivo se definió como:

$$OF = \mu + (1 - \sigma)$$

Las variables de decisión o variables a optimizar han de definir el esquema de las cortas de regeneración. En el presente problema, se consideraron como variables de decisión a optimizar la intensidad, definida por el porcentaje de pies extraídos, de dos cortas de regeneración cuya ejecución se fija en los años 0 y 5 del periodo de regeneración; así como dos parámetros b_1 y b_2 que definen el orden de corta de los pies dentro del rodal a partir del algoritmo de PUKKALA & MIINA (1998). Para llevar a cabo la optimización, se simuló una parcela de 1 ha correspondiente a un rodal de 250 pies·ha⁻¹, distribución diamétrica irregular y distribución espacial agregada.

4. Resultados

Simulación estocástica

Con respecto al efecto de la estructura en la regeneración, se observa un incremento de μ con la densidad y el turno, aunque el valor no parece mejorar a partir de los 150 pies·ha⁻¹ (Fig. 1; clima actual). Por otra parte, σ es únicamente dependiente de la densidad de la masa, reduciéndose según aumenta ésta. Los valores medios de μ para cada turno fueron 0.50 (50 pies·ha⁻¹), 0.74 (100 pies·ha⁻¹), 0.82 (150 pies·ha⁻¹) y 0.85 (200 pies·ha⁻¹).

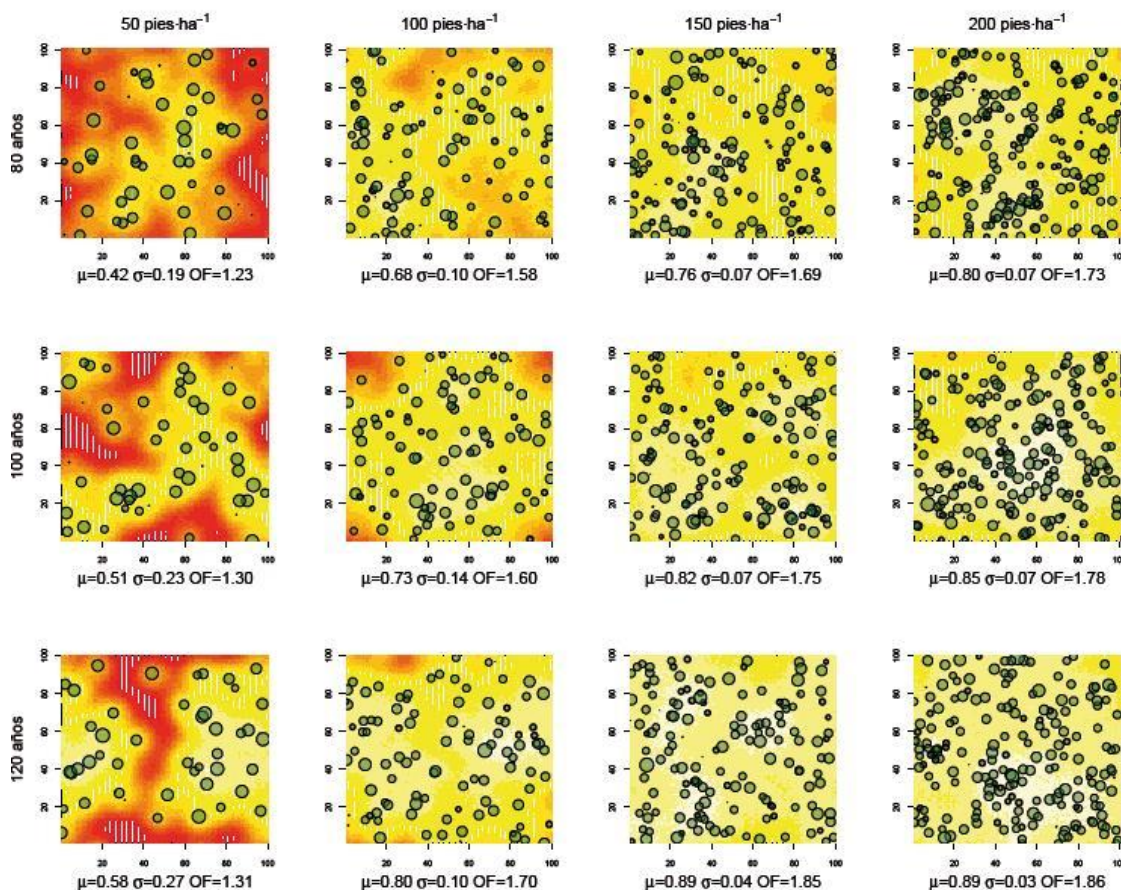


Figura 1. Mapas de probabilidad de regeneración predicha bajo el clima actual. Los colores más oscuros corresponden con probabilidades más bajas, mientras que los más claros se asocian con las más altas. Los círculos se identifican con la posición de los árboles, siendo su área proporcional al diámetro de los mismos. μ es el valor medio de probabilidad esperado para la parcela, mientras que σ es la desviación típica de la media. $OF = \mu + (1-\sigma)$

En lo relativo al efecto del clima, el modelo predice un incremento de μ bajo el escenario A2 con respecto a los valores estimados considerando el clima actual según disminuye la densidad y aumenta el turno (Fig. 2). En el extremo opuesto de esta tendencia, para turnos de 100 y 80 años, se aprecia una disminución de μ cuando la densidad es superior a los 50 pies·ha⁻¹. Los valores máximos de μ para estos turnos se alcanzan a densidades menores que para el clima actual (100 pies·ha⁻¹).

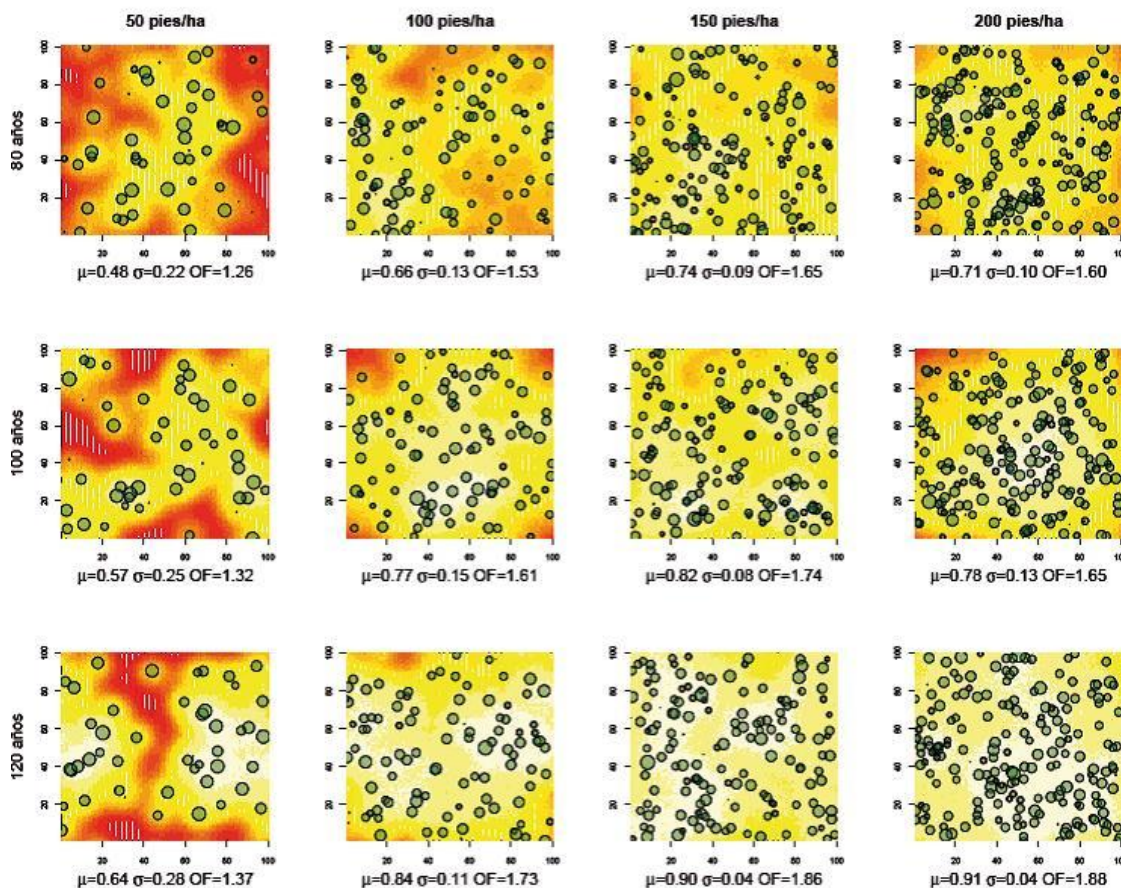


Figura 2. Mapas de probabilidad de regeneración predicha bajo el clima futuro (escenario A2) Los colores más oscuros corresponden con probabilidades más bajas, mientras que los más claros se asocian con las más altas. Los círculos se identifican con la posición de los árboles, siendo su área proporcional al diámetro de los mismos. μ es el valor medio de probabilidad esperada para la parcela, mientras que σ es la desviación típica de la media. $OF = \mu + (1-\sigma)$

Optimización estocástica

El algoritmo de optimización convergió para un valor de la función objetivo $OF=1.6298$ ($\mu = 0.7998$, $\sigma = 0.1700$). Este valor se corresponde con una gestión basada en realizar una primera corta del 20% de los pies al comienzo del periodo, y una segunda corta del 12.5% de los pies en el año 5. Los parámetros que definen el orden de corta adoptaron los valores $b_1 = 1$ y $b_2 = 0.75$, respectivamente. Estos resultados indican que el esquema óptimo de cortas de regeneración implica el mantenimiento de una densidad en torno a 150pies·ha⁻¹ al menos hasta la mitad del periodo de regeneración (10 años), centrando las intervenciones en aquellos pies de menor tamaño localizados en bosquetes densos ($b_1 b_2$ positivos), tal y como se muestra en la Fig. 3.

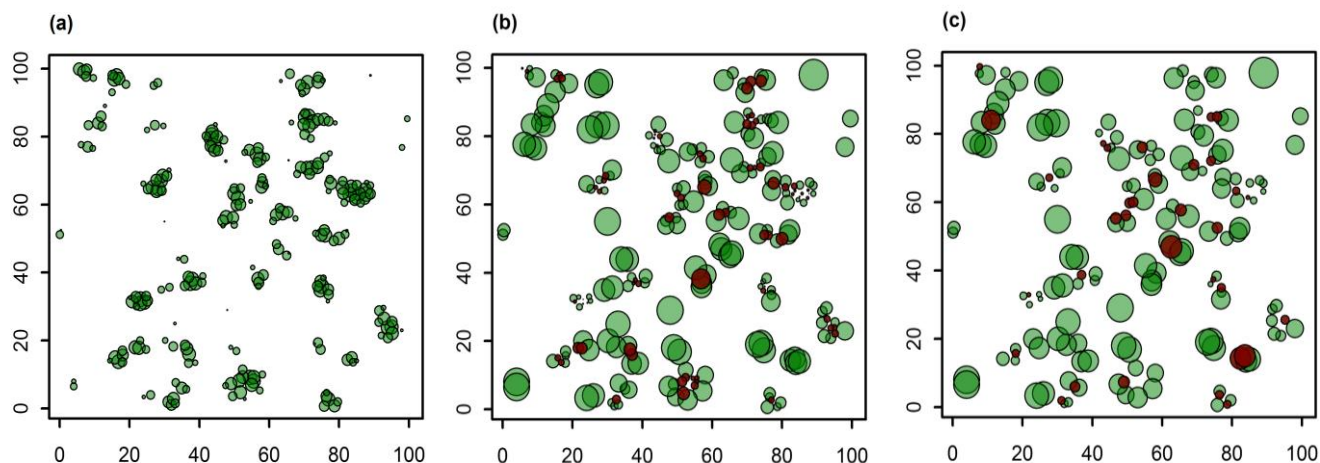


Figura 3. Orden de corta óptimo. En (a), los círculos representan el orden de corta (círculos grandes, árboles a cortar primero); en (b) y (c), el tamaño de los círculos es proporcional al diámetro a 1,30 m y el color oscuro indica los pies apeados en la primera y segunda corta, respectivamente

5. Discusión

El modelo estocástico presentado en este trabajo supone un ejemplo de aplicación novedoso en la modelización de la regeneración natural, ya que el alto grado de detalle en cuanto a las variables explicativas de cada uno de los modelos permite realizar simulaciones en un amplio abanico de condiciones selvícolas y climáticas. Esta característica lo enmarca en el contexto de las muy deseables estrategias de planificación forestal flexible adaptativa (VON GADOW, 2000). Asimismo, su implementación en una rutina de optimización refuerza su papel como potente herramienta de apoyo al gestor.

De acuerdo con MONTERO et al.(2008), los masas de piñonero de la zona suelen alcanzar la edad del turno (80 a 100 años) con densidades de entre 80 y 125 pies·ha⁻¹, con aplicación, en un periodo de 10 años, de dos cortas muy intensas (50% de los pies), siguiendo un esquema de aclareo sucesivo uniforme. Tanto las simulaciones como la optimización llevada a cabo mediante el modelo estocástico presentado sugieren que los esquemas de cortas de regeneración actuales para *P. pinea* en la Meseta Norte se alejan notablemente de las prácticas que optimizarían la consecución de un regenerado abundante y uniforme. La densidad de las masas al comienzo del periodo de regeneración no debería ser inferior de los 150 pies·ha⁻¹, debiendo mantenerse esa espesura el tiempo necesario para que se incorporen las cohortes suficientes. Esto es debido a las muy bajas probabilidades de transición entre las diferentes fases de la regeneración en relación a efectos climáticos desfavorables(MANSO et al., 2012a; MANSO et al., 2012b; MANSO et al., 2012c; MANSO, 2013; MANSO et al., 2013). Bajo estos supuestos, los valores de regeneración mejoran notablemente con respecto a los datos de los inventarios disponibles (GORDO et al., 2012).

Esta circunstancia no pasó desapercibida a los primeros gestores, siendo recomendado el mantenimiento de densidades relativamente altas ya en el siglo XIX(ROMERO, 1886). Sin embargo, aquellas prácticas sólo lograron el objetivo de conseguir la instalación de un número suficiente de plántulas, pero el exceso de sombra impedía el desarrollo viable de los brinzales. Como alternativa, a partir de 1960 se planteó la corta a hecho por fajas y regeneración artificial (GORDO, 1999). Actualmente, cuando la regeneración natural es un valor en sí misma, se ha buscado un equilibrio entre ambas situaciones, no siempre con éxito, como ya se ha mencionado. La solución a esta aparente paradoja parece estar en la toma de conciencia del

temperamento de media sombra de la especie (AWADA et al., 2003), que indica que las plántulas podrían soportar un determinado número de años la presencia del arbolado adulto, necesario para que se produzca la instalación de nuevas cohortes. La clave estaría en la extracción más progresiva y, sobre todo, flexible de estos pies, según el regenerado se vaya instalando, como ya apuntaba CALAMA et al.(2012). La incorporación al modelo multietápico de un submodelo de crecimiento del regenerado en función de la sombra de los pies adultos determinará la secuencia de cortas óptima. Desde un punto de vista ecológico, la dinámica de regeneración de la especie que sugieren estos resultados podría indicar que estos montes tenderían a estructuras irregulares, una forma de masa que ya se ha ensayado con éxito en la Meseta Norte (FINAT et al., 2000). Asimismo, nuestro modelo demuestra que los turnos se deberían alargar hasta los 120 años, en consonancia con el máximo de producción de semilla de la especie encontrado por CALAMA et al.(2011).

Las simulaciones realizadas para el escenario climático A2 muestran una sorprendente capacidad adaptativa de *P. pinea* a esas circunstancias. Muy probablemente, el impacto del clima futuro, más seco, sobre los procesos de predación de piñón en relación a las otras fases de la regeneración esté detrás de esta circunstancia. Efectivamente, la sequía es un factor muy desfavorable para la proliferación del ratón de campo(DÍAZ et al., 2010; MANSO et al., 2012b). Aunque estas conclusiones deben observarse desde la prudencia, puesto que se trata de extrapolaciones de nuestros modelos, en principio *P. pinea* podría suponer una alternativa en montes cuyas especies arbóreas se encuentren amenazadas por los efectos del cambio climático, siempre que el sustrato sea adecuado. En cualquier caso, las mismas recomendaciones que para el clima presente son válidas para un escenario futuro, coincidiendo, además, con las indicaciones generales para una silvicultura adaptativa en montes mediterráneos en un contexto de cambio global(LINDNER et al., 2008).

6. Conclusiones

La aplicación de un modelo estocástico multietápico ha permitido determinar que los condicionantes a la regeneración natural que surgen en las masas regulares gestionadas de *P. pinea* en la Meseta Norte derivados de las circunstancias climáticas y ambientales implican la necesidad de plantear esquemas de cortas de regeneración más flexibles y progresivos para la consecución de sus objetivos. Asimismo, la resiliencia predicha para *P. pinea* en un escenario de cambio climático hace que la especie se revele como un alternativa en montes seriamente amenazados por las condiciones futuras

7. Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a todo el personal que ha participado en la toma de datos en campo su esfuerzo a lo largo de estos últimos años, y muy especialmente a Enrique Garriga, Guillermo Madrigal, Santiago de Blas, Mar Conde y muchos estudiantes en prácticas de módulos de capacitación forestal. Además, es imperativo mencionar a las personas que de una u otra forma han participado en la construcción de los modelos presentados, con particular atención a Mathieu Fortin, Christopher R. Keyes y Josep Maria Espelta.

8. Bibliografía

- AWADA, T.; RADOGLU, K.; FOTELLI, M. N. & CONSTANTINIDOU, H. I. A.; 2003. Ecophysiology of seedlings of three Mediterranean pine species in contrasting light regimes. *Tree Physiol.* 23, 33-41
- BARBEITO, I.; LEMAY, V.; CALAMA, R. & CANELLAS, I.; 2011. Regeneration of Mediterranean *Pinus sylvestris* under two alternative shelterwood systems within a multiscale framework. *Can. J. For. Res.* 41, 341-351
- CALAMA, R.; SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, M. & MONTERO, G.; 2007. Integrated management models for Mediterranean multifunctional forests: the case of stone pine (*Pinus pinea* L.). *EFI Proceedings*
- CALAMA, R.; MUTKE, S.; TOMÉ, J.; GORDO, J.; MONTERO, G. & TOMÉ, M.; 2011. Modelling spatial and temporal variability in a zero-inflated variable: The case of stone pine (*Pinus pinea* L.) cone production. *Ecol. Model.* 222, 606-618
- CALAMA, R.; MADRIGAL, G.; MANSO, R.; GARRIGA, E.; GORDO, F. J. Y PARDOS, M.; 2012. Germinación, emergencia y supervivencia de regenerado en *Pinus pinea* L., En: GORDO, J., CALAMA, R., PARDOS, M., BRAVO, F. Y MONTERO, G. (eds.): La regeneración natural de los pinares en los arenales de la Meseta Castellana. Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (Universidad de Valladolid-INIA), Valladolid.
- CLARK, J. S.; BECKAGE, B.; CAMILL, P.; CLEVELAND, B.; HILLERISLAMBERS, J.; LICHTER, J.; MCLACHLAN, J.; MOHAN, J. & WYCKOFF, P.; 1999. Interpreting recruitment limitation in forests. *Am. J. Bot.* 86, 1-16
- DE CASTRO, M.; MARTÍN-VIDE, J. & ALONSO, S.; 2005. The climate of Spain: past, present and scenarios for the 21st century. Madrid.
- DÍAZ, M.; TORRE, I. & ARRIZABALAGA, A.; 2010. Relative roles of density and rainfall on the short-term regulation of Mediterranean wood mouse *Apodemus sylvaticus* populations. *Acta Theriol.* 55, 251-260
- EERIKÄINEN, K.; MIINA, J. & VALKONEN, S.; 2007. Models for the regeneration establishment and the development of established seedlings in uneven-aged, Norway spruce dominated forest stands of southern Finland. *For. Ecol. Manage.* 242, 444-461
- FERGUSON, D. E.; STAGE, A. R. & BOYD, R. J.; 1986. Predicting regeneration in the grand fir-cedar-hemlock ecosystem of the Northern Rocky Mountains. *For. Sci.* Monograph 26
- FINAT, L.; CAMPANA, V. Y SESEÑA, A.; 2000. La ordenación por entresaca en las masas de piñonero de la provincia de Valladolid, En: Junta de Castilla y León (ed.): I Simposio del pino piñonero (*Pinus pinea* L.). pp. 147-157, Valladolid.
- FORTIN, M. & DEBLOIS, J.; 2007. Modeling tree recruitment with zero-inflated models: The example of hardwood stands in southern Quebec, Canada. *For. Sci.* 53, 529-539
- GORDO, F.; 1999. Ordenación y silvicultura de *Pinus pinea* L. en la provincia de Valladolid, En: Fundación Conde del Valle de Salazar (ed.): Ciencias y técnicas forestales. 150 años de aportaciones de los ingenieros de montes p. 638, Madrid.
- GORDO, F. J.; ROJO, L. I.; CALAMA, R.; MUTKE, S.; MARTÍN, R. Y GARCÍA, M.; 2012. Silvicultura de regeneración natural de *Pinus pinea* L. en montes públicos de la provincia de Valladolid, En: GORDO, J., CALAMA, R., PARDOS, M., BRAVO, F. Y MONTERO, G. (eds.): La regeneración natural de los pinares en los arenales de la Meseta Castellana. p. 254. Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (Universidad de Valladolid-INIA), Valladolid.

- HOOKE, R. & JEEVES, T. A.; 1961. "Direct search" solution of numerical and statistical problems. *J. Assoc. Comput. Mach.* 8, 212-229
- KUULUVAINEN, T. & PUKKALA, T.; 1989. Effect of Scots pine seed trees on the density of ground vegetation and tree seedlings. *Silva Fenn.* 23, 159-167
- LEAK, W. D.; 1968. Birch regeneration: a stochastic model. *U. S. Forest Service Research* NE-85
- LINDNER, M.; GARCÍA-GONZALO, J.; KOLSTRÖM, M.; GREEN, T.; REGUERA, R.; MAROSCHEK, M.; SEIDL, R.; LEXER, M. J.; NETHERER, S.; SCHOPF, A.; KREMER, A.; DELZON, S.; BARBATI, A.; MARCHETTI, M. & CORONA, P.; 2008. Impacts of climate change on European forests and options for adaptation. EFI-BOKU-INRA-IAFS. 173 pp. Joensuu
- MANSO, R.; CALAMA, R.; MADRIGAL, G.; CONDE, M.; GORDO, F. J. Y PARDOS, M.; 2012a. Supervivencia del regenerado en *Pinus pinea* L. en la Meseta Norte. Previsiones en un contexto de cambio climático, in: RUIZ-PEINADO, R., REQUE, J. Y SERRADA, R. (Eds.), V Reunión del Grupo de Trabajo de Selvicultura de la Sociedad Española de las Ciencias Forestales (SECF) "Regeneración natural y cambio global". Sociedad Española de Ciencias Forestales, Madrid. **in press**.
- MANSO, R.; CALAMA, R.; MADRIGAL, G.; GARRIGA, E.; DE BLAS, S.; GORDO, F. J. Y PARDOS, M.; 2012b. Dispersión primaria, dispersión secundaria y predación post-dispersión en *Pinus pinea* L., En: GORDO, J., CALAMA, R., PARDOS, M., BRAVO, F. Y MONTERO, G. (eds.): La regeneración natural de los pinares en los arenales de la Meseta Castellana. p. 254. Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (Universidad de Valladolid-INIA), Valladolid.
- MANSO, R.; PARDOS, M.; KEYES, C. R. & CALAMA, R.; 2012c. Modelling the spatio-temporal pattern of primary dispersal in stone pine (*Pinus pinea* L.) stands in the Northern Plateau (Spain). *Ecol. Model.* 226, 11-21
- MANSO, R.; 2013. An integral model for natural regeneration of *Pinus pinea* L. in the Northern Plateau of Spain - Modelo integral de regeneración natural para *Pinus pinea* L. en la Meseta Norte (España). Universidad Politécnica de Madrid PhD, 200.
- MANSO, R.; FORTIN, M.; CALAMA, R. & PARDOS, M.; 2013. Modelling seed germination in forest tree species through survival analysis. The *Pinus pinea* L. case study. *For. Ecol. Manage.* 289, 515-524
- MONTERO, G.; CALAMA, R. Y RUIZ PEINADO, R.; 2008. Selvicultura de *Pinus pinea* L., En: MONTERO, G., SERRADA, R. Y REQUE, J. (eds.): Compendio de Selvicultura de Especies. pp. 431-470. INIA - Fundación Conde del Valle de Salazar, Madrid.
- MORALES, L.; 2009. Modelos para la predicción del contenido y calidad de piñón en piñas de *Pinus pinea* L. en los valles del Tiétar y del Alberche. Universidad Politécnica de Madrid.
- ORDÓÑEZ, J. L.; FRANCO, S. & RETANA, J.; 2004. Limitation of the recruitment of *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* in a gradient of post-fire environmental conditions. *Ecoscience* 11, 296-304
- PUKKALA, T. & KOLSTRÖM, T.; 1992. A stochastic spatial regeneration model for *Pinus sylvestris*. *Scand. J. For. Res.* 7, 377-385
- PUKKALA, T. & MIINA, J.; 1998. Tree-selection algorithms for optimizing thinning using a distance-dependent growth model. *Can. J. For. Res.* 28, 693-702
- PUKKALA, T.; 2003–2012. RODAL 5.0: Simulation-optimisation system for the management of any-aged stands in Spain.
- ROCKAFELLAR, R. T. & WETS, R. J. B.; 1987. Scenario and policy aggregation in optimization under uncertainty. *IIASA Working Paper WP-87-119, Laxenburg, Austria*

ROMERO, F.; 1886. El pino piñonero en la provincia de Valladolid. Imprenta y Librería Nacional y Extranjera de los Hijos de Rodríguez, Libreros de la Univesidad y del Instituto. Valladolid

VON GADOW, K.; 2000. Evaluating risk in forest planning models. *Silva Fenn.* 34