

Modelo integral para la regeneración de *Pinus pinea* L. en los arenales castellanos

Manso, R.,^{1*} Pardos, M.,¹ Madrigal, G.,¹ Gordo, F.J.,² Montero, G.,¹ Calama, R.¹

¹ *Departamento de Selvicultura y Gestión de Sistemas Forestales. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Centro de Investigación Forestal (INIA-CIFOR). Carretera de La Coruña km 7,5 28040 Madrid (España).*

e-mail: rmgforestal@hotmail.com

² *Servicio Territorial de Medio Ambiente, Junta de Castilla y León. C/Duque de la Victoria 5, 47001 Valladolid*

Resumen

La consecución de la regeneración natural de los bosques constituye uno de los elementos clave de la gestión forestal sostenible. Los pinares de *Pinus pinea* localizados en la Meseta Norte han sido gestionados de forma racional desde finales del siglo XIX, pero la regeneración natural de los mismos no se ha conseguido de forma satisfactoria en todos los casos. En este sentido, la aplicación de cortas por aclareo sucesivo uniforme en masas de baja densidad situadas en estaciones arenosas no ha alcanzado –en la mayoría de las ocasiones– el objetivo de regeneración de las mismas.

Ante esta situación, el CIFOR-INIA, junto al Servicio Territorial de Medio Ambiente de Valladolid, inició en 2003 una línea de investigación en regeneración natural de la especie. En el trabajo se presenta una síntesis de los resultados obtenidos, centrados en el desarrollo de un modelo integral para la regeneración natural de la especie. Este modelo incorpora distintos submodelos:

- Submodelo de producción de fruto.
- Submodelo de dispersión primaria.
- Submodelo de predación post-dispersión.
- Submodelo de germinación.
- Submodelo de supervivencia.

Todos los submodelos desarrollados incluyen como explicativas variables propias de la masa, de la estación, de gestión y climáticas. El modelo integral permite simular la respuesta en términos de regeneración a distintos supuestos de gestión bajo diferentes escenarios climáticos. Asimismo, el modelo permite la identificación de cuellos de botella a lo largo del proceso. Por último, el modelo desarrollado es compatible con el modelo integral de crecimiento y producción para la especie (PINEA2), lo que permite el uso conjunto de ambos modelos al objeto de optimizar la gestión forestal a lo largo del ciclo completo.

Palabras clave: regeneración natural, modelización estocástica, modelo multifase, pino piñonero.

1. Introducción

La modelización de la regeneración natural en especies forestales se ha venido realizando desde dos aproximaciones diferenciadas: los modelos multietápicos o multifase 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 and Kölstrom, 1992; Ordóñez *et al.*, 2006). Por su parte, los modelos de regenerado relacionan directamente la ocurrencia y abundancia del regenerado establecido con variables ambientales, climáticas y/o selvícolas (ej.: Eerikainen *et al.*, 2007; Fortin and DeBlois, 2007; Barbeito *et al.*, 2011).

Dadas las serias dificultades existentes para la regeneración de los montes de *P. pinea* en la Meseta Norte bajo los actuales esquemas selvícolas, la adopción de un modelo multifase resulta más ventajosa, al permitir detectar concretamente dónde se encuentran los cuellos de botella, qué los determina y, por tanto, proponer soluciones de tipo selvícola al respecto.

En este sentido, los objetivos del presente trabajo son:

- Desarrollar un modelo multietápico de regeneración para la especie.
- Ilustrar, mediante un ejemplo de aplicación, las posibilidades del mismo, así como avanzar algunos resultados de interés para el gestor.

2. Estructura y componentes del modelo

El presente modelo idealiza la regeneración como un proceso multifase. Este proceso queda definido por:

- Una serie de estados consecutivos que se identifican con las diferentes fases de la regeneración (producción de fruto, dispersión, germinación, predación y supervivencia de brinzales).
- Unas probabilidades de transición entre un estado y otro. De esta forma, el número S de brinzales esperados en una localización i hasta el instante j vendrá determinado en primer lugar por las semillas que con probabilidad Pd 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 , dando lugar a nuevos brinzales. Aquellas que no hayan germinado podrán ser predadas con probabilidad Pp , no estando disponibles en lo sucesivo. Finalmente, los brinzales instalados hasta el instante j tienen una probabilidad Ps de sobrevivir en dicho instante. Esta secuencia da lugar a un modelo multiplicativo que cuando $j=1$ se expresa como

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

(1)

y de forma generalizada como

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

De esta forma, la correcta definición del proceso de fructificación y de las distintas probabilidades de transición debe de servir para predecir el patrón espacio-temporal 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 multifase se ha fijado en un mes.

2.1 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.

2.2 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.*, (2012b) 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.*, (2012b):

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

donde pp_j es la precipitación total del mes j , N_l es el número total de semillas produ-

cidas el año l 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.

2.3 Germinación

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

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

En este modelo, el efecto de las covariables se especifica vía $hg_{im}(x)$ mediante el producto de una serie de subfunciones cuyo valor puede variar entre 0 y 1. La definición de la tasa de germinación se completa con la inclusión de un término aditivo que representa un efecto autocorrelativo. La expresión resultante es

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

donde $IPOT_i$ es un índice de competencia (Kuuluvainen and 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. Este modelo, de base diaria, fue adaptado para su uso en el modelo multifase general, de base mensual.

2.3 Predación

En el caso de la probabilidad se empleó el modelo propuesto por Manso *et al.*, (2012a). La base del proceso hace que el modelo deba ser capaz de predecir dos eventos claramente diferenciados: por un lado, la predación absoluta o no de la semilla dispersada y, por otro, la supervivencia de las semillas cuando no se espera la destrucción total de las mismas. 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:

$$Pp_{ij} = Ppa_{ij} \cdot Ppb_{ij} = \frac{\exp(x'\alpha' + u')}{1 + \exp(x'\alpha' + u')} \cdot \left(1 - \frac{\exp(z'\beta' + v')}{1 + \exp(z'\beta' + v')}\right) \quad (7)$$

donde x' y z' son las variables que definen cada proceso; α' y β' son los parámetros asociados; y u'' y v'' son efectos aleatorios que recogen variabilidad no observada a nivel año l x localización i . El efecto de las covariables se muestra en la expresión evaluada de ambos procesos:

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

$$\log\left(\frac{Ppb_{ij}}{1 - Ppb_{ij}}\right) = -0,96 + v'' + 0,29N_0 + 0,02sf_j - 0,64IPOT_{s_i}$$

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 ; $IPOT_t$ e $IPOT_{s_i}$ son índices de competencia/influencia referidos a árboles y tocones respectivamente.

2.4 Supervivencia de brinzales

La probabilidad de supervivencia Ps_j se calcula mediante el modelo de Manso *et al.*, (2013, a). Ps_j se define como una función de la tasa de mortalidad $hm_m(x)$ diaria hasta el día m :

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

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 del brinzal ($m=1$). 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. Ejemplo de aplicación

El modelo especificado en la ecuación 2 se puede utilizar para realizar simulaciones deterministas para unas condiciones climáticas, ambientales y selvícolas determinadas. De esta forma, su uso como módulo complementario del simulador de producción y crecimiento PINEA2 constituiría una herramienta integral para la gestión de las masas de piñonero de la Meseta Norte.

Otra aplicación –la que se muestra en el presente trabajo– es la de su empleo como simulador estocástico. Esta alternativa fue implementada en el simulador-optimizador RODAL5.0 (Pukkala, 2003-2012) y sus detalles se pueden consultar en Manso *et al.* (2014). Este simulador precisa, como datos de entrada ligados al rodal, la disposición espacial, edad y diámetro de los pies de la masa, así como la calidad de estación de la misma. Por otra parte, se necesita una base de datos climática con datos diarios de precipitación y temperatura media y máxima. En cada simulación, RODAL5.0 llama a la ecuación 2, aleatoriza sus componentes mediante la distribución de errores de cada modelo, selecciona aleatoriamente el número de años climáticos necesario de la base climática y calcula, en cada cuadrícula i de 1 m² del rodal, el número S_i de brinzales establecidos a lo largo de 20 años. Si S_i es mayor que 1, se asigna el valor de 1 a la cuadrícula. En caso contrario, se fija el valor 0. Al final de las n simulaciones, la probabilidad de encontrar un brinzal en una cuadrícula i será la suma de los n valores booleanos asignados a la misma dividido por n . Dado el alto grado de estocasticidad del proceso, el número de simulaciones mínimo para obtener predicciones realistas es de 500. El simulador permite realizar una intervención en el año cero y otra en el año 5, procediéndose, por defecto, a una corta a hecho en el año 10. En el ejemplo de aplicación que proponemos, se muestran los resultados de las simulaciones de la probabilidad de instalación para una combinación de 4 densidades iniciales (50, 100, 150 y 200 pies/ha) y 3 edades de la masa (80, 100 y 120 años), sin aplicar otra corta que la que el programa realiza por defecto (*Figura 1*). Como se puede comprobar en este esquema simplificado, densidades de hasta 150 pies/ha combinados con turnos de hasta 120 años maximizan la probabilidad de instalación, generando un regenerado en principio suficiente y bien distribuido. Este hecho sugiere que unos tratamientos de regeneración más flexibles y progresivos que los actuales podrían ser la solución al problema de la regeneración natural en la especie en la Meseta Norte.

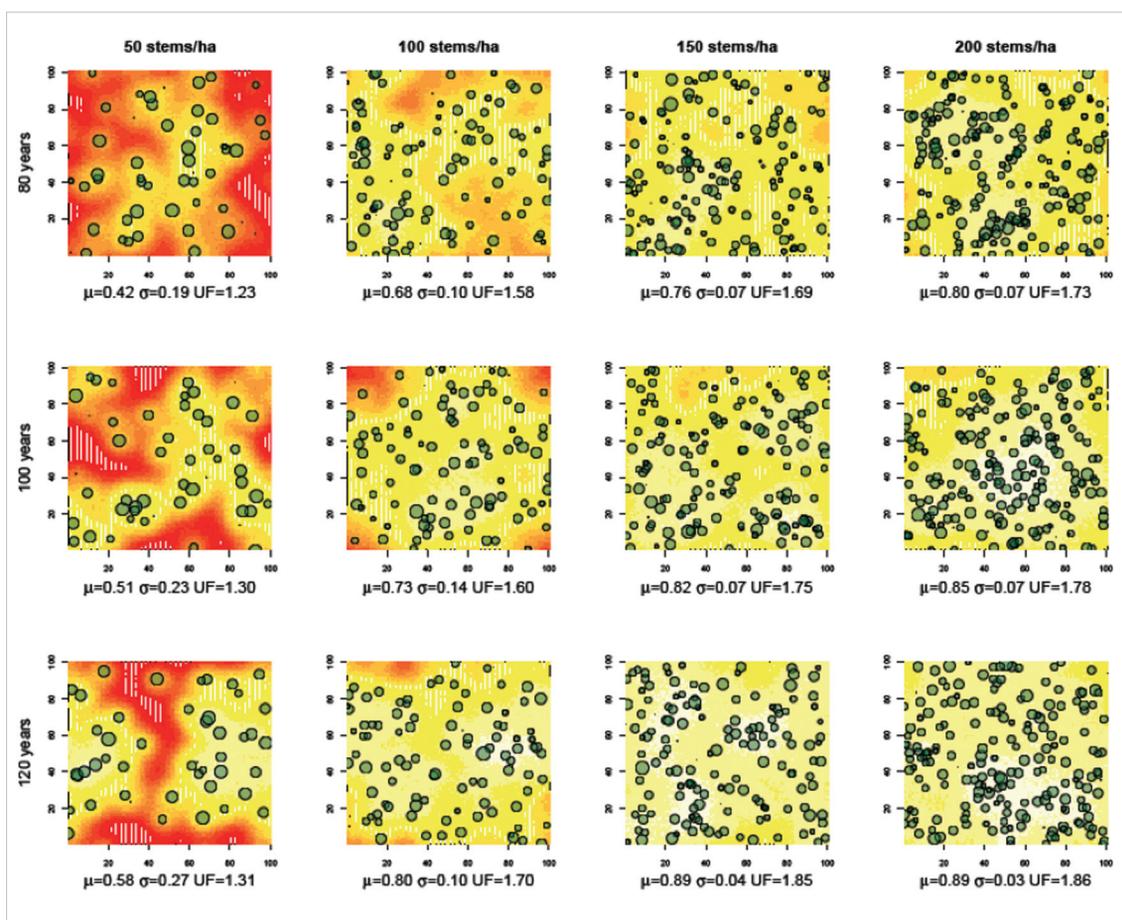


Figura 1. Mapas de probabilidad predicha mediante simulación estocástica con el modelo multifase. Los colores más oscuros corresponden con probabilidades más bajas, mientras que los más claros se asocian con las más altas. Los círculos se identifican con la posición de los árboles, siendo su área proporcional 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. UF aúna ambos índices ($\text{UF} = \mu + (1 - \sigma)$).

4. Conclusión

El modelo que se propone en el presente trabajo tiene una gran potencialidad como herramienta de apoyo a la gestión de las masas de *P. pinea* en la Meseta Norte, al permitir realizar simulaciones de instalación del regenerado con diferentes alternativas selvícolas e incluso bajo diferentes escenarios climáticos, particularmente si se complementa con el simulador PINEA2. Su implementación como modelo estocástico, además de servir para generar predicciones medias más realistas, facilita su incorporación en rutinas de optimización, como de hecho ya se ha llevado a cabo dentro de RODAL 5.0. Los futuros datos de respuesta del regenerado a las condiciones de sombra completarán el modelo, de forma que se puedan concretar, simular y optimizar las intervenciones en los últimos años del periodo de regeneración.

5. Agradecimientos

El presente trabajo se ha desarrollado en el marco financiero y funcional de los proyectos CPE03-005-C2.1, RTA2007-00044 y AGL2010-15521. Los autores agradecen al Servicio Territorial de Medio Ambiente de Valladolid y a los Exmos. Ayuntamientos de Portillo y Nava del Rey la ayuda prestada para la instalación y mantenimiento de los dispositivos experimentales.

6. Bibliografía

- Barbeito, I., LeMay, V., Calama, R., Cañellas, 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., 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.
- Clark, J.S., Silman, M., Kern, R., Macklin, E., HilleRisLambers, J., 1999b. Seed dispersal near and far: Patterns across temperate and tropical forests. *Ecology*, 80:1475-1494.
- Eerikainen, 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. Eco. Manage.* 244: 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. *Forest Sci.* Monograph 26.
- Fortin, M., DeBlois, J., 2007. Modelling tree recruitment with zero-inflated models: the example of hardwood stands in Southern Québec. *Forest Sci.* 53: 529–539.
- 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 Note NE-85.
- Manso, R., Calama, R., Madrigal, G., Garriga, E., De Blas, S., Gordo, F.J., Pardos, M., 2012a. Dispersión primaria, dispersión secundaria y predación post-dispersión en *Pinus pinea* L. En: Gordo, J., Calama, R., Pardos, M., Bravo, F., Montero, G. (eds.), *La regeneración natural en los pinares de los arenales de la Meseta Castellana*, Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (Universidad de Valladolid-INIA). Valladolid. 254 pp.
- Manso, R., Calama, R., Madrigal, G., Conde, M., Gordo, F.J., Pardos, M., (2013a). Supervivencia del regenerado en *Pinus pinea* L. en la Meseta Norte. Previsiones en un contexto de cambio climático. En Ruiz-Peinado, R., Reque, J. and 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. Este número.
- Manso, R., Fortin, M., Calama, R., Pardos, M., 2013b. Modelling seed germination in forest tree species through survival analysis. The *Pinus pinea* L. case study. *For. Eco. Manage.* 289: 515-524.

- Manso, R., Pardos, M., Keyes, C.R., Calama, R., 2012b. 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., Pukkala, R., Pardos, M., Miina, J., Calama, R., 2014. Modelling *Pinus pinea* forest management to attain natural regeneration under present and future climatic scenarios. *Can. J. For. Res.*, 44(3):250-262.
- Manso, R., Pukkala, T., Calama, R., Miina, J., Pardos, M. Datos sin publicar. An integral stochastic model for prediction and optimization of natural regeneration in *Pinus pinea* L. in the Northern Plateau (Spain).
- 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. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Ordóñez, J.L., Molowny-Horas, R., Retana, J., 2006. A model of the recruitment of *Pinus nigra* from unburned edges after large wildfires. *Ecol. Model.* 197: 405-417.
- Pukkala, T., 2003-2012. RODAL 5.0: Simulation-optimisation system for the management of any-aged stands in Spain.
- Pukkala and Köllstrom, 1992; A stochastic spatial regeneration model for *Pinus sylvestris*. *Scand. J. For. Res.* 7: 377-385

