

Supervivencia del regenerado de *Pinus pinea* L. en la meseta norte. Previsiones en un contexto de cambio climático

Manso, R.,¹ Calama, R.,¹ Madrigal, G.,¹ Conde, M.,¹ Gordo, F.,² Pardos, M.¹

¹ *Departamento de Sistemas y Recursos 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: mgforestal@hotmail.com

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

Resumen

En el presente trabajo se ha modelizado la mortalidad del regenerado de *Pinus pinea* L. en la Meseta Norte, para analizar sus causas y desarrollar recomendaciones selvícolas. En el estudio, se ha seguido la supervivencia de diferentes cohortes, instaladas en otoño y primavera, desde 2004 hasta la actualidad en masas regulares de pino piñonero de los arenales vallisoletanos. Los datos se han analizado mediante un modelo de riesgos proporcionales basado en la edad de las plántulas, testando asimismo el efecto de la sequía mediante la inclusión de la sequía fisiológica en el modelo. El uso de esta variable en el caso del regenerado de otoño no mejora el modelo, demostrando que gran parte de la variabilidad de los datos queda explicada por edad de la plántula para estas cohortes, cuya supervivencia es inferior al 20% durante el primer año, estabilizándose en torno al 4% a partir del segundo. En el caso del regenerado de primavera, prácticamente ninguna plántula supera el primer verano, lo que imposibilitó su modelización. En cualquier caso, este resultado sugiere que la primavera es la estación de incorporación más comprometida. Por otra parte, la sequía, además de la edad de la planta, está detrás de la mortalidad de estas cohortes. En un escenario de clima futuro, más árido, no sería descartable que este impacto de la sequía se trasladase a plántulas emergidas el otoño anterior. Dada la alta mortalidad predicha por los modelos, los actuales esquemas selvícolas deberían flexibilizarse hasta que el regenerado pueda considerarse estabilizado.

Palabras clave: análisis de supervivencia, riesgos proporcionales, mortalidad de plántulas, sequía.

1. Introducción

La mortalidad del regenerado supone uno de los principales obstáculos para la consecución de la regeneración natural en los montes mediterráneos (Calama y Montero, 2007). En el caso de una especie como *Pinus pinea* L., donde los procesos de fructificación, dispersión, germinación y predación representan un cuello de botella para el establecimiento final de las plántulas (Calama *et al.*, 2011; Manso *et al.*, 2012a, 2012b, 2013), la mortalidad de los mismos podría resultar clave en la consecución de la regeneración natural, etapa que supone un reto para el gestor en la actualidad. Particularmente, se debe poner especial énfasis en el impacto de la sequía en la supervivencia de plántulas que se instalan en otoño y primavera, puesto que constituye el condicionante climático más importante en ambientes mediterráneos (Blondel and Aronson, 1999). Como consecuencia de lo anterior surge la necesidad de construir modelos realistas como herramientas de apoyo a la gestión que permitan la simulación del proceso. Los modelos de regresión basados en técnicas de análisis de supervivencia han sido empleados satisfactoriamente con este fin en estudios de mortalidad del regenerado (Selander, 1993).

El presente trabajo tiene como objetivos:

- Modelizar el proceso de mortalidad de plántulas.
- Evaluar el efecto de la sequía.
- Proponer alternativas selvícolas que, de acuerdo a los condicionantes derivados de la mortalidad y resto de procesos implicados, garanticen la regeneración natural.

Se parte de las hipótesis de que:

- La sequía representa el mayor factor limitante para la supervivencia.
- La mortalidad de plántulas podría estar parcialmente detrás del fracaso de la regeneración natural para la especie en la Meseta Norte.

2. Material y métodos

2.1 Sitio de ensayo

El sitio de ensayo se localiza en la Tierra de Pinares vallisoletana, dentro del término municipal de La Pedraja de Portillo (41°28'N, 4°43'W). Se trata de una masa pura regular de *P. pinea* representativa de las condiciones normales de la comarca (clima Mediterráneo continental, suelos arenosos, a 700 m de altitud). El estudio se ha llevado a cabo en un tramo en regeneración de 120 años e índice de calidad de estación 15-16 m a los 100 años (calidad II). Se efectuaron cortas diseminatorias en 2002-2003.

2.2 Diseño experimental

El ensayo se instaló en 2003 y está formado por 6 parcelas rectangulares de dimensiones 60 m x 80 m (0.48 ha) en las que se aplicaron dos tratamientos de rege-

neración diferentes: Aclareo Sucesivo Uniforme (ASU) y Cortas a Hecho en dos tiempos (CH2), manso con 3 réplicas de cada tratamiento. Además, se instaló una parcela testigo (sin cortas). Todas las parcelas cuentan con una banda tampón de 7.5 m hacia el exterior. La espesura de la parcela control es de 149 pies/ha (18.42 m²/ha de área basimétrica); en las parcelas de ASU, 73-75 pies/ha (9.70-12.26 m²/ha); y en las de CH2, 46-48 pies/ha (6.99-9.37 m²/ha). Las parcelas se inventariaron en 2003, identificándose y numerándose los pies mayores, así como midiendo su diámetro normal (1.3 m). Este diseño experimental se encuadra en un proyecto más amplio para el estudio de la dinámica de regeneración de la especie.

Dentro de cada una de las parcelas se instalaron un total de 20 subparcelas de 3 m x 3 m sobre una malla sistemática de 13 m x 12 m, centrada a 12,5 y 11,5 m del lado largo y corto de la parcela, respectivamente (140 subparcelas). Desde febrero de 2004 hasta 2012 se han venido realizando dos inventarios anuales (un inventario en 2010) en los que se han contado e identificado las plántulas establecidas en cada subparcela, así como anotado la mortalidad de las diferentes cohortes. Los datos climáticos diarios de temperatura y precipitación utilizados correspondientes a todo el periodo de estudio se han obtenido a partir de la estación meteorológica de Olmedo (41° 17'N, 4° 40'W, a idéntica altitud que las parcelas).

2.3 Modelización

La modelización de la mortalidad de plántulas se llevó a cabo mediante un ajuste de regresión no lineal basado en técnicas de análisis de supervivencia. En este tipo de aproximaciones, la probabilidad de supervivencia de una plántula i hasta el instante t se define, de acuerdo con Lawless (2003), como

$$S_i(t) = \exp\left(-\sum_0^t h_i(x)\right) \quad (1)$$

donde $h(x)$ es la tasa de mortalidad instantánea o riesgo para el sujeto i en el tiempo t , condicionado a que haya sobrevivido hasta t ; y x es un vector de posibles covariables. Por tanto, la probabilidad de supervivencia es una función inversa de la suma de todos los riesgos previos a t . En este trabajo, se ha adoptado la forma funcional de $h(x)$ correspondiente al denominado modelo de riesgos proporcionales (Cox, 1972), con base diaria, que genéricamente se puede expresar como:

$$h(x) = h_0(t) \cdot f(x) \quad (2)$$

donde $h_0(t)$ es la línea base de riesgo de mortalidad, función del tiempo, y $f(x)$ es una función de las covariables que se consideren, siendo ambos términos positivos. La forma de la línea base depende de la función de distribución del momento T de ocurrencia del evento (muerte del sujeto i). En este estudio, se ha asumido una distribución Gompertz, ampliamente utilizada por su gran flexibilidad (Lawless, 2003), de donde se deriva que

$$h_0(t) = \gamma_1 \cdot \exp(\gamma_2 t) \quad (3)$$

donde γ_1 y γ_2 son parámetros a estimar.

Teniendo esto en consideración, se han testado dos parametrizaciones diferentes. En el primer caso, el riesgo se reduce a la línea base (*ecuación 3*), de forma que la mortalidad será sólo dependiente de la edad de la plántula. El segundo modelo incorpora una función de la sequía fisiológica diaria (*sf*), calculada según Thornwaite & Mather (1957), que afecta directamente a la línea base:

$$h(x) = [\gamma_1 \cdot \exp(\gamma_2 t)] \times [1 - \beta_1 \exp(\beta_2 sf)] + [\gamma_3 \cdot \exp(\gamma_4 t)] \quad (4)$$

donde β_1 y β_2 son parámetros a estimar, necesariamente mayor y menor que cero, respectivamente, de forma que la función de la sequía varíe entre cero y uno. El segundo sumando es una línea base auxiliar con parámetros γ_3 y γ_4 que se incluye para evitar que el riesgo sea forzosamente nulo cuando $sf=0$.

Los parámetros de los modelos se estimaron mediante el ajuste que maximiza la función de verosimilitud de dichos parámetros. En la definición de esta función se tuvo en cuenta la naturaleza de las observaciones: la mortalidad se puede producir antes de la primera medición, entre dos mediciones o la planta puede sobrevivir durante todo el periodo de estudio. Así, la función de verosimilitud queda definida como

$$L = \prod_i [s_i(t_{i,sup} | T \geq t_{i,u}) - s_i(t_{i,inf} | T \geq t_{i,u})]^k \times [s_i(t_{i,sup} | T \geq t_{i,u})]^{1-k} \quad (5a)$$

con

$$s_i(t_{i,sup} | T \geq t_{i,u}) = \left(\frac{S_i(t_{i,sup})}{(t_{i,u})} \right) \quad (5b)$$

$$s_i(t_{i,inf} | T \geq t_{i,u}) = \left(\frac{S_i(t_{i,inf})}{(t_{i,u})} \right) \quad (5c)$$

donde las expresiones recogidas en las ecuaciones 5b y 5c representan la probabilidad de supervivencia de la plántula i hasta la última fecha en la que se le encontró vivo ($t_{i,sup}$) y la primera en el que se le halló muerto ($t_{i,inf}$), condicionado a su supervivencia en el momento de su primera observación ($S_i(t_{i,u})$). $t_{i,u}$ se estimó a partir de las predicciones del modelo de germinación de Manso *et al.*, (2013), de donde se deduce que la fecha de aparición de las plántulas instaladas en otoño se puede fijar aproximadamente en el 1 de diciembre del año anterior a la primera medición. En el caso de la cohortes de primavera, el dato es más variable interanualmente. k es una variable binomial que adopta el valor uno si la planta murió durante el periodo de estudio y cero en caso contrario. Las dos parametrizaciones a estudio se evaluaron gráficamente y se compararon en términos de sus AICs. Todos los cálculos se llevaron a cabo en R 2.14 (R Core Development Team, 2010).

3. Resultados

En todo el periodo de estudio sólo cuatro cohortes lograron instalarse y persistir hasta la siguiente medición, siendo éstas las empleadas en el ajuste del modelo. La instalación de estas cohortes tuvo lugar en los otoños de 2004, 2005, 2006 y 2009, aunque sólo fueron detectadas en el inventario de la primavera siguiente. La evolución de las mismas queda reflejada en la *Tabla 1*. Cuando la instalación se produjo en primavera, la supervivencia encontrada en la siguiente medición fue nula. A nivel espacial, la mortalidad en las parcelas tratadas por CH2 fue superior (98,7%) que en las que se ejecutó cortas de ASU (90,6%).

El modelo que reduce el riesgo a la línea base (que sólo considera la edad de la planta como covariable) presentó un mejor ajuste que el modelo que contempla la sequía, con AICs de 11943.46 y 12471.54, respectivamente, por lo que se seleccionó aquél. Gráficamente se comprueba que las predicciones de este primer modelo se ajustan notablemente a las observaciones en las cohortes de 2006, 2007 y 2010, con una tendencia a la subestimación de la mortalidad en 2005, especialmente en las fechas inmediatamente posteriores a la primera medición (*Figura 1*). Los parámetros γ_1 y γ_2 del modelo elegido toman los valores de 0.01 y -0.0031, respectivamente. La supervivencia media estimada previa a la primera medición ($S(t_w)$) varía entre los diferentes años de forma proporcional al tiempo transcurrido entre la instalación y la medición (t_w): 53.58%, 21.83%, 31.00% y 66.79% para 2005, 2006, 2007 y 2010, respectivamente. En general, la curva es monótonicamente descendente, dependiente sólo del tiempo y con una relación entre predicciones consecutivas de riesgo instantáneo de $\exp(\gamma_2(t_{sup}-t_{inf}))$. Así, el 25% de las plántulas de otoño habrían muerto en aproximadamente un mes tras su instalación; el 50%, a los dos meses y tres semanas;

Tabla 1. Evolución de la supervivencia (nº de individuos) de las plántulas correspondientes a las cohortes incorporadas en otoño de 2004, 2005, 2006 y 2009

fecha de medición	Cohortes			
	otoño 2004	otoño 2005	otoño 2006	otoño 2009
28 / 05 / 2005	42	-	-	-
14 / 06 / 2005	3	-	-	-
27 / 05 / 2006	0	34	-	-
10 / 01 / 2007	0	9	5665	-
17 / 07 / 2007	0	3	2179	-
23 / 03 / 2008	0	3	623	-
30 / 08 / 2008	0	2	519	-
27 / 02 / 2009	0	2	480	-
25 / 07 / 2009	0	2	456	-
17 / 04 / 2010	0	1	422	40
18 / 03 / 2011	0	1	401	6
21 / 11 / 2011	0	0	395	3

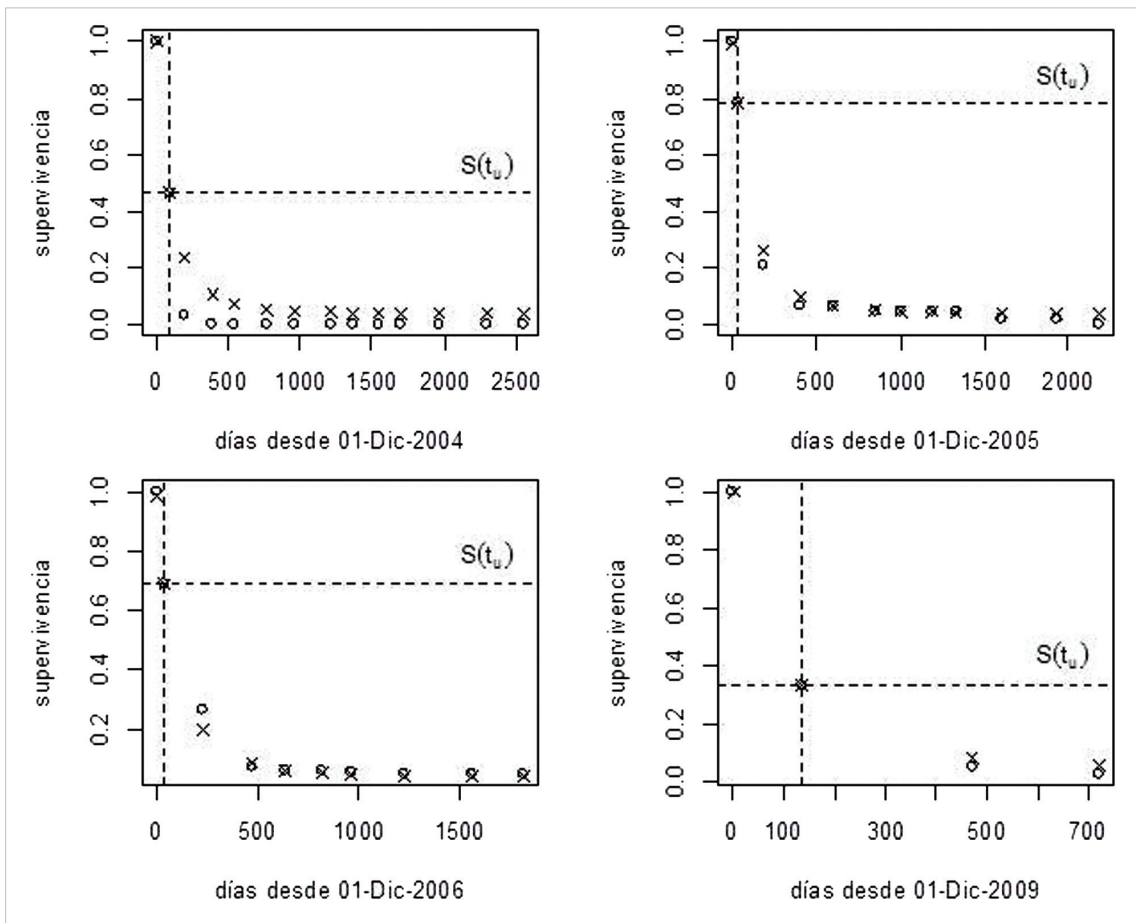


Figura 1. Supervivencia observada (círculos) y predicha (cruces) para las cuatro cohortes de otoño utilizadas a lo largo del tiempo por el modelo seleccionado. La línea horizontal indica la supervivencia estimada hasta el momento en el que la cohorte fue detectada ($S(t_u)$). La línea vertical representa el instante t_u . Nótese que las observaciones se han escalado de forma que coincidan con las predicciones en t_u .

el 75%, a los seis meses; estabilizándose finalmente en un 4% de los individuos del total predicho (8% del total observado) a partir de los dos años, aproximadamente.

4. Discusión

El modelo presentado en este trabajo estima con precisión la mortalidad del regenerado de *P. pinea* establecido en otoño considerando exclusivamente la edad de las plántulas. La estabilización de la supervivencia para estas plántulas y la aparentemente escasa influencia de la sequía contrastan con la práctica total mortalidad del regenerado de primavera durante el primer verano. De todo ello se deriva que el frío no parece ser un factor determinante en la supervivencia mientras que la sequía lo es para aquellas plántulas recién instaladas (primavera), tal y como adelantan Calama *et al.* (2012).

Considerando los numerosos cuellos de botella existentes en el proceso de regeneración natural, que implican una baja probabilidad de instalación a escala anual, junto a la alta mortalidad predicha en otoño (y la observada en campo en primavera), se puede inferir que tratamientos intensos y estrictos como los que se realizan actualmente en la Meseta Norte, podrían comprometer la regeneración si las cortas se llevan a cabo antes de que el regenerado pueda considerarse instalado, al reducir notablemente las fuentes de semilla. En este sentido, las cortas deberían flexibilizarse, de forma que se ejecuten con posterioridad a la aparición de un regenerado consolidado, suficiente y uniformemente distribuido. Además, la mayor probabilidad de supervivencia en las parcelas de más densidad sugiere un cierto efecto facilitador del arbolado adulto sobre el regenerado, al menos durante los primeros años. En un escenario de cambio climático con sequías más severas (De Castro *et al.*, 2005), el impacto de las mismas en las plántulas emergidas en otoño podría cobrar relevancia. El alcance de esta posibilidad debe estudiarse con detalle en el futuro, dadas las graves consecuencias que implicaría para la regeneración natural de la especie en los pinares de los arenales de la meseta castellana.

5. Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento a todas las personas que han colaborado de una u otra forma en el mantenimiento de este experimento, y muy particularmente a Enrique Garriga. El presente trabajo ha sido financiado por los proyectos AGL2010-15521 y RTA2007-00044.

6. Bibliografía

- Blondel, J. and Aronson, J., 1999. *Biology and wildlife of the Mediterranean region*. Oxford University Press. Nueva York.
- Calama R. and Montero, G., 2007. Cone and seed production from stone pine (*Pinus pinea* L.) stands in Central Range (Spain). *Eur. J. Forest Res.* 126: 23–35.
- Calama, R., Mutke, S., Tomé, J., Gordo, J., Montero, G. and 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., 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. 254 pp.
- Cox, D.R., 1972. Regression models and life-tables. *J.R. Statist. Soc. B.* 34: 187-220.
- De Castro, M., Martín-Vide, J., Alonso, S., 2005. The climate of Spain: past, present and scenarios for the 21st century. *In: A preliminary assessment of the impacts in Spain due to*

- the effects of climate change. ECCE Project-Final report: 1-64.* Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- Lawless, J., 2003. *Statistical models and methods for lifetime data.* John Wiley & Sons, Inc. Hoboken.
- Manso, R., Pardos, M., Keyes, C.R. and Calama, R., 2012a. 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., 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., 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., Fortin, M., Calama, R. and Pardos, M., 2013. Modelling seed germination in forest tree species through survival analysis. The *Pinus pinea* L. case study. *For. Eco. Manage.* 289: 515-524.
- R Development Core Team; 2010. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Selander, J., 1993. Survival model for *Pinus sylvestris* seedlings at risk from *Hylobius abietis*. *Scand. J. Forest Res.* 8: 66-72.
- Thornthwaite, C.W. and Mather, J.R., 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balances. *Climatology* 10: 181-311.