

ANÁLISIS DE SUPERVIVENCIA APLICADO A LA OBTENCIÓN DE MODELOS DESCRIPTIVOS Y PREDICTIVOS DE LA REGENERACIÓN DE *PINUS PINASTER* AIT. TRAS INCENDIOS FORESTALES

Javier Madrigal Olmo, Carmen Hernando Lara y Mercedes Guijarro Guzmán

CIFOR-INIA. Departamento de Selvicultura y Gestión de los Sistemas Forestales. Laboratorio de Incendios Forestales. Ctra. Coruña km, 7,5. 28040-MADRID (España). Correo electrónico: incendio@inia.es

Resumen

En el presente trabajo se presentan diversos ejemplos de análisis no paramétricos de supervivencia, tanto en ensayos de campo como en condiciones de vivero, que han descrito el proceso de mortalidad-supervivencia de brinzales de *Pinus pinaster* creciendo en distintas condiciones. Se valoran las aplicaciones de dichos análisis así como las ventajas y la complementariedad con otras técnicas más utilizadas como la regresión no lineal y la regresión logística.

Palabras clave: *Método estimador producto-límite de Kaplan-Meier, Modelos no paramétricos de Cox, Función exponencial, Función de riesgo, Función de supervivencia, Función de Weibull*

INTRODUCCIÓN

La regeneración natural tras incendios forestales es un proceso cuyo grado de éxito o fracaso tiene una elevada repercusión en la permanencia y sostenibilidad de nuestros montes. El previsible aumento del número de grandes incendios en un contexto de cambio climático hace necesario el conocimiento de la ecología del fuego de las especies más afectadas, así como la obtención de modelos descriptivos y predictivos que ayuden tanto a la planificación de la restauración como al desarrollo de herramientas prácticas de apoyo a la prevención. El pino negral (*Pinus pinaster* Ait.) tiene una gran importancia estratégica, desde el punto de vista ambiental y socioeconómico, siendo uno de los más afectados por incendios. En los últimos años se han venido aportando diversos modelos que describen el

éxito regenerativo, la densidad y la supervivencia del regenerado tras incendios, así como el efecto de la severidad del fuego y de los tratamientos de saca de la madera en dichos procesos (FERNÁNDEZ *et al.*, 2008; MADRIGAL *et al.*, 2010; VEGA *et al.*, 2010). La emergencia inicial a escala de rodal depende en gran parte del ecotipo estudiado (grado de serotinia), de la severidad del incendio, de la diseminación y de las condiciones del lecho de germinación tras el paso del fuego. Sin embargo, la supervivencia de los brinzales depende de un amplio número de factores ecofisiológicos en los que la gestión forestal y los efectos del fuego sobre el suelo y la vegetación juegan un papel determinante. En los citados estudios se demostró el efecto de la severidad del fuego y de la saca de la madera quemada en el lecho de germinación y posterior emergencia de las semillas, así como la supervi-

vencia de los brinzales de *P. pinaster*. Para describir este último proceso se utilizaron técnicas no paramétricas que se engloban en lo que diversos autores y los propios paquetes informáticos denominan “análisis de supervivencia” (LE, 1997). Estas técnicas son utilizadas con frecuencia en otros campos de la biología y la medicina, presentando la evidente ventaja de que los datos no deben cumplir los estrictos requisitos paramétricos. También presentan algunas ventajas sobre otras técnicas no lineales muy usadas en el ámbito forestal como la regresión logística, puesto que permiten la inclusión de datos censurados. Efectivamente, durante el seguimiento de un experimento de regeneración con plántulas etiquetadas, sobre todo cuando se realiza en condiciones de campo, es muy frecuente la pérdida de individuos (en este caso brinzales) por causas desconocidas o ajenas a las variables controladas en el estudio. Otras ventajas del análisis de supervivencia sobre la regresión logística son la necesidad de un menor número de datos para conseguir modelos con un ajuste significativo, el uso del tiempo como variable relativa de seguimiento para cada individuo, y la posibilidad de comparar diferentes tratamientos mediante el uso tests Ji-cuadrado (tests de Mantel-Cox, Wilcoxon-Gehan, etc.). También pueden elaborarse ecuaciones predictivas en función de variables continuas y, tanto éstas como las funciones de probabilidad de supervivencia, se pueden ajustar a funciones de densidad no lineales como la ecuación de Weibull o la ecuación exponencial negativa, cuando el patrón de supervivencia responde a dichas ecuaciones (LE, 1997). La vocación del análisis de supervivencia es más descriptivo que predictivo pero, asimismo, permite generar nuevas variables, como la tasa de riesgo, la vida media del individuo, la probabilidad de supervivencia para diferentes momentos, etc. que aportan gran cantidad de información y que pueden alimentar los modelos generados con otras técnicas más predictivas.

MATERIAL Y MÉTODOS

Estudios evaluados

En el presente trabajo se presentan algunos ejemplos de aplicación del análisis de supervi-

vencia para el seguimiento de brinzales de pino negral sometidos a diferentes condiciones.

En primer lugar se analiza la supervivencia de brinzales de *P. pinaster* sembrados sobre dos tipos de suelo sometidos a fuego de rescoldo y situados posteriormente en eras de cultivo al aire libre (más detalles en MADRIGAL et al. 2010). En este caso se realizó un seguimiento semanal, durante los 8 meses siguientes a la siembra, contabilizándose la supervivencia de los brinzales en cuatro tipos de lechos de germinación marcadamente diferentes: un suelo ácido y arenoso procedente de la provincia de Pontevedra sometido a fuego de rescoldo (qp) con su correspondiente testigo (tp) y un suelo neutro y arcilloso procedente de la provincia de Cuenca sometido a fuego de rescoldo (qc) con su correspondiente testigo (tc). Se monitorizó la temperatura del suelo a 1 cm de profundidad mediante termopares conectados a un dispositivo electrónico de adquisición (Datataker DT500®). Se definieron como temperaturas críticas aquellas temperaturas máximas medidas en las eras que redujeron la probabilidad de supervivencia acumulada por debajo de un 50% al final de cada período.

El segundo ejemplo presentado es el seguimiento que se viene efectuando del regenerado de *P. pinaster* tras el gran incendio del Rodenal de Guadalajara de 2005. En este caso se analizó el efecto de la edad de la masa previa al incendio y la saca de la madera quemada en la supervivencia a escala de rodal. Para ello se realizó un seguimiento semestral (2006-2009) en parcelas de 20 m x 20 m localizadas en zonas de pinar joven (20-30 años) y maduro (80-90 años) en las que se realizó la saca de madera quemada y acordonado de residuos y se comparó con sus correspondientes testigos sin intervención (más detalles en MADRIGAL et al., 2009).

Técnicas estadísticas evaluadas

Para describir el proceso de mortalidad-supervivencia se estimó la función de supervivencia mediante el estimador *producto-límite de Kaplan-Meier* y para cada uno de los estudios se compararon las funciones de supervivencia mediante el estadístico χ^2 . Las funciones de supervivencia $S(t)$ estiman la probabilidad de que un brinjal sobreviva, al menos, hasta un instante t , y se pueden ajustar a una distribución de Weibull del tipo:

$$S(t) = e^{-At^B} \quad (1)$$

Siendo $S(t)$ = función de supervivencia, A = parámetro de escala de la distribución de Weibull, B = parámetro de forma de la distribución de Weibull y t = tiempo de supervivencia del individuo desde su emergencia. Como se puede comprobar en el caso particular de $B = 1$ la función de densidad tendría forma de exponencial negativa.

La función de riesgo $h(t)$ que proporciona la tasa condicional de fallo o muerte de un elemento que no haya fallado antes del instante t , se define como:

$$h(t) = ABt^{(B-1)} \quad (2)$$

Para el caso particular en el que $S(t)$ sea una función exponencial ($B = 1$), la tasa de riesgo sería constante y se corresponde con el parámetro A de la función $S(t)$.

Se han definido modelos *no paramétricos de Cox* (LE 1997) en función de variables continuas, basados en la función de riesgo:

$$h(t, z) = h(t)e^{(\beta z)} \quad (3)$$

Siendo z la variable independiente (covariable) y β el parámetro del modelo calculado por el método iterativo de Newton-Raphson. Este modelo se puede generalizar para z_j variables independientes, permitiendo ajustar las correspondientes familias de curvas Weibull para diferentes valores de dichas variables predictoras.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Influencia del lecho de germinación y el fuego de rescoldo en la supervivencia de brinzales de pino negral

El modelo correspondiente al seguimiento semanal efectuado durante el primer verano y otoño-invierno tras la emergencia de los brinzales se detalla en la Figura 1 ($\chi^2 = 291,33$; LL = -3.444,32; $p < 0,0001$). Como se puede comprobar la dinámica de supervivencia es marcadamente diferente para los cuatro tipos de lecho de germinación. El análisis de supervivencia para el primer verano muestra una diferencia significativa de las 4 funciones de supervivencia ($\chi^2 = 158,19$; $p < 0,0001$). Por tanto, la probabilidad de supervivencia durante el primer verano es significativamente mayor en la procedencia de Cuenca que en

la de Pontevedra y en los tepes testigos que en los quemados. Estas diferencias son mucho más acusadas durante el invierno posterior a la siembra. Efectivamente la comparación de las funciones de densidad ofrece un resultado claramente significativo ($\chi^2 = 154,08$; $p < 0,0001$) y las diferencias entre el testigo y el quemado de Cuenca son evidentes (MADRIGAL et al. 2010), ya que durante el otoño-invierno sobrevivieron todos los brinzales de "tc" (Figura 1). La función de riesgo ($\chi^2 = 322,45$; LL = -4.001,61; $p < 0,0001$) ofrece tasas condicionales de muerte muy bajas durante el primer verano para todos los bloques excepto para "qp", siendo las 3 primeras semanas críticas para la supervivencia en ambos períodos.

A la vista de los resultados se planteó la hipótesis de que, no solamente las características físico-químicas del lecho de germinación, sino también la inercia térmica del suelo (calentamiento por encima de la temperatura ambiente en verano o enfriamiento por debajo de la temperatura ambiente en otoño-invierno) podía influir en la probabilidad de supervivencia. Para ratificarlo, se ajustaron modelos de Cox para las temperaturas máximas y mínimas absolutas medidas en los cuatro suelos a 1 cm de profundidad, presentando un ajuste altamente significativo ($\chi^2 = 482,69$; LL = -4.233,51; $p < 0,0001$). Las familias de curvas de temperatura predichas por el modelo (Figura 2), muestran que las curvas críticas (supervivencia menor del 50%) son las correspondientes a las temperaturas máximas medidas en las eras de 60°C y -7,5°C, con lo que podemos considerar que el modelo presenta sentido biológico y ratificaría la plasticidad de la especie para adaptarse a amplios rangos de temperatura.

Influencia de la saca de madera quemada en la supervivencia del regenerado post-incendio de pino negral

Se analizó el efecto de la edad de la masa y la saca de la madera en la probabilidad de supervivencia del regenerado de pino negral después del incendio del Rodenal de 2005. El ajuste de las funciones $S(t)$ a una función exponencial permitió obtener el valor del parámetro A (ecuación 1) para la estimación de la tasa constante de riesgo de mortalidad mensual para cada tratamiento, oscilando entre el 1,4% y el 4% (más detalles en MADRIGAL et al., 2009). Se analizó también el

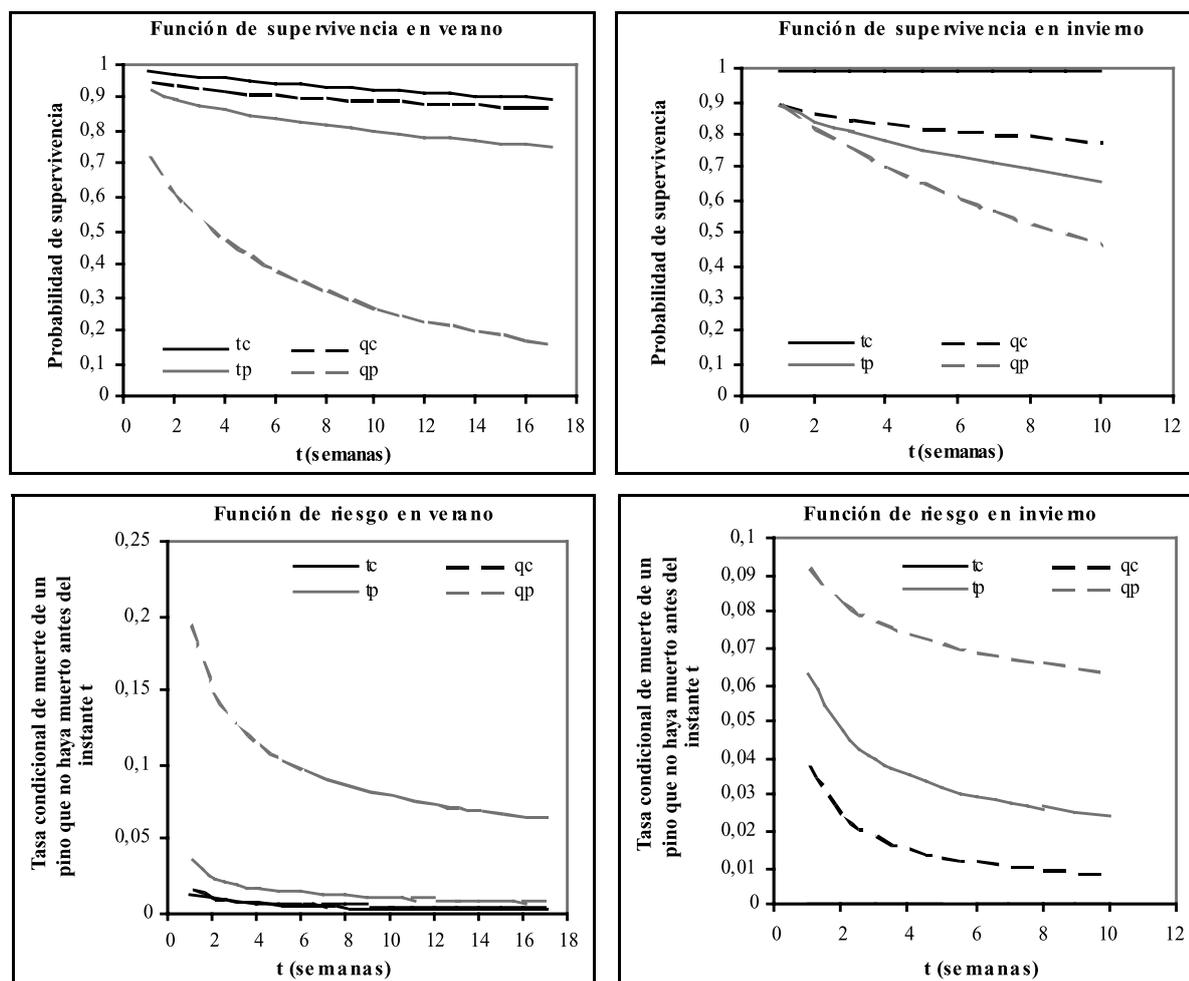


Figura 1. Funciones de supervivencia y funciones de riesgo ajustadas a una distribución de Weibull ($r^2_{adj} > 0,9$, $p < 0,01$) en verano ($n=471$) e invierno ($n=746$) tras la emergencia (tc=testigo Cuenca, qc=quemado Cuenca, tp=testigo Pontevedra, qp=quemado Pontevedra)

efecto del momento de la corta (antes o después de la emergencia) en la probabilidad de supervivencia de los brinzales de pino que emergieron seis meses tras el incendio. Las funciones $S(t)$ mostraron que la probabilidad de supervivencia en las parcelas donde se retrasó la corta 6 meses tras la emergencia, se reduce significativamente ($\chi^2 = 56,38$; $p < 0,0001$) como consecuencia de los daños producidos por las operaciones de saca (más detalles en MADRIGAL *et al.*, 2009).

Las observaciones de campo y los resultados de estudios anteriores (FERNÁNDEZ *et al.*, 2008, VEGA *et al.*, 2010) sugerían la posibilidad de que la probabilidad de supervivencia aumentara en aquellos individuos que se instalan antes, con mayor altura desde la primera medición. A su vez se observó que las parcelas situadas en las zonas

de mayor pendiente presentaban mayor vigor y competían mejor con la vegetación acompañante. Para verificar dichos efectos se ajustó un modelo de riesgo proporcional de Cox ($\chi^2 = 52,95$; $LL = -5.302,51$; $p < 0,0001$) con ambas variables (altura del brinzal en la primera medición y pendiente) generándose a continuación la correspondiente familia de funciones de densidad de supervivencia predichas (Figura 3). Los resultados confirmarían la influencia positiva de la altura del brinzal como indicador de la mayor probabilidad de supervivencia tres años tras la emergencia y, en este caso, también el efecto positivo de la pendiente, corroborando la robustez de la especie en el área de estudio y, aunque el éxito regenerativo inicial fue menor (menores densidades) en las zonas de mayor pendiente, en

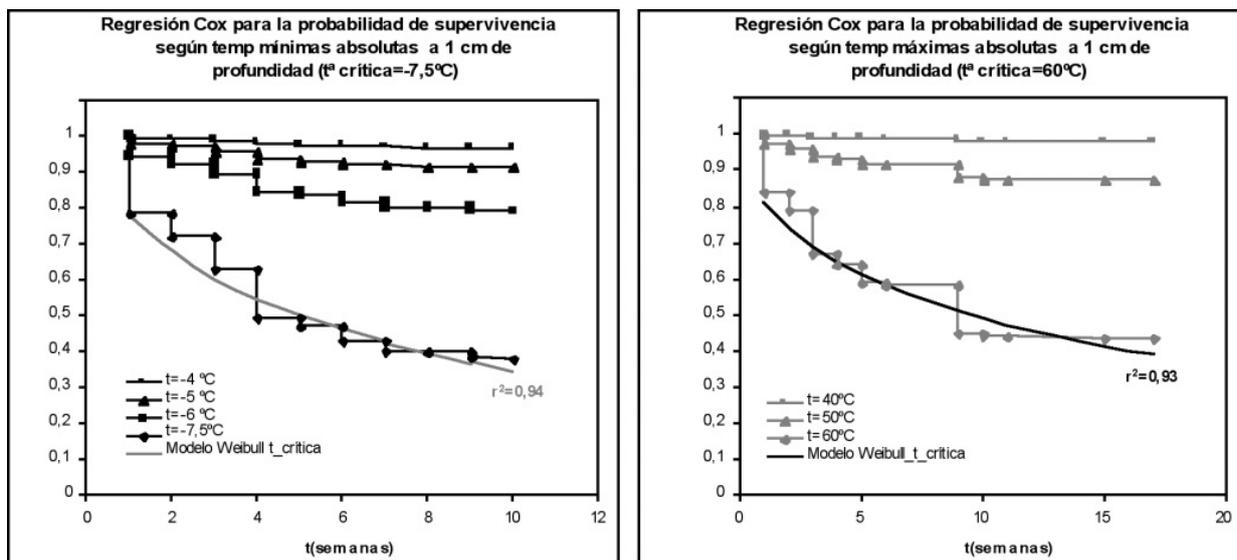


Figura 2. Representación de las familias de curvas según los modelos de Cox obtenidos para las temperaturas máximas y mínimas absolutas en el suelo a 1 cm de profundidad. Se ha ajustado la función de Weibull para las curvas de temperaturas críticas máxima y mínima (temperatura a partir de la cual la probabilidad acumulada disminuye por debajo del 50% en el intervalo de tiempo estudiado)

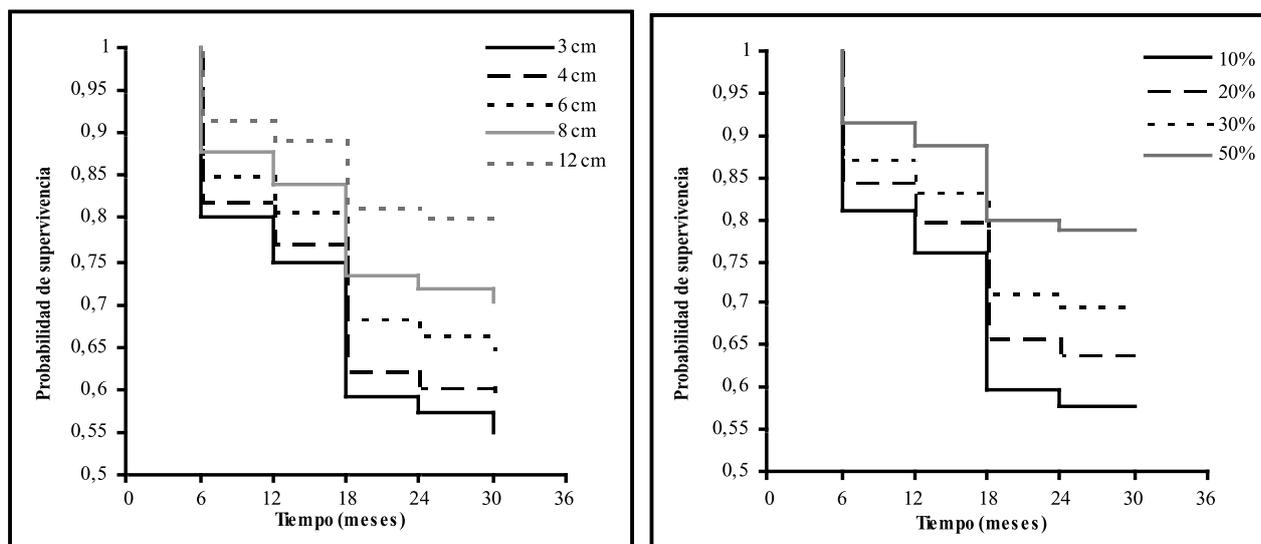


Figura 3. Familias de curvas predichas por el modelo de riesgo proporcional de Cox ajustado para la probabilidad de supervivencia de brinzales de pino en función de su altura inicial antes del primer verano post-incendio (pendiente media 25%) y la pendiente del terreno (altura media del brinzal 6 cm) ($\chi^2 = 61,15$; $p < 0,0001$, $n = 1.900$)

cambio existió también menor competencia intra e interespecífica y mayor probabilidad de supervivencia (MADRIGAL *et al.*, 2009).

CONCLUSIONES

El análisis de supervivencia se ha mostrado como una técnica eficaz para describir el proce-

so de mortalidad-supervivencia en estudios de seguimiento de regeneración, permitiendo ratificar estadísticamente evidencias contrastadas en estudios previos u observaciones de campo. El ajuste de modelos simples o múltiples que incluyen variables que puedan afectar al proceso estudiado, permiten también el uso de estas técnicas con fines predictivos, siendo de alto interés para completar los resultados allí donde otras

técnicas más utilizadas (modelos logísticos, modelo lineal general, modelos no lineales, modelos PLS), no se muestren estadísticamente fiables por falta de robustez y/o incumplimiento de los requisitos paramétricos.

BIBLIOGRAFÍA

- LE, C.T.; 1997. *Applied survival analysis*. Wiley. New York.
- FERNÁNDEZ, C.; VEGA, J.A.; FONTÚRBEL, M.T.; JIMÉNEZ, E. & PÉREZ-GOROSTIAGA, P. 2008. Effects of wildfire, salvage logging and slash manipulation on *Pinus pinaster* Ait. recruitment in Orense (NW Spain). *Forest Ecol. Manage.* 225: 1294-1304
- MADRIGAL, J.; VEGA, J.A.; HERNANDO, C.; FONTÚRBEL, T.; DíEZ, R.; GUIJARRO, M.; DíEZ, C.; MARINO, E.; PÉREZ, J.R.; FERNÁNDEZ, C.; CARRILLO, A.; OCAÑA, L. Y SANTOS, I.; 2009. Efecto de la corta a hecho y la edad de la masa en la supervivencia de regenerado de *Pinus pinaster* Ait. tras el gran incendio del Rodenal de Guadalajara. *En: S.E.C.F.-Junta de Castilla y León (eds.), Actas 5º Congreso Forestal Español*. CD-Rom. SCFE01-473: 2-10. Sociedad Española de Ciencias Forestales. Pontevedra.
- MADRIGAL, J.; HERNANDO, C.; GUIJARRO, M.; VEGA, J.A.; FONTÚRBEL, T. & PÉREZ-GOROSTIAGA, P.; 2010. Smouldering fire-induced changes in a Mediterranean soil (SE Spain): effects on germination, survival and morphological traits of 3-years-old *Pinus pinaster* Ait. *Plant Ecol.* 208(2): 279-292.
- VEGA, J.A.; FERNÁNDEZ, C.; PÉREZ-GOROSTIAGA, P. & FONTURBEL, T.; 2010. Response of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) recruitment to fire severity and post-fire management in a coastal burned area in Galicia (NW Spain). *Plant Ecol.* 206: 297-308.