

EL USO DE MODELOS LOGÍSTICOS PARA LA PREDICCIÓN DE LA REGENERACIÓN POST-INCENDIO DE *PINUS PINASTER* AIT.: APLICACIÓN AL INCENDIO DE ROBLEDILLO DE GATA (SIERRA DE GATA, CÁCERES)

Javier Madrigal Olmo, Carmen Hernando Lara, Mercedes Guijarro Guzmán y Carmen Díez Galilea

Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Centro de Investigación Forestal. Departamento de Protección Forestal. Carretera de La Coruña km 7. 28040-MADRID (España). Correo electrónico: incendio@inia.es

Resumen

El objetivo del presente trabajo es evaluar la influencia de diversos factores (pendiente, profundidad de suelo, competencia interespecífica) en la presencia y abundancia de regenerado natural de *P. pinaster* tras el gran incendio de Robledillo de Gata (Cáceres) de 1999. Las mediciones se efectuaron en 2002 por lo que se evaluó la regeneración tres años después del incendio. A lo largo de un transecto lineal de rumbo fijo se replantearon sistemáticamente (100 m) parcelas cuadradas subdivididas en cuatro subparcelas triangulares. Se elaboraron modelos de presencia y abundancia de regeneración mediante modelos de regresión logística, seleccionando las variables independientes por medio de la técnica “paso a paso” (*stepwise*). Para los modelos de presencia, la variable dependiente fue la “ausencia” ($p=0$) o “presencia” ($p=1$) de regenerado. En los modelos de abundancia se dividió la variable *densidad de regenerado* ($\text{pies} \cdot \text{ha}^{-1}$) en dos categorías, según fueran inferiores ($p=0$) o superiores ($p=1$) a 10.000 $\text{pies} \cdot \text{ha}^{-1}$. Los resultados obtenidos han permitido evaluar la probabilidad de presencia o abundancia de regenerado en función de factores de fácil obtención, lo que puede suponer una ayuda en la toma de decisiones, en la prevención y restauración tras incendios forestales que afecten a la especie en la zona de estudio.

Palabras clave: *Incendio forestal, Microrrelieve, Pino negral, Región de procedencia, Regresión logística, Regenerado natural*

INTRODUCCIÓN

En España, alrededor de 680.000 ha de *Pinus pinaster* han ardido desde 1968 a 1995 y en el quinquenio 1996-2000 fue la especie arbórea más afectada por el fuego. La gran variabilidad de situaciones post-incendio que se presentan impide establecer pautas generales de actuación,

por lo que los gestores suelen aducir falta de información para estimar las probabilidades de éxito de la regeneración natural (VEGA et al., 2005). Efectivamente, la última revisión realizada para la ecología del fuego y la gestión del pino negral (FERNANDES & RIGOLOTT, 2007) pone de manifiesto que la variabilidad de respuestas ante el fuego de las distintas regiones de procedencia

(estrategias resistentes, estrategias evasivas), genera diferentes adaptaciones al fuego (TAPIAS et al., 2004) y diferentes respuestas post-incendio, todas ellas de difícil generalización.

La región de procedencia Sierra de Gata-Hurdes (ALÍA et al., 1996) presenta ecotipos con diversas estrategias evasivas ante el fuego (serotinia, semillas de alta viabilidad), que permiten a la masa acumular un abundante banco edáfico de semillas post-incendio. Las favorables condiciones climáticas de la zona, con precipitaciones anuales de 1.500 mm y sequía estival reducida, favorecen la paulatina germinación de diferentes cohortes desde el otoño posterior al incendio, hasta al menos tres años después. No obstante, la irregularidad espacial en las densidades medias observadas tras el incendio, pondría de manifiesto que las condiciones del sitio, a una escala de *microrrelieve*, pueden condicionar en gran medida la presencia y abundancia de regeneración de esta especie (MADRIGAL et al., 2005) ya que determinan situaciones con diferentes lechos de germinación (pendientes locales, profundidad de suelo efectivo, erosión de suelo mineral, sedimentación, arrastre de semillas, etc.). Por otro lado, la excesiva abundancia de regenerado también plantea un grave problema de gestión, al tener que dosificar la competencia mediante claros que suponen un coste elevado.

Para todo ello es importante tener elementos de valoración y modelos predictivos que permitan determinar las zonas prioritarias de actuación en aquellas áreas con regeneración excesiva o prever los factores limitantes que determinan bajas probabilidades de regenera-

ción natural. Con el objetivo de determinar la influencia de variables relacionadas con las condiciones del microrrelieve en la presencia y abundancia de regenerado de *P. pinaster* se proponen una serie de modelos logísticos.

MATERIAL Y MÉTODOS

Zona de estudio

El incendio de Robledillo de Gata afectó a 850 ha entre el 30 de julio y el 1 de agosto de 1999. Ardieron 520 ha de *P. pinaster*, procedentes de repoblaciones realizadas entre los años 1970-1975 y otras zonas de latizal entre 15-20 años, procedentes de regeneración natural post-incendio. Las características generales de la región de procedencia pueden consultarse en ALÍA et al. (1996) y la localización de la zona afectada y características de la masa anterior al incendio se detallan en la tabla 1 y la figura 1.

Toma de datos

En el año 2002, tres años después del incendio, se seleccionó una zona perteneciente a la parte central del perímetro afectado, sin influencia del arbolado circundante, ni pies aislados sin quemar que hubieran podido aportar semilla tras el incendio. La homogeneidad y abundancia del regenerado hacía que la variabilidad observada fuera, fundamentalmente, función de las pendientes locales y condiciones del microrrelieve. Con el objetivo de cuantificar la influencia de estas variables en la presencia y abundancia de regenerado de *P. pinaster* se definió un transec-

Localización y altitud (UTM, Huso 30)	
X = 201.900-205.200 m	Y = 4.467500-4.472.000 m Z = 500-1.000 m
Características de la masa de <i>P. pinaster</i> anterior al incendio	
Región de procedencia	Sierra de Gata-Hurdes
Serotinia	Presencia de serotinia en la mayoría de los pies desde edades tempranas. Los pies adultos presentan generalmente de 8 a 15 cosechas acumuladas
Edad	Repoblación coetánea de 28-33 años, según el año de plantación
Densidad (pies.ha ⁻¹)	1.000
Altura dominante (m)	14
Área basimétrica (m ² .ha ⁻¹)	27
Vegetación acompañante	<i>Pterospartum tridentatum</i> , <i>Halimium</i> sp. y <i>Erica scoparia</i>

Tabla 1. Localización de la zona afectada y características de la masa adulta previa al incendio de Robledillo de Gata

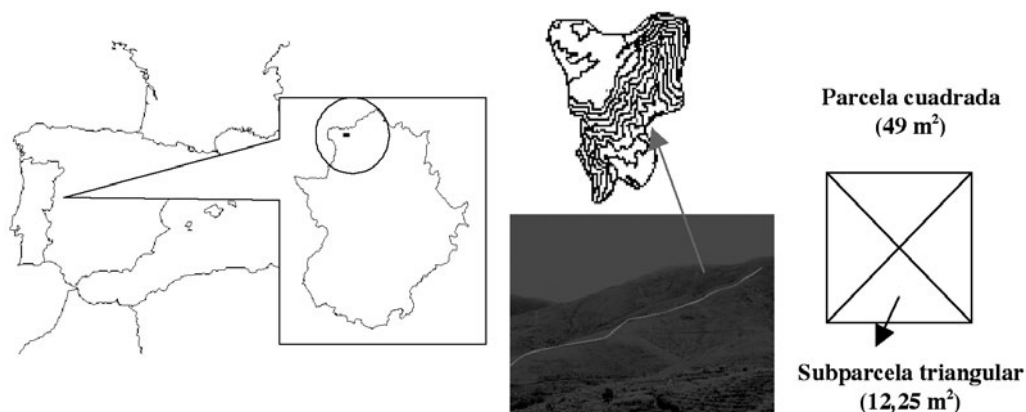


Figura 1. Situación de la zona de estudio, localización del transecto y esquema de las parcelas y subparcelas de muestreo

to de rumbo fijo a lo largo de una ladera de solana (230°). Se eligió una zona de severidad del incendio moderada (fuego de superficie con sofamado total o parcial de las copas) y con una masa anterior al incendio homogénea en cuanto a su edad, dasometría y banco aéreo estimado. Se replantearon sistemáticamente, cada 100 m, un total de 13 parcelas cuadradas de 7 m de lado (49 m²), subdivididas por sus dos diagonales en 4 subparcelas triangulares (12,25 m²) (Figura 1). El resultado final fue, por tanto, la obtención de 52 subparcelas de muestreo a lo largo de un transecto de una longitud total de 1.200 m, situado entre 590 m y 900 m de altitud.

La variable dependiente seleccionada fue el número (densidad, en pies.ha⁻¹) de plantas de *Pinus pinaster*. Las variables independientes fueron seleccionadas de acuerdo a estudios previos para la regeneración post-incendio de la especie (VEGA et al., 2005) y a las observaciones de campo realizadas en la zona: altitud (m), pendiente local (%), profundidad de suelo (cm), espesor (cm) y cobertura (%) de la capa de hojarasca y mantillo remanente (capa LFH), superficie de suelo mineral descubierto (%), cobertura (%) y altura (cm) de matorral competidor por especie.

Análisis estadístico

Se establecieron modelos para la presencia y abundancia de las plantas, utilizando la regresión logística definida por la expresión:

$$p = 1/(1+e^{-(a+\sum b_i x_i)})$$

Donde “p” es la probabilidad de que un evento (variable dependiente) ocurra, “a” es una constante del modelo no lineal y “b_i” el coeficiente estimado para cada variable independiente x_i. En el caso de los *modelos de presencia* expresaría la probabilidad de presencia (p=1) o ausencia (p=0) de brinzales de *P. pinaster* en la subparcela, lo que supone una densidad superior a 800 pies.ha⁻¹. Ante la abundante regeneración observada se han elaborado modelos de abundancia dividiendo la variable densidad en dos categorías: mayor de 10.000 pies.ha⁻¹ (p=1) o menor de 10.000 pies.ha⁻¹ (p=0). Este límite se consideró por dos razones fundamentales:

1. Permite equilibrar la muestra en aproximadamente un 50% de casos para cada categoría.
2. Las densidades superiores a 10.000 pies.ha⁻¹ presentan un grave problema de competencia intraespecífica a corto plazo para lo cual sería necesario realizar clareos tempranos e intensos, que se han mostrado altamente eficaces en esta especie para condiciones favorables de la estación (MADRIGAL et al., 2006).

El modelo es elaborado mediante una selección de variables *stepwise*, donde el estadístico χ^2 determina las variables que deben ser incluidas o rechazadas del modelo según su significación. El estadístico LL permite estimar los coeficientes b_i mediante el método de máxima verosimilitud de forma iterativa y ofrece una indicación de la desviación del modelo respecto a los datos (-2LL). El *pseudo-coeficiente* de determinación ajustado ofrece una medida de la

calidad del ajuste. Mediante la determinación gráfica del punto de corte de la gráfica sensibilidad-probabilidad, se determina el número óptimo de casos clasificados correctamente.

Para el cálculo de los parámetros y la elaboración de los modelos se han utilizado los paquetes STATISTICA® y STATGRAPHICS PLUS®.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados promedio obtenidos para las variables medidas o estimadas en las subparcelas de muestreo se muestran en la tabla 2.

Se exploraron los datos mediante la matriz de correlaciones y fue posible comprobar la correlación significativa de la densidad del regenerado con variables como la pendiente ($r = -0,38$, $p=0,052$), el espesor ($r = 0,42$, $p=0,018$) y cobertura ($r = 0,40$, $p=0,036$) de la capa LFH y el suelo mineral descubierto ($r = -0,38$, $p=0,059$). A su vez existían correlaciones significativas entre algunas de las variables independientes que se tuvieron en cuenta antes de generar los modelos para evitar autocorrelación.

Los modelos propuestos para la presencia y abundancia de regenerado de *P. pinaster* se muestran en la tabla 3. El modelo de presencia considera sólo la variable *pendiente local* (Pend) que, en realidad, absorbe la variabilidad de otras variables independientes con las que tiene fuerte correlación, como el espesor de la capa LFH ($r = -0,32$; $p=0,018$) y el suelo mineral descubierto ($r = -0,41$; $p=0,003$). En este caso, el modelo

manifiesta una tendencia a clasificar los datos como “positivos” ($p=1$), debido al bajo número de casos con ausencia de regeneración (5 subparcelas), por eso es necesario aplicar un punto de corte muy elevado (0,95) de manera que pueda distinguir los casos “negativos” ($p=0$). Este hecho confirmaría la significación, ya observada en la matriz de correlaciones, de la mayor probabilidad de ausencia de regenerado en aquellas zonas de fuertes pendientes, donde las peores condiciones del microrrelieve, mayor erosión y el posible arrastre de semillas sean limitantes para la existencia de regeneración. La representación gráfica de este modelo (Figura 2a) indica que para pendientes inferiores al 40% la presencia de regenerado está prácticamente asegurada.

Los dos modelos propuestos para la abundancia de regenerado (densidad superior a 10.000 pies/ha) ratifican la significación negativa de la pendiente e incluyen las variables *profundidad de suelo efectivo* (Prof) y *cobertura de matorral competidor* (Cob). El sentido de los signos responde al comportamiento observado en campo y a referencias anteriores para la regeneración de *P. pinaster* (FERNANDES & RIGOLOT, 2007). Los modelos son más ajustados, aunque con la misma capacidad de predicción del 75%. El punto de corte para un óptimo de casos correctamente clasificados, es de 0,55 (modelo 2, con tres variables) y 0,60 (modelo 3, con dos variables), ya que la variable dependiente está más equilibrada (25 casos $p=0$; 27 casos $p=1$). En el caso del modelo 3, que sólo depende de variables fisiográficas (Pend) y de sitio (Prof),

	Variables independientes	Media	Error estándar (s.e.)	Rango
Fisiografía	Altitud (m)	696,61	30,61	560,00-900,00
	Pendiente local (%)	31	4,28	13,00-62,00
Características de la subparcela	Cobertura capa LFH (%)	44,19	7,91	5,75-96,25
	Espesor capa LFH (cm)	1,80	0,40	0,20-5,00
	Suelo mineral descubierto (%)	34,03	6,51	3,75-70,00
	Profundidad suelo efectivo (cm)	34,13	3,04	20,50-57,50
Características de la vegetación	Cobertura matorral (%)	56,28	3,82	38,00-80,00
	Altura matorral (cm)	72,82	5,44	42,13-111,14
Variables dependientes				
Características del regenerado de <i>P. pinaster</i>	Densidad (pies.ha ⁻¹)	15.525,90	3.259,47	0,00-44.898,00
	Altura (cm)	47,74	3,84	27,26-68,00
	Diámetro cuello raíz (cm)	0,73	0,06	0,40-1,05

Tabla 2. Variables independientes y dependientes medidas en las subparcelas de muestreo (n=52)

Variable binaria	α	%Correcto	Punto de corte	-2LL	χ^2	Ajuste
Presencia 1= presencia 0= ausencia						
MODELO 1	+6,27 -0,1Pend**	75	0,95	22,97	9,95	Pseudo-R ² (ajust.)=0,18 p=0,007 n = 52 MSE = 0,008 MAE = 0,29
Abundancia 1= más de 10.000 pies.ha ⁻¹ 0= menos de 10.000 pies.ha ⁻¹						
MODELO 2	+3,18 -0,1Pend** -0,1Cob** +0,07Prof**	75	0,55	46,71	25,29	Pseudo-R ² (ajust.)=0,24 p=0,000 n = 52 MSE = 0,03 MAE = 0,40
MODELO 3	+1,27 -0,1Pend** +0,06Prof**	75	0,60	51,18	20,82	Pseudo-R ² (ajust.)=0,20 p=0,000 n =52 MSE = 0,03 MAE = 0,40

Tabla 3. Modelos para la presencia y abundancia de regenerado de *P. pinaster*. El modelo logístico es del tipo $P = 1/(1+e^{-x})$. Se muestran las variables que resultaron significativas ** al 95%. Se muestran también el porcentaje máximo de casos clasificados correctamente (%Correcto) para su correspondiente punto de corte y los parámetros de ajuste y errores de cada modelo (Pend=Pendiente local en porcentaje; Cob= Cobertura de matorral en porcentaje; Prof=Profundidad de suelo efectivo en cm)

podría ser de utilidad para la gestión, ya que son variables frecuentemente utilizadas por los servicios forestales para planificar sus actuaciones

y sus predicciones serían independientes de la competencia ejercida por la vegetación. La representación gráfica del modelo 3 (Figura 2b)

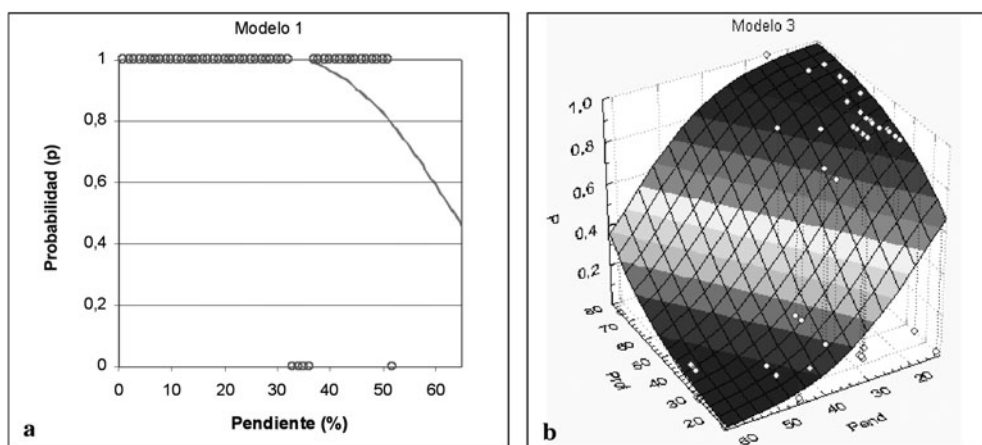


Figura 2. Representación gráfica de los modelos logísticos para la presencia y abundancia de regenerado de *P. pinaster* en el incendio de Robledillo de Gata: a) Modelo para la probabilidad de presencia de regenerado en función de la pendiente local (modelo 1, tabla 3) b) Modelo para la probabilidad de abundancia de regenerado (>10.000 pies.ha⁻¹) en función de la pendiente local (Pend) y la profundidad de suelo efectivo (Prof) (modelo 3, tabla 3)

predice la abundancia de regenerado (más de 10.000 pies.ha⁻¹) con probabilidades superiores al 80%, en aquellos sitios que tengan menos del 40% de pendiente y más de 30 cm de profundidad de suelo efectivo. Estas zonas son, precisamente, las más fácilmente mecanizables para realizar clareos tempranos que puedan ayudar a dosificar la competencia y así evitar el decaimiento de la masa a medio plazo.

Agradecimientos

El presente estudio ha sido financiado por el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria y cofinanciado con fondos FEDER, a través del proyecto SC-99-018-C2, dentro de la acción “Recursos y Tecnologías Agrarias” del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica. Dicho proyecto ha sido llevado a cabo de manera coordinada entre el Departamento de Protección Forestal del CIFOR-INIA (Ministerio de Educación y Ciencia) y el Departamento de Protección Ambiental del CIIA-Lourizán (Xunta de Galicia).

BIBLIOGRAFÍA

- ALÍA, R.; MARTÍN, S.; DE MIGUEL, J.; GALERA, R.; AGÚNDEZ, D.; GORDO, J.; SALVADOR, L.; CATALÁN, G. Y GIL, A.; 1996. *Regiones de procedencia Pinus pinaster Aiton*. Dirección General de Conservación de la Naturaleza. Madrid.
- FERNANDES, P.M & RIGOLOT, E.; 2007. The fire ecology and management of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Forest Ecol. Manage.* 241: 1-13
- MADRIGAL, J.; HERNANDO, C.; GUIJARRO, M.; DíEZ, C. Y JIMÉNEZ, E.; 2006. Distribución de biomasa y fijación de carbono tras clareos mecanizados intensos en regenerado post-incendio de *P. pinaster* Ait (Monte “Fraguas”, Guadalajara, España). *Inv. Agrar; Sist. Rec. For.* 15(2): 231-242.
- MADRIGAL, J.; HERNANDO, C.; MARTÍNEZ-HERRANZ, E.; GUIJARRO, M. Y DíEZ, C.; 2005. Regeneración post-incendio de *Pinus pinaster* Ait.: modelos descriptivos de los factores influyentes en la densidad inicial y la supervivencia. *Inv. Agrar; Sist. Rec. For.* 14(1): 36-51.
- TAPIAS, R.; CLIMENT, J.; PARDOS, J.A. & GIL, L.; 2004. Life histories of mediterranean pines. *Plant Ecology* 171: 53-68.
- VEGA, J.A.; HERNANDO, C.; MADRIGAL, J.; PÉREZ-GOROSTIAGA, P.; GUIJARRO, M.; FONTURBEL, T.; CUIÑAS, P.; MARTÍNEZ, E. Y FERNÁNDEZ, C.; 2005. Regeneración de *Pinus pinaster* Ait. tras incendios forestales y medidas selvícolas para favorecerla. *En: S.E.C.F.-Gobierno de Aragón (eds.), IV Congreso Forestal Español. Resúmenes, Conferencias y Ponencias.* CD-ROM. Imprenta Repes. S.C. Zaragoza.