

MODELO DE SIMULACIÓN FORESTAL DE REGENERACIÓN DE *PINUS NIGRA*

Roberto Molowny Horas¹, Lluís Comas Boronat¹ y Javier Retana Alumbrosos²

¹ CREAM (Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales), Universidad Autónoma de Barcelona. 08193-BELLATERRA (Barcelona-España). Correo electrónico: roberto@creaf.uab.es, l.comas@creaf.uab.cat

² CREAM (Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales) y Unidad de Ecología, Departamento de Biología Animal, Biología Vegetal y Ecología, Universidad Autónoma de Barcelona. 08193-BELLATERRA (Barcelona-España). Correo electrónico: javier.retana@uab.es

Resumen

Se ha desarrollado un modelo de simulación forestal con el que predecir la regeneración de *Pinus nigra* en zonas quemadas a partir de los bordes del área no quemada. El algoritmo trabaja sobre una distribución espacial arbitraria en 2 dimensiones, en la que se pueden definir zonas quemadas, bosques y zonas con otras cubiertas (p.ej. urbanas). Los diferentes procesos que afectan los estadios de semilla, plántula y árbol (germinación, establecimiento, crecimiento, mortalidad...) se han calculado a partir de datos empíricos derivados de experimentos de campo o bases de datos forestales. Se ha hecho hincapié en el desarrollo de un algoritmo de dispersión abiótica que distinguiera entre bosque cerrado y abierto, lo que nos ha permitido proponer escenarios de regeneración simulados que pudieran ser calibrados con datos empíricos. Finalmente, se ha realizado una simulación de regeneración de una zona quemada a partir de una zona contigua no afectada por el fuego y se han llevado a cabo estimaciones numéricas de diferentes parámetros característicos (por ejemplo, velocidad de regeneración y evolución temporal del área basal total por hectárea en el área quemada) a partir de los resultados de la simulación.

Palabras clave: *Simulación, Regeneración, Pinus nigra, SIG, Dispersión de semillas, Incendios*

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En este trabajo presentamos el diseño y construcción de un modelo semi-estocástico de simulación 2D con el fin de evaluar la regeneración de *Pinus nigra* en zonas quemadas a partir de los bordes no quemados. El modelo integra los mecanismos demográficos que afectan a la dinámica y permite el estudio de la evolución espacial y temporal del reclutamiento de la especie.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO

En la figura 1 se muestra de forma resumida los diferentes procesos y pasos incluidos en

el modelo de simulación. El diseño modular permite añadir nuevos procesos, así como mejorar los ya existentes, de manera más rápida y sencilla.

a) Mapas de distribución espacial

Tanto la distribución espacial inicial de árboles y plántulas como los resultados intermedios y finales del modelo se proporcionan en mapas digitales 2D en formato SIG Miramon, aunque los algoritmos de la simulación están escritos en Visual Basic. Gracias al uso de un SIG es posible incluir fácilmente información espacial predeterminada en diferentes escenarios (incendios, repoblaciones o plantaciones...) durante la ejecución de la simulación.

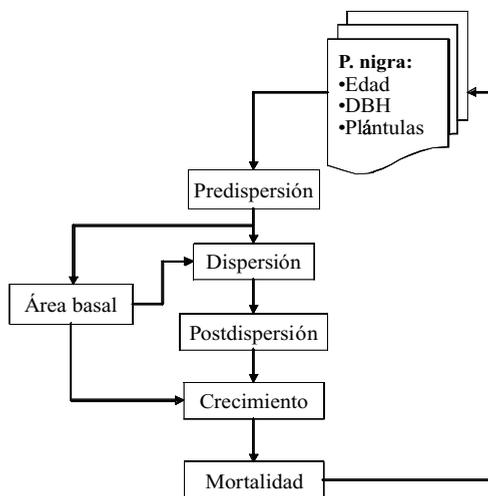


Figura 1. Pasos del modelo de simulación

El modelo asume la presencia de un solo árbol en cada píxel. En cada paso temporal (=1 año) se producen 3 mapas SIG que contendrán, en cada píxel, la edad (hasta 255 años, a partir de la cual suponemos que tanto producción de piñas como crecimiento o normalidad dejan de depender de la edad) y el diámetro normal (medido a 1,3 m de altura) de cada árbol, así como la distribución de plántulas de 1 a 10 años. Como tamaño espacial de cada píxel cuadrado se ha escogido 2m x 2m (ó 2 x 2 m²), que da una densidad máxima de 2.500 árboles por hectárea.

Hemos establecido una serie de reglas para evaluar la regeneración a partir de la dispersión de semillas. A partir de datos de campo y de laboratorio propios se ha observado que las plántulas de *P. nigra* necesitan aproximadamente 10 años para alcanzar una altura de 1,3 m. Por tanto, en el modelo una plántula puede alcanzar un máximo de 10 años, a partir del cual se elimina del mapa de plántulas y pasa a ocupar el píxel correspondiente en el mapa de árboles, si es que ese mismo píxel no está ya ocupado por otro árbol. Por otra parte, el número de plántulas de *P. nigra* se ha limitado a 100 por píxel. Una plántula sólo podrá, al cabo de 10 años, convertirse en árbol en el píxel que ocupa si ha sobrevivido esos 10 años y si no existe un árbol en ese píxel.

b) Procesos predispersivos

La producción de piñas de cada árbol se evalúa estocásticamente a partir de un conjunto de tablas de datos de producción de piñas obtenidos por (ORDÓÑEZ, 2004). La clase diametral de cada árbol determina la tabla de producción utilizada, de tal manera que a árboles mayores corresponderá, en general, un mayor número de piñas. Por otra parte, con el fin de poder introducir variabilidad temporal (vecería) en esa misma producción se han utilizado 5 conjuntos de tablas pertenecientes a 5 años de producción distintos (ORDÓÑEZ, 2004). Asimismo el modelo evalúa estocásticamente los procesos de depredación de piñas en el árbol y de producción de piñones en cada piña.

c) Dispersión de piñones

La dispersión de piñones puede ocurrir bien dentro de un bosque denso, en el que la ausencia de fuertes corrientes de aire limita la caída de las semillas a las zonas más próximas al árbol fuente, o bien en campo abierto o en un bosque ralo, en el que el viento podrá previsiblemente desplazar los piñones hasta distancias notables (NATHAN et al., 2002). En el caso del *P. nigra* estas distancias pueden ser del orden de 100 m o más (ORDÓÑEZ, 2004).

Como curva de dispersión en bosque abierto o zonas despejadas se ha utilizado la calculada

por ORDÓÑEZ (2004) para semillas de *P. nigra* en una zona quemada. Para calcular la curva de dispersión en bosques densos hemos utilizado cálculos similares realizados por otros autores (NATHAN *et al.*, 2001) para *P. halepensis*, cuyas semillas son morfológicamente similares a las de *P. nigra*. Si asumimos que las semillas de *P. nigra* se dispersan igual que las de *P. halepensis*, podemos deducir una curva de dispersión en bosque denso para la primera especie a partir de la segunda. En la figura 2 se muestra el resultado de estos cálculos. La curva de dispersión en bosque cerrado es notablemente más corta que la dispersión en zonas abiertas, por lo que jugará un papel menor en la determinación de la dispersión de semillas a media y larga distancia en la zona quemada.

A partir de medidas de área basal en una ventana 2D determinada, el algoritmo determina qué tipo de dispersión se deberá aplicar: un área basal alta implica un bosque denso y viceversa. A continuación se efectúa una convolución en 2 dimensiones sobre la imagen SIG de semillas producidas con un filtro espacial que calcula la dispersión de semillas de acuerdo al área basal local.

d) Procesos post-dispersivos

El modelo evalúa estocásticamente los procesos post-dispersivos (depredación de semillas en el suelo, germinación, supervivencia y establecimiento de plántulas) a partir de distribuciones experimentales (véase ORDÓÑEZ, 2004 y ORDÓÑEZ *et al.*, 2006).

e) Mortalidad de árboles

Los árboles tienen una probabilidad anual baja pero constante de mortalidad (SHUGART, 1984)

f) Crecimiento arbóreo

El crecimiento radial máximo se calcula a partir de datos dendrocronológicos, y se verá limitado por la competencia ejercida por árboles vecinos según el área basal local, tal y como se ha explicado anteriormente.

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

a) Validación

La validación se ha llevado a cabo comparando la densidad de plántulas de todas las edades calculadas por el modelo con los datos obtenidos a partir de medidas de campo. Estos datos experimentales de densidad de plántulas se midieron en transectos de 100 m de largo y 15 de ancho en zonas del gran incendio del Bages-Berguedà (Barcelona) de 1994. En la figura 3 se muestra la comparación entre ambos conjuntos de datos. Las plántulas supervivientes se han contado en intervalos de 10 m desde el borde del bosque no quemado, y se han añadido barras de $\pm 1\sigma$. En todos los casos, salvo para distancias mayores de 80 m, la distribución calculada de plántulas simula adecuadamente los datos observados. Para distancias mayores, el modelo sobreestima el número de plántulas.

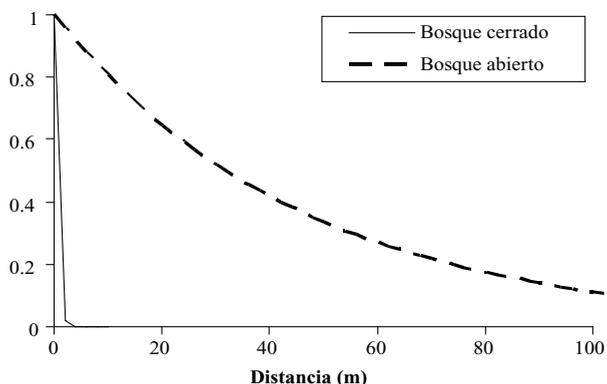


Figura 2. Probabilidad de dispersión de semillas de *P. nigra*, en bosque abierto y en bosque denso, utilizadas en el modelo. Para facilitar la comparación, se han normalizado las 2 curvas, asignando probabilidad 1 a la dispersión a 0 m

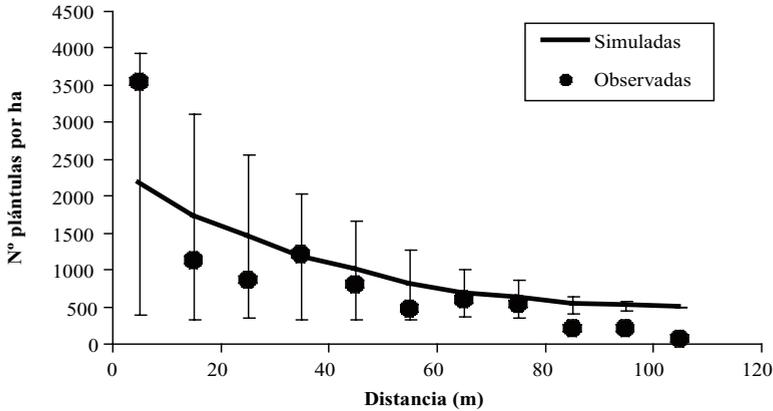


Figura 3. Número simulado y observado de plántulas establecidas en la zona quemada. Se han incluido barras de error para la simulación de $\pm 1\sigma$

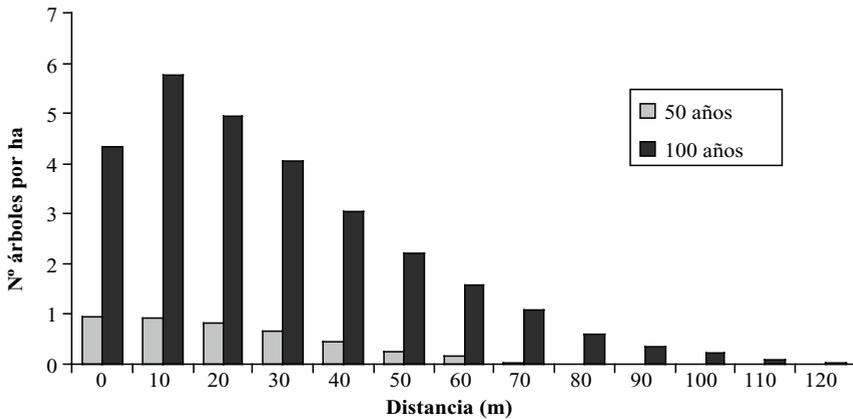


Figura 4. Densidad simulada de plántulas regeneradas en una zona quemada a partir del borde no quemado

b) Regeneración de una zona quemada circular

Se ha simulado la regeneración de una zona circular quemada a partir de los bordes no quemados. Para ello hemos creado un mapa SIG del bosque en el que se ha incluido una zona completamente limpia de 2000 m de diámetro (superficie de 314 ha). Se ha ejecutado el modelo de simulación durante 50 y 100 años y se ha medido el número de árboles (con diámetro mayor de 5 cm). Como se aprecia en la figura 4, el número de pies en la zona quemada es muy bajo, incluso después de 100 años desde el incendio.

CONCLUSIONES

La comparación con resultados de campo confirma la capacidad del modelo de simular adecuadamente el reclutamiento de plántulas de *P. nigra* en zonas quemadas. El modelo permite evaluar la evolución a largo plazo de la capacidad de regeneración del *P. nigra* en zonas quemadas. Potencialmente el modelo ofrece la capacidad de añadir otras especies de difícil regeneración (p.ej. *P. sylvestris*) así como especies con algún mecanismo de adaptación al fuego (p.ej. *P. halepensis*, *Q. ilex*).

El algoritmo calcula satisfactoriamente el número de plántulas establecidas a diferentes

distancias del borde quemado. Tan sólo a distancias máximas se aprecia discrepancias entre valores simulados de plántulas y valores observados. En cuanto a la presencia de árboles maduros en la zona quemada, por otra parte, el modelo requiere de una comparación más extensa con valores de campo para poder validar estos resultados. Sin embargo, nuestros resultados concuerdan bien con otros estudios de campo o simulaciones (véase, por ejemplo, una simulación de regeneración a 30 años de un bosque de *P. nigra* en RODRIGO et al., 2004).

BIBLIOGRAFÍA

- NATHAN, R.; HORN, H.S.; CHAVE, J. & LEVIN, S.; 2001. Mechanistic models for tree seed dispersal by wind in dense forests and open landscapes. In: D.J. Levey, W.R. Silva & M. Galleta (eds.), *Seed Dispersal and Frugivory: Ecology, Evolution and Conservation*: 69-82. CAB International Press. Oxfordshire.
- NATHAN, R.; KATUL, G.G.; HORN, H.S.; THOMAS, S.M.; OREN, R.; AVISSAR, R.; PACALA, S.W. & LEVIN, S.A.; 2002. Mechanisms of long-distance dispersal of seeds by wind. *Nature* 418: 409-413.
- ORDÓÑEZ, J.L.; 2004. *Análisis y modelización del reclutamiento de Pinus nigra después de grandes incendios*. Tesis Doctoral. Universitat Autònoma de Barcelona. Barcelona.
- 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(3-4): 405-417.
- RODRIGO, A.; RETANA, J.; & PICÓ, F.X.; 2004. Direct regeneration is not the only response of Mediterranean forests to large fires. *Ecology* 85(3): 716-729.
- SHUGART, H.H.; 1984. *A Theory of Forest Dynamics: The Ecological Implications of Forest Ecological Models*. Springer-Verlag. New York.