

Modelo de ciclo forestal para la gestión sostenible de los bosques de *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* deducido a partir de datos dendrocronológicos

P.A. Tíscar^{1,*}

(1) Centro de Capacitación y Experimentación Forestal, Vadillo-Castril s/nº 23470 Cazorla, Jaén.

* Autor de correspondencia: P.A. Tíscar [pedroa.tiscar@juntadeandalucia.es]

> Recibido el 13 de febrero de 2015 - Aceptado el 08 de junio de 2015

Tíscar, P.A. 2015. Modelo de ciclo forestal para la gestión sostenible de los bosques de *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* deducido a partir de datos dendrocronológicos. *Ecosistemas* 24(2): 30-36. Doi.: 10.7818/ECOS.2015.24-2.05.

El artículo propone un modelo de ciclo forestal con cinco fases: innovación, agregación temprana y tardía, biostática y degradación, para los bosques de pino salgareño (*Pinus nigra* subsp. *salzmannii*). Las fases se caracterizaron con información dendrocronológica obtenida en 78 árboles muestreados a lo largo de un transecto de 10 x 680 m² localizado en la sierra de Cazorla (sureste de España). Sobre este transecto, se describió también la estructura forestal y el modo de regeneración de *Pinus nigra*. Se observó una gran heterogeneidad estructural a pequeña escala y que la regeneración puede ocurrir en modo de fase de claro. Las fases finales del ciclo se caracterizaron con menos exactitud que las iniciales, probablemente, debido a cambios en la densidad de árboles a lo largo de la historia forestal del bosque estudiado. El ciclo forestal propuesto se definió para una duración de 500 años y una superficie mínima de equilibrio de 20 hectáreas. Estos datos son de interés para la gestión forestal sostenible de los bosques de pino salgareño.

Palabras clave: régimen de perturbaciones; dinámica forestal; estructura forestal; regeneración en fase de claro; dendroecología

Tíscar, P.A. 2015. Model of forest cycle for the sustainable management of *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* obtained from dendrochronological data. *Ecosistemas* 24(2): 30-36. Doi.: 10.7818/ECOS.2015.24-2.05.

The article proposes a model of forest cycle for pinewoods of Spanish black pine (*Pinus nigra* subsp. *salzmannii*). Five developmental phases were defined: innovation, early aggradation, late aggradation, biostatic and degradation. Phases were characterized from dendrochronological data obtained from 78 trees sampled in a 10 x 680 m² transect located in Cazorla mountain range (SE Spain). Forest structure and *Pinus nigra* regeneration mode were also described from this transect. A high structural heterogeneity was observed at small scale. Pine regeneration was observed to occur according to the gap-phase regeneration mode. Late phases of the forest cycle were characterized with less exactness than the initial ones, probably because of changes in tree density during the forest history. The length of the proposed model of forest cycle was estimated as 500 years and the minimum equilibrium area as 20 hectares. These data are of interest for the sustainable management of *Pinus nigra* forests.

Key words: disturbance regime; forest dynamics; forest structure; gap-phase mode of regeneration; dendroecology

Introducción

En un conocido trabajo de la historia de la ecología vegetal, [Watt \(1947\)](#) observó que el bosque se compone de un mosaico de teselas interrelacionadas espacial y temporalmente, cada una de las cuales podría asignarse a una fase concreta de desarrollo dentro de un ciclo forestal o secuencia ordenada de fases. Cada ciclo se iniciaría con la ocurrencia de una perturbación que, derribando parte de los árboles preexistentes, abriría un claro en el dosel forestal (fase destructiva) favoreciendo el establecimiento de nuevos árboles o regenerados (fase pionera). Los regenerados crecerían hasta alcanzar un tamaño máximo (fase constructiva) y permanecerían en una situación de estabilidad (fase madura) hasta el reinicio del ciclo por una nueva perturbación. El proceso implicaría que cada tesela individual acumula o pierde biomasa según la fase del ciclo, mientras que la cantidad total de biomasa oscila alrededor de un valor medio a una escala mayor, es decir, existiría un estado de equilibrio conformado por un mosaico cambiante de teselas a la escala del paisaje ([Bormann y Likens 1979](#)). La extensión superficial

mínima (superficie mínima de equilibrio, SME) que contiene un mosaico cambiante de teselas en estado de equilibrio podría utilizarse como referencia para diseñar reservas forestales ([Peterken 1996](#)) o para orientar la gestión de los bosques explotados ([Bormann y Likens 1979](#)). El modelo de ciclo forestal de [Watt \(1947\)](#), o sus versiones modificadas, se ha utilizado para describir la dinámica forestal de bosques boreales y templados ([Koop y Hilgen 1987](#); [Wissel 1992](#); [Bormann y Likens 1979](#)), pero, hasta donde yo sé, no se ha empleado en bosques mediterráneos. En este estudio, se propone un modelo de ciclo forestal para los bosques mediterráneos de pino salgareño (*Pinus nigra* subsp. *salzmannii* (*Pinus nigra* en adelante)), ampliamente extendido por las montañas calcáreas orientales de la península ibérica.

Los bosques de pino salgareño constituyen frecuentemente la vegetación climática o potencial en su área de distribución actual, ya que los condicionantes ecológicos de la montaña calcárea mediterránea favorecen a los pinos en detrimento de las especies arbóreas frondosas ([Blanco et al. 1998](#)). Estos pinares tienden a conformar bosques monoespecíficos y, dada su condición climá-

cica, no es de esperar que se produzcan en ellos cambios debidos a la sucesión vegetal. Diferentes estudios palinológicos (Carrión et al. 2001) y documentos históricos (Gil 2008) muestran que el pino salgareño ha poblado sus localidades actuales durante un tiempo mayor que la longevidad de la especie y que sus comunidades presentan, consecuentemente, un estado de equilibrio composicional (Veblen 1992). Esta dinámica autosucesional se mantendría, por otro lado, gracias a un modo de regeneración en fase de claro (sensu Veblen 1992), ya que los individuos jóvenes de *Pinus nigra* son tolerantes a la sombra (Tíscar y Linares 2014) y el reclutamiento de nuevos ejemplares está determinado por la ocurrencia de perturbaciones poco intensas. Estas perturbaciones abrirían claros en el dosel forestal tras provocar la muerte de árboles individuales o grupos de ellos (Tíscar et al. 2015, en prensa). Todas estas características contribuyen a que los bosques de *Pinus nigra* resulten adecuados para la definición en ellos de un modelo de ciclo forestal propio.

Los modelos de ciclo forestal han adquirido cierta presencia durante las últimas décadas debido a su interés para la gestión forestal sostenible (Schnitzler y Borlea 1998, Bobiec et al. 2000; Emborg et al. 2000). Concretamente, las características del mosaico cambiante de teselas en un bosque dado reflejan las pautas temporales de ocurrencia de perturbaciones y, si esta distribución se estudia en bosques vírgenes, es posible extraer información sobre el régimen natural de perturbaciones. El conocimiento sobre el régimen natural de perturbaciones es necesario para orientar la gestión forestal y asegurar el mantenimiento de la biodiversidad en los bosques explotados (Seymour y Hunter 1999). Los bosques de la región mediterránea han sido alterados durante milenios y ya no existen bosques vírgenes (Blanco et al. 1998). Sin embargo, las características básicas del mosaico cambiante de teselas pueden deducirse, conociendo la duración promedio del ciclo forestal y la extensión temporal de cada una de las fases que lo componen (Emborg et al. 2000). El presente estudio muestra que dichas características básicas pueden inferirse mediante la utilización de métodos dendroecológicos.

Los objetivos de este estudio fueron (i) comprobar si *Pinus nigra* se regenera en el área de estudio bajo los claros abiertos en el dosel forestal y si su crecimiento se ve rápida y positivamente afectado por una reducción de la competencia, considerando que estos hechos son indicativos de la existencia de una dinámica de regeneración en fase de claro, (ii) proponer un modelo de ciclo forestal para la gestión forestal sostenible de los bosques de *Pinus nigra*, y (iii) comparar la estructura forestal actual observada en un bosque explotado de *Pinus nigra* con la que resultaría de aplicar el modelo de ciclo forestal.

Material y métodos

Métodos de campo y de laboratorio

Los datos se obtuvieron en una masa forestal monoespecífica de *Pinus nigra* (ca 107 ha) localizada en un lugar conocido como "Cañada del Espino" en la sierra de Cazorla (SE de España, 37° 55' N y 2° 53' O, 1500 m s.n.m.). El área ha sido intensamente aprovechada para obtener madera según las prescripciones del tratamiento selvícola general de la entresaca regularizada. En ambos lados de la cañada, se replanteó un transecto rectangular conformado por la sucesión de 68 parcelas de 10x10 m² de extensión (29 parcelas en una ladera y 39 parcelas en la ladera opuesta). Este tamaño de parcela se consideró suficiente para contener la copa completa de los pinos de mayor tamaño presentes en la zona de estudio (Oldeman 1990).

Dentro de las 68 parcelas, se midieron los diámetros normales (a 1.30 m de altura) de todos los árboles presentes. También se midió el diámetro normal (dos medidas en cruz) y la altura total de dos árboles por parcela: el dominante en el espacio ocupado por la parcela y el más cercano al centro de la misma con una altura mayor de 2 m, independientemente de que el eje de estos árboles estuviera localizado dentro de los límites de la parcela o no. La

muestra resultante no incluyó árboles de aspecto senescente: gran tamaño, copa coronada, ramas gruesas e inclinadas hacia el suelo, corteza de color gris-ceniciento (correspondientes a la fase madura del ciclo forestal de Watt (1947)), por lo que éstos se buscaron por el entorno de la Cañada del Espino. Se localizaron un total de 10 árboles de aspecto senescente. Así, se pudo completar una muestra de 146 medidas pareadas de altura y diámetro. A estos 146 árboles, se les tomaron también dos medidas perpendiculares del espesor de la corteza para calcular su diámetro sin corteza. Finalmente, los 68 árboles dominantes asociados a parcelas de muestreo y los 10 de aspecto senescente se perforaron con una barrena de Pressler en dirección paralela a la curva de nivel para extraer un tarugo de madera por árbol.

Con el objeto de dimensionar los claros de bosque en donde *Pinus nigra* establece sus regenerados, se midieron las superficies de los pimpollares interceptados por el transecto de muestreo (10 en total) y las superficies de los claros asociados a ellos. Las superficies de cada claro y pimpollar se determinaron por el método planimétrico de radiación (Dominguez 1993). Para ello, se hizo estación en un punto centrado del pimpollar y, desde esta posición, se midieron los rumbos al tronco de los árboles que delimitaban el claro y dos distancias horizontales por cada árbol: la distancia hasta el borde del pimpollar y, continuando la medida, la distancia hasta el eje del tronco del árbol. Las distancias se midieron en metros con cinta métrica y los rumbos en grados con brújula de mano. Así, cada dos árboles consecutivos del borde del claro, quedaron delimitados dos triángulos cuya superficie es:

$$\text{Superficie} = \frac{R_n \times R_{n+1} \times \text{sen } \alpha}{2}$$

donde R_n y R_{n+1} son los radios o distancias medidas desde el centro del pimpollar hasta su borde o hasta los troncos de dos árboles consecutivos (según se quiera calcular la superficie del pimpollar o del claro) y α es el ángulo que existe entre los dos radios (se calcula como la diferencia entre los dos rumbos medidos). La superficie total de cada claro y pimpollar se obtuvieron sumando las superficies de los sucesivos triángulos que los componían (Fig. 1).

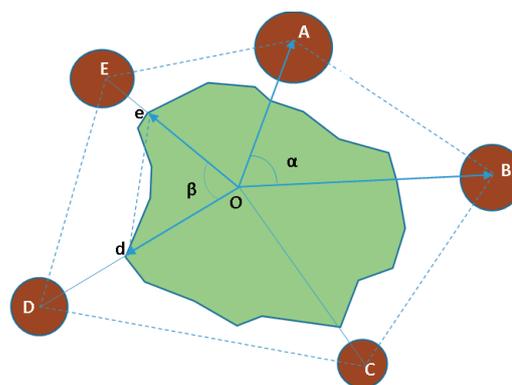


Figura 1. Representación esquemática de un claro de bosque delimitado por los troncos de 5 árboles (círculos A-E). El claro contiene un pimpollar (mancha de color verde). La superficie del claro se pueden triangular o descomponer en triángulos con vértices en el centro del pimpollar (O) y en los ejes de cada tronco. El área ocupada por el triángulo OAB forma parte del claro y está definida por las distancias OA, OB y por el ángulo α . El área ocupada por el triángulo Ode forma parte del pimpollar y está definida por las distancias Od, Oe y por el ángulo β (ver texto).

Figure 1. Plan showing the polygon constructed by drawing a line connecting the boles of 5 canopy trees (circles A-B) bordering a hypothetical forest gap. The green mark is the patch occupied by saplings growing within the gap. The polygon can be divided into triangles with a common vertex (O) located near the center of the gap. The triangle OAB is part of the forest gap. Its area can be calculated from the distances OA and OB, and the angle α . The triangle Ode is part of the sapling patch. Its area can be calculated from the distances Od and Oc, and the angle β (see text).

Finalmente, de entre los 10 claros planimetrados, se escogieron un total de 72 pimpollos intentando cubrir el rango de alturas existente hasta poco más de los 2 m (ver la definición de la *fase innovación* más adelante). Estos árboles se cortaron a ras del suelo y, una vez apeados, se les midió la longitud total y se les cortó una sección transversal de la base del tronco para determinar su edad.

Los tarugos extraídos con la barrena de Pressler se dejaron secar a temperatura ambiente en el laboratorio, antes de montarlos sobre un soporte de madera y lijarlos con papel de lija de grano sucesivamente más fino. La datación de los anillos anuales de crecimiento se realizó de manera visual con la ayuda de una lupa. La anchura de los anillos de crecimiento se midió con una precisión de 0.01 mm, utilizando un equipo de medida Velmex TA montado bajo una lupa binocular. La calidad de la datación se comprobó con el programa COFECHA (Holmes 1983). Diez de las series de anillos de crecimiento no se pudieron datar o sincronizar correctamente, en consecuencia, los análisis dendrocronológicos se realizaron con un total de 68 series.

Modelo de ciclo forestal y métodos dendroecológicos

El modelo de ciclo forestal propuesto se basa en una versión modificada del ciclo de Watt (1947) propuesta por Oldeman (1990). Este modelo ha sido frecuentemente utilizado en los estudios sobre dinámica forestal (Bobiec et al. 2000; Emborg et al. 2000) y consta de las fases siguientes: innovación, agregación, biostática y degradación. El claro de bosque sobre el que se inicia el ciclo en un lugar dado se denomina, en este modelo, eco-unidad. Esta se define como la superficie ocupada por el mismo conjunto de árboles mientras dura el ciclo, desde que se establecen como regenerados hasta que son reemplazados por árboles nuevos al iniciarse un nuevo ciclo (Oldeman 1990). Las eco-unidades pasan por las diferentes fases mencionadas antes y presentan unas características específicas e identificables en el campo. Conocidas la autoecología e historia forestal de los bosques de *Pinus nigra*, las fases del ciclo forestal pueden describirse del siguiente modo (Fig. 2):

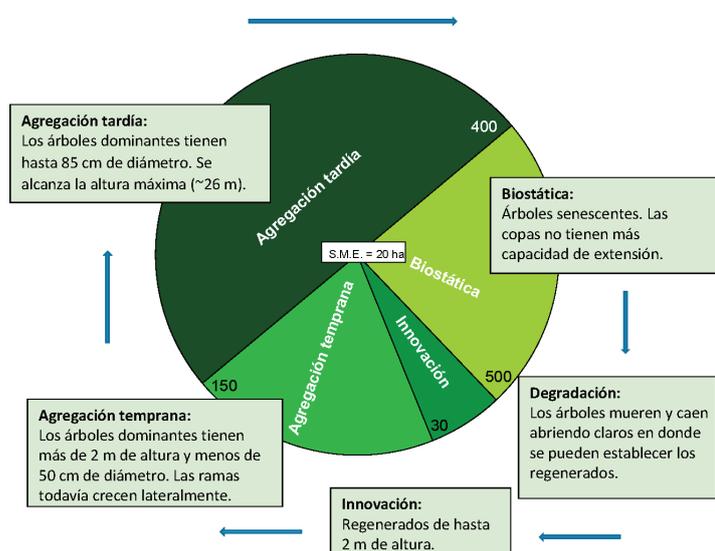


Figura 2. Modelo de ciclo forestal para bosques de *Pinus nigra* en el espacio y el tiempo con indicación de las fases que lo componen y los criterios utilizados para definirlos. Los sectores del gráfico circular son proporcionales a la representación superficial de cada fase en el ciclo. Los números indican los años transcurridos desde el inicio del ciclo. S.M.E. = Superficie Mínima de Equilibrio.

Figure 2. Model of the forest cycle for *Pinus nigra* forests over space and time. The phases are defined by measurable criteria, as indicated in the boxes. The pie chart shows the fraction of the minimum equilibrium area (S.M.E.) occupied by each phase in the cycle. Numbers indicate years from start of the cycle.

- Fase de innovación.** Se inicia cuando los regenerados de *Pinus nigra* se establecen en un claro de bosque. Está constituida por árboles de hasta 2 m de altura. Esta altura es suficiente para evitar los daños serios por herbivoría, que tan frecuentemente provocan los ungulados silvestres y/o el ganado doméstico en los montes mediterráneos (Baraza 2005).
- Fase de agregación temprana.** Va desde el fin de la fase de innovación hasta que los árboles tienen 50 cm de diámetro normal. Este tamaño fue utilizado como criterio de corta para la realización de los aprovechamientos madereros en la sierra de Cazorla durante la mayor parte del siglo XX (Tíscar et al. 2015, en prensa). Sin embargo, los pinos de este tamaño suelen ser todavía vitales y sus ramas se alargan lateralmente cuando se genera espacio de crecimiento.
- Fase de agregación tardía.** Comienza cuando los árboles alcanzan los 50 cm de diámetro y termina cuando culmina su crecimiento en altura.
- Fase biostática.** Esta fase se inicia después de que haya culminado el crecimiento en altura. Durante esta fase, los árboles van adquiriendo el aspecto de senescentes: además de presentar un gran tamaño y de tener la copa coronada, la corteza se torna de color gris-ceniciento, a menudo con señales de pudrición en el tronco, y las ramas se tienden hacia el suelo.
- Fase degradación.** Se refiere al momento en que se abren claros permanentes por la muerte de árboles individuales o en grupo, ya que el espacio vacío resultante no puede cerrarse mediante el crecimiento de las ramas de los árboles vecinos. Esta situación se da cuando los árboles vecinos son también de la fase biostática, o cuando el claro abierto es demasiado amplio.

Así definidas las fases, su duración promedio dentro del ciclo forestal se determinó mediante los procedimientos dendroecológicos siguientes:

- Fase de Innovación.** La duración de esta fase se estimó calculando el tiempo promedio que *Pinus nigra* tarda en alcanzar los 2 m de altura, utilizando la regresión lineal ajustada a los valores edad-altura medidos en los 72 pimpollos cortados. La edad de estos árboles se determinó en el laboratorio con la ayuda de una lupa binocular, contando el número de anillos de crecimiento observados en las secciones de madera preparadas en el campo. El rango de alturas contenidas en la muestra fue de 0.2-2.8 m y el rango de edades 5-38 años. Los parámetros del modelo de regresión ajustado para determinar la duración de esta fase y todos los demás ajustados para el presente estudio se estimaron mediante el método de mínimos cuadrados, utilizando Statgraphics v5.1 (Martín et al. 2011). En todos los casos, se comprobaron diferentes modelos alternativos, seleccionando aquel que proporcionaba el valor más alto del coeficiente de determinación (r^2).
- Fase de agregación temprana.** Los anillos de crecimiento medidos sobre los tarugos de madera se ordenaron según su edad biológica, fechándolos desde la médula hacia la corteza. De esta manera, se determinó cuánto crecen de promedio los *Pinus nigra* durante su primer año de vida (después de alcanzar 1.30 m de altura), cuánto durante el segundo año y sucesivamente. A partir de estos valores, se determinó el diámetro sin corteza para cada edad mediante la representación de un gráfico de valores acumulados de las anchuras medias de los anillos multiplicadas por dos. El diámetro con corteza se obtuvo sumando al valor del diámetro sin corteza el doble del espesor de corteza, calculado mediante la regresión lineal ajustada con los valores pareados espesor de corteza-diámetro sin corteza medidos en la muestra de 146 árboles.
- Fase de agregación tardía.** Se comenzó ajustando una regresión polinómica cuadrática a los 146 datos pareados altura-diámetro. A continuación, se igualó a cero la primera derivada de la función obtenida para determinar la altura máxima que en promedio alcanza *Pinus nigra* en la zona de estudio y el diáme-

tro con corteza que corresponde a esa altura. La edad a la que los árboles alcanzan la altura máxima se determinó examinando la relación edad-diámetro explicada en el apartado anterior.

- (d) *Fase bioestática*. Para estimar la duración de esta fase, se acudió a estudios previos, que asignan a *Pinus nigra* una longevidad media de 500-600 años (Blanco et al. 1998).
- (e) *Fase degradación*. Se le asignó una duración variable, pues los árboles de *Pinus nigra* pueden morir bien en poco tiempo o tras un período largo de decaimiento progresivo (observación personal).

Una vez determinada la duración temporal de cada fase, la representatividad espacial actual de cada fase (estimada en tanto por ciento) se determinó a partir de los datos observados en las 68 parcelas de muestreo, asignando a cada parcela la fase que correspondería al árbol de mayor diámetro muestreado en su interior. También se caracterizó la heterogeneidad microestructural de la masa forestal estudiada, estableciendo para cada parcela un grado de diferenciación estructural conforme a la siguiente escala, que utilizó el coeficiente de variación (CV) del diámetro de los árboles: $CV \leq 0.05$ diferenciación muy baja, $0.05 < CV \leq 0.15$ diferenciación baja, $0.15 < CV \leq 0.30$ diferenciación moderada, $0.30 < CV \leq 0.60$ diferenciación alta y $0.60 < CV$ diferenciación muy alta (del Río et al. 2003).

Finalmente, se estudió el efecto de las perturbaciones sobre el crecimiento de *Pinus nigra* utilizando dos fuentes de información: datos históricos de realización de cortas madereras en el área de estudio y la información contenida en las series dendrocronológicas. En concreto, calculamos para cada serie el porcentaje de cambio en el crecimiento (PCC) mediante la expresión

$$PCC = \frac{(M2 - M1)}{M1} \times 100$$

donde M1 y M2 son respectivamente la anchura media de los anillos durante la década anterior y posterior. La ocurrencia de liberaciones bruscas del crecimiento radial se asoció con los años cuyo valor del PCC fue mayor del 100%. Los años con un crecimiento menor de 0.5 mm se consideraron como supresiones del crecimiento (Rozas 2001).

Resultados

Modo de regeneración y pautas de crecimiento de *Pinus nigra*

La superficie media de los 10 claros de bosque medidos por presentar pimpollares de *Pinus nigra* fue de 394 ± 386 m² (media \pm desviación típica) y estuvo comprendida entre los 89 m² y los 1387 m² (Tabla 1). Las superficies de los claros y de los pimpollares se correlacionaron positivamente ($R_{\text{Spearman}} = 0.806$; $n = 10$; $p = 0.016$), pero ninguna superficie se correlacionó con el número de pimpollos presentes ($R_{\text{Spearman}} \leq 0.394$; $n = 10$; $p = 0.05$).

La historia de liberaciones y reducciones del crecimiento radial se reconstruyó con las 58 series de anillos de crecimiento procedentes de los árboles muestreados en el transecto. Los árboles de aspecto senescente no se utilizaron en estos cálculos, porque se muestrearon en una zona que no tiene registros de cortas madereras. El área de estudio fue objeto de cortas madereras durante los períodos 1949-1955 (388 árboles que sumaron 943 m³), 1965-1980 (2440 árboles que sumaron 2862 m³) y 1995 (35 árboles que sumaron 50 m³). Estos períodos de perturbación fueron coincidentes tanto con un incremento del porcentaje de árboles que mostraban liberaciones, como con una reducción del porcentaje de árboles que tenían supresiones del crecimiento radial (Fig. 3).

Modelo de ciclo forestal y estructura forestal actual

La Tabla 2 muestra la duración estimada para cada una de las fases que componen el modelo propuesto de ciclo forestal para los bosques de *Pinus nigra*.

Tabla 1. Dimensiones de 10 claros de bosque y de los pimpollares de *Pinus nigra* asociados a ellos.

Table 1. Size of 10 forest gaps and area occupied by the sapling patches associated with them.

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Área del claro (m ²) | 1387 | 157 | 228 | 183 | 382 | 217 | 89 | 210 | 648 | 436 |
| Área del pimpollar (m ²) | 820 | 81 | 71 | 76 | 228 | 77 | 34 | 118 | 259 | 204 |
| Nº regenerados (ind.) | 358 | 187 | 54 | 20 | 35 | 130 | 105 | 79 | 164 | 86 |

Tabla 2. Duración estimada de cada fase del ciclo forestal y porcentaje de la representación superficial actual de cada fase en el bosque de *Pinus nigra* estudiado.

Table 2. Estimated duration of each phase of the forest cycle, and area actually covered by each phase in a *Pinus nigra* managed forest.

| Fase | Duración en modelo | | Superficie en transectos | |
|---------------------|--------------------|-----|--------------------------|------|
| | (años) | (%) | Nº parcelas | (%) |
| Innovación | 30 | 6 | 2 | 3 |
| Agregación temprana | 120 | 24 | 56 | 84.9 |
| Agregación tardía | 250 | 50 | 8 | 12.1 |
| Biostática | 100 | 20 | 0 | 0 |
| Degradación | Variable | - | 0 | 0 |
| Total | 500 | 100 | 66* | 100 |

*En realidad se cartografiaron 68 parcelas, pero dos estuvieron totalmente desprovistas de vegetación arbórea.

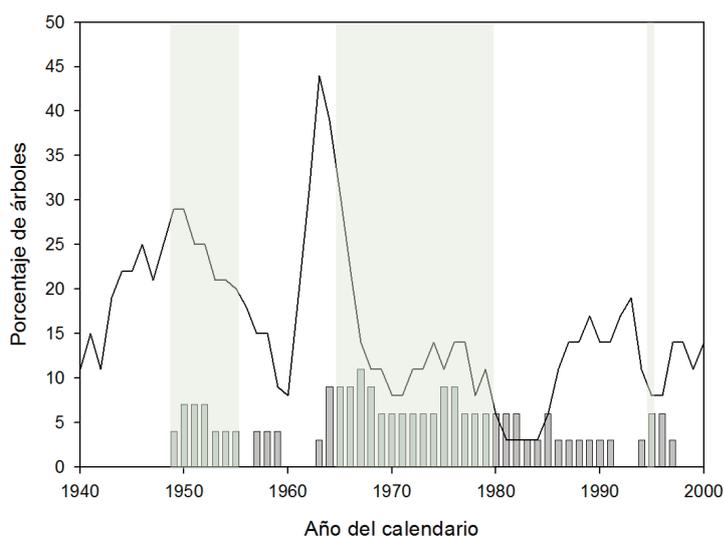


Figura 3. Porcentaje de árboles con liberaciones (columnas) o supresiones (línea) del crecimiento radial. Las zonas sombreadas corresponden a los años de realización de cortas de aprovechamiento maderero.

Figure 3. Percent of trees showing radial growth releases (columns) or suppressed radial growth (line). The shaded intervals correspond to known years of tree harvest operations.

Para la fase de innovación se estableció una duración de 30 años, que es la edad promedio a la que los pinos salgareños alcanzan los 2 m de altura. En concreto, el valor predicho por la regresión ajustada a los datos edad-altura medidos en los 72 pimpollos analizados ($y = 0.679 \cdot x^{0.705}$; $r^2 = 0.75$, $F_{1,70} = 208$, $p < 0.0001$) fue de 28.45 años, siendo [17 – 47] el intervalo de confianza del 95% para dicha estimación.

La **Figura 4** representa la evolución del diámetro sin corteza con la edad, calculado a partir del valor acumulado de las anchuras de los anillos de crecimiento, y del diámetro con corteza. Este último se obtuvo tras sumar al diámetro sin corteza el espesor de corteza estimado mediante un ajuste de regresión de la variable dependiente porcentaje de corteza sobre la variable independiente diámetro sin corteza ($y = 0.579 + 0.113 \cdot \ln(x)$; $r^2 = 0.51$, $F_{1,147} = 152$, $p < 0.0001$). La edad promedio a la que *Pinus nigra* consigue un diámetro con corteza de 50 cm es de 145 años aproximadamente. Por tanto, la fase de agregación temprana tendría una duración de unos 115 años o, redondeando, 120 años. Por su parte, la regresión ajustada para estudiar la relación altura-diámetro en *Pinus nigra* ($y = 1.39 + 0.575 \cdot x - 0.0034 \cdot x^2$; $r^2 = 0.79$, $F_{2,143} = 264$, $p < 0.0001$) presentó un máximo en el punto (85.13, 26.03), indicando que los árboles de esta especie culminan su crecimiento en altura cuando tienen 85 cm de diámetro y alcanzan los 26 m de altura. Estas dimensiones marcan el final de la fase de agregación tardía, pero 85 cm está fuera del rango de diámetros representados en la **Figura 4**. Ahora bien, los 9 árboles muestreados más gruesos (diámetro = 86 ± 8 cm; media \pm desviación típica) presentaron una edad promedio de 383 ± 56 años (media \pm desviación típica). Considerando este dato, a la fase agregación tardía se le asignó una duración de 250 años. El diámetro y la edad de estos árboles no estuvieron correlacionados ($R_{\text{Spearman}} = 0.589$; $n = 9$; $p = 0.094$). A la fase bioestática se le asignó una duración de 100 años, toda vez que este intervalo de tiempo lleva la duración total del ciclo forestal a 500 años, exactamente el límite inferior de la longevidad promedio que se asigna a la especie *Pinus nigra* (Blanco et al. 1998). La fase de degradación quedó consecuentemente solapada entre el final de la fase bioestática y el principio de la fase de innovación. Se le asignó una duración indeterminada, aunque no debe ser muy larga, pues los árboles de *Pinus nigra* pueden morir bien en poco tiempo o tras un período largo de decaimiento progresivo (observación personal). La duración de cada fase y su contribución relativa al ciclo forestal completo aparecen representadas en la **Figura 2**.

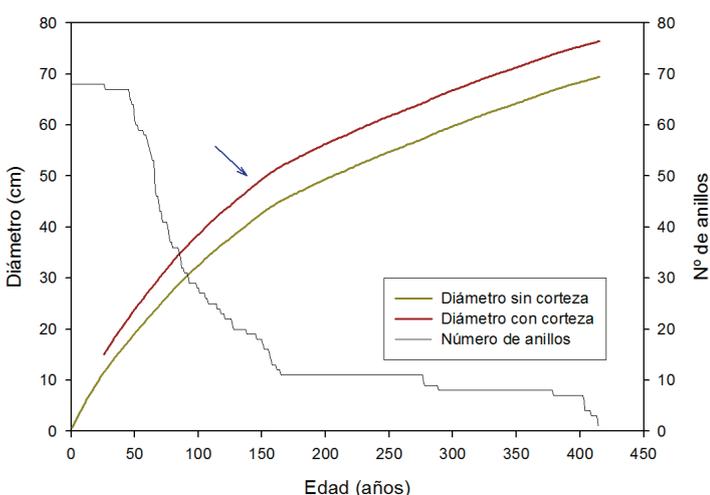


Figura 4. Evolución con la edad de los diámetros medios acumulados con y sin corteza. Se representa el número de anillos utilizados para obtener los valores medios. La flecha indica la transición entre las fases de agregación temprana y tardía.

Figure 4. Changes with age in the accumulated mean diameter with and without bark thickness. The core sample size is also plotted. The arrow indicates the transition between the early and late aggregation phases.

La estructura forestal presentó gran heterogeneidad a pequeña escala: hasta un 55% de las parcelas muestreadas tuvo un grado de diferenciación muy alto (CV del diámetro medido en los árboles de cada parcela > 0.60), y el área basal medida en las sucesivas parcelas que conformaron el transecto de muestreo presentó también una gran variabilidad (**Fig. 5**). De las 68 parcelas incluidas en el transecto, 43 presentaron al menos un individuo juvenil (altura < 2 m), aunque sólo dos de ellas se clasificaron como pertenecientes a la fase de innovación. La comparación entre la representación espacial que correspondería a cada fase (según su duración dentro del ciclo forestal) y la situación actual en la masa forestal estudiada se presentan en la **Tabla 2**.

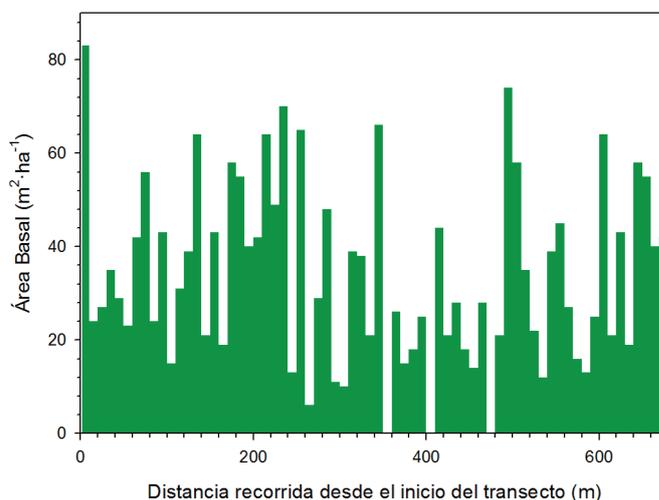


Figura 5. Variación del área basal medida en parcelas de $10 \times 10 \text{ m}^2$ a lo largo de un transecto de $10 \times 680 \text{ m}^2$ en un bosque de *Pinus nigra*.

Figure 5. Variation of stand basal area in plots of $10 \times 10 \text{ m}^2$ along a $10 \times 680 \text{ m}^2$ strip transect in a *Pinus nigra* forest.

Discusión

Uno de los objetivos de este estudio fue comprobar si los regenerados de *Pinus nigra* aparecen asociados a los claros abiertos en el dosel forestal, es decir, si la regeneración ocurre en modo de fase de claro (*sensu* Veblen 1992); este objetivo se consideró como un primer requisito para desarrollar un modelo de ciclo forestal para la especie. La planimetría de los grupos de regenerados o pimpollares mostró que el reclutamiento de nuevos individuos de *Pinus nigra* está asociado a claros de bosque en un determinado rango de superficies (**Tabla 1**). Concretamente, los datos mostraron que los claros de bosque donde se establecen regenerados tienen una superficie promedio de $394 \pm 386 \text{ m}^2$ (media \pm desviación típica), y que los regenerados no se establecen en claros demasiado pequeños ($< 89 \text{ m}^2$). Los claros de mayor extensión con presencia de regenerados tuvieron una superficie equivalente a la de un círculo con un diámetro de aproximadamente 2.5 veces la altura media de los árboles muestreados (altura media \pm desviación típica = $17.13 \pm 7.17 \text{ m}$); cuestión esta que podría utilizarse para guiar la ejecución de tratamientos selvícolas. Los datos indicaron que la regeneración de *Pinus nigra* es, pues, posible en los claros de bosque dentro de un rango de superficies (**Tabla 1**). Sin embargo, un recorrido por el área de estudio mostró que no todos los claros dentro de ese rango de superficies presentan pimpollares (observación personal).

El diseño experimental empleado no fue adecuado para determinar con qué frecuencia los regenerados faltan en los claros de dimensión suficiente, aunque son varios los factores no relacionados con la extensión que pueden influir en la presencia de regenerados dentro de los claros de bosque. Por ejemplo, la disponibilidad de semillas (*Pinus nigra* es una especie vecera), la presencia de hierbas o pinocha sobre el suelo y la interacción de estos factores con la sequía estival (Tíscar y Linares 2011). En cualquier caso, la

relación entre el reclutamiento de *Pinus nigra* y la protección proporcionada por los árboles adultos está bien documentada, y existen amplias observaciones sobre el rango de densidad idóneo para el establecimiento de regenerados, ya sea expresada como área basimétrica o como porcentaje de cobertura (Tíscar y Linares 2014). Los resultados del presente estudio simplemente añaden más evidencia al hecho de que la regeneración de los bosques de *Pinus nigra* ocurre, efectivamente, en el modo fase de claro (Tíscar et al. 2015, en prensa).

Las especies arbóreas que regeneran en fase de claro deben presentar cierta tolerancia a la sombra, como es el caso de *Pinus nigra* (Tíscar y Linares 2014), y ser capaces de acelerar su crecimiento cuando las perturbaciones reducen la competencia con otros árboles (Linares y Carreira 2009). El modelo propuesto de ciclo forestal asume que esto ocurre durante las fases de agregación y los datos mostraron una evidente relación entre la realización de aprovechamientos madereros y el porcentaje de árboles con liberaciones o supresiones del crecimiento (Fig. 3). Por otro lado, los resultados también indicaron que el método dendrocronológico utilizado para la reconstrucción de perturbaciones pasadas es adecuado, aún a pesar de que un umbral del 100% para el PCC puede resultar en un criterio conservador (Rozas 2001). Los métodos dendrocronológicos son igualmente adecuados para la reconstrucción histórica de la ocurrencia de incendios forestales en bosques de *Pinus nigra* (Fulé et al. 2008), aunque las muestras analizadas en el presente estudio no mostraron daños provocados por este tipo de perturbación.

Los modelos de ciclo forestal son representaciones conceptuales de los cambios observados en grupos de árboles que se desarrollan juntos en superficies discretas (eco-unidades en nuestro modelo). Estos cambios son el resultado del crecimiento de los árboles y de las interacciones de competencia que se establecen entre ellos, y ambas materias son objeto de estudio en dendroecología. El presente estudio confirma que los modelos de ciclo forestal pueden construirse a partir de datos dendrocronológicos, aprovechando que el porcentaje del área ocupada por cada fase en los bosques vírgenes es aproximadamente coincidente con el porcentaje de la duración de cada fase en el modelo de ciclo forestal (Emborg et al. 2000). Los métodos dendrocronológicos ofrecen, pues, un procedimiento adecuado para describir modelos de ciclo forestal en los bosques del área mediterránea, donde suelen faltar las masas forestales vírgenes.

Concretamente, la metodología dendrocronológica utilizada en este estudio sirvió para estimar satisfactoriamente la duración de las fases del modelo de ciclo forestal propuesto, pese a la poca extensión superficial del área estudiada, el reducido número de árboles muestreados y la utilización de una única muestra de madera por árbol para medir los anillos de crecimiento. Los estudios dendroecológicos utilizan frecuentemente dos o más muestras por árbol con el objeto de promediar las anchuras de los anillos y, de este modo, eliminar gran parte de la variabilidad debida a la normal excentricidad del tronco de los árboles. Sin embargo, una única muestra por árbol puede ser suficiente para los estudios que no requieren una gran precisión (Woodall 2008). Así, son varios los estudios dendroecológicos recientes que han utilizado una sola muestra por árbol (revisado por Bosela et al. 2014). De entre las diferentes fases del ciclo forestal, la delimitación de la fase biostática fue la única que ofreció cierta dificultad. La tendencia de la gráfica de diámetros acumulados (Fig. 3) sugirió que la duración de la fase biostática debería de ser mayor de la finalmente estimada a partir de los valores de edad y diámetro observados en los árboles más gruesos. Estos resultados podrían explicarse porque la densidad de pinos se ha incrementado progresivamente en la zona de estudio durante el último siglo (Tíscar 2014) y, de este modo, los pinos que en el presente pertenecen a las fases de agregación habrían crecido menos de lo que pudieron crecer en una situación de menor competencia los pinos asignados a la fase biostática. La determinación correcta de las fases biostática y degradación es usualmente difícil, porque los árboles de edad avanzada faltan en la mayoría de los bosques templados con una historia de aprovecha-

miento forestal (Bormann y Likens 1979). Precisamente por ello, las principales conclusiones aplicadas a la gestión forestal del presente estudio no se verán afectadas significativamente. En concreto, la diferencia principal entre el bosque descrito por el modelo de ciclo forestal propuesto y el bosque actualmente observado en la zona de estudio fue la escasa representación superficial de las últimas fases (Tabla 2). Esta situación es común a la mayor parte de los bosques gestionados, porque los árboles se cortan cuando son relativamente jóvenes, en comparación con su longevidad potencial, para maximizar el volumen aprovechado de madera (Tíscar et al. 2011; Tíscar et al. 2015, en prensa). Por esto, los árboles de edad avanzada poseen unos valores patrimoniales y naturales insustituibles, que deberían respetarse durante la práctica de la gestión forestal.

Los criterios actuales de gestión forestal sostenible reconocen los valores citados al nivel del árbol individual y, de manera adicional, proponen la no intervención en, al menos, el 5% de la superficie de los montes explotados (de la Hoz et al. 2004). Ese porcentaje de superficie es una propuesta teórica, que no ha sido justificada científicamente. Sin embargo, puede relacionarse con el mosaico cambiante de teselas que conlleva la dinámica del ciclo forestal, es decir, con la extensión de bosque mínima (SME) necesaria para mantener superficies constantes de cada fase del ciclo (Bormann y Likens 1979; Peterken 1996). La superficie mínima de equilibrio se ha estimado para los hayedos de Europa central en 25-40 ha (Peterken 1996). Considerando la superficie media de las eco-unidades (394 m²) y la duración del ciclo (500 años) estimamos que la SME para los bosques de *Pinus nigra* es de 20 ha aproximadamente. Esta estimación es obviamente preliminar, entre otras razones, porque las perturbaciones producen alteraciones y retrocesos en la marcha lineal del ciclo forestal. Incluso es probable que no exista un estado estable del mosaico cambiante de teselas en ningún bosque (Oliver y Larson 1996). No obstante, el modelo de ciclo forestal descrito en este estudio sería útil como marco de referencia para orientar la gestión forestal sostenible de los bosques de *Pinus nigra* en sustitución del modelo actual de monte normal, orientado esencialmente hacia la optimización de la producción maderera (Puettmann et al. 2009; Tíscar et al. 2015, en prensa).

Conclusiones

Los datos dendrocronológicos pueden utilizarse para construir modelos de ciclo forestal con aplicación en la gestión forestal sostenible de los bosques explotados. La exactitud de estos modelos se ve afectada por la escasez de árboles de edad avanzada, pero, en general, se pueden obtener resultados satisfactorios sin necesidad de explorar una gran superficie de bosque o de muestrear un gran número de árboles.

Agradecimientos

La Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de Andalucía proporcionó los datos históricos de aprovechamientos madereros en el monte Navahondona (Sierra de Cazorla) y proporcionó los demás medios para realizar la investigación.

Referencias

- Baraza, E. 2005. Efecto de los pequeños ungulados en la regeneración del bosque de la montaña mediterránea: desde la química hasta el paisaje. *Ecosistemas* 14(2): 18.
- Blanco, E., Casado, M.A., Costa, M., Escribano, R., García, M., Génova, M., et al. 1998. *Los bosques ibéricos. Una interpretación geobotánica*. Editorial Planeta S.A., Barcelona, España.
- Bobiec, A., van der Burgt, H., Meijer, K., Zuyderduyn, C., Haga, J., Vlaanderen, B. 2000. Rich deciduous forests in Bialowieza as a dynamic mosaic of developmental phases: premises for nature conservation and restoration management. *Forest Ecology and Management* 130: 159-175.

- Bormann, F.H., Likens, G.E. 1979. Catastrophic disturbance and the steady state in northern hardwood forests. *American Scientist* 67: 660-669.
- Bosela, M., Sedmak, R., Marusak, R., Sedmakova, D., Petras, R., Barna, M. 2014. Evaluating similarity of radial increments around tree stem circumference of Europe beech and Norway spruce from Central Europe. *Geochronometria* 41:136-146.
- Carrión, J.S., Munera, M., Dupre M., Andrade, A. 2001. Abrupt vegetation changes in the Segura Mountains of southern Spain throughout the Holocene. *Journal of Ecology* 89:783-797.
- del Río, M., Montero, G., Montes, F., Cañellas, I. 2008. Revisión: Índices de diversidad estructural en masas forestales. *Forest Systems* 12: 159-176.
- Domínguez, F. 1993. *Topografía general y aplicada*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España.
- Emborg, J., Christensen, M., Helimann-Clausen, J. 2000. Th structural dynamics of Suserup Skov, a near-natural temperate deciduous forest in Denmark. *Forest Ecology and Management* 126: 173-189.
- De la Hoz, F., Oliet, J.A., Abellanas, B., Cuadros, S., Fernández, P., Zamora, R. 2004. *Manual de ordenación de montes de Andalucía*. Consejería de Medio Ambiente, Sevilla, España. Disponible en: http://www.junta-deandalucia.es/medioambiente/web/Bloques_Tematicos/Publicaciones_Divulgacion_Y_Noticias/Documentos_Tecnicos/manual_ordenacion_montes_andalucia/manual_ord_montes.pdf
- Fulé, P.Z., Ribas, M., Gutiérrez, E., Vallejo, R., Kaye, M.W. 2008. Forest structure and fire history in an old *Pinus nigra* forest, eastern Spain. *Forest Ecology and Management*. doi: 10.1016/j.foreco.2007.10.046
- Gil, L. 2008. *Pinares y rodeneles: la diversidad que no se ve*. Real Academia de Ingeniería, Madrid, España.
- Holmes, R.L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43:69-78.
- Koop, H., Hilgen, P. 1987. Forest dynamics and regeneration mosaic shifts in unexploited beech (*Fagus sylvatica*) stands at Fontainebleau (France). *Forest Ecosystems and Management* 20: 135-150.
- Linares, J.C., Carreira, J.A. 2009. Temperate-like stand dynamics in relict Mediterranean-fir (*Abies pinsapo*, Boiss.) forests from southern Spain. *Annals of Forest Science*, doi: 10.1051/forest/2009040
- Martín, S., Ayuga, E., González, C., Martín, A. 2011. *Guía completa de Statgraphics, desde Ms-Dos a Statgraphics Plus*. Editorial Díaz de Santos, Madrid, España.
- Oldemann, R.A.A. 1990. *Forests: Elements of Silvology*. Springer-Verlag, Berlín, Alemania.
- Oliver, C.D., Larson, B.C. 1996. *Forest Stand Dynamics*. John Wiley and sons, Inc. New York, Estados Unidos.
- Peterken, G.F. 1996. *Natural woodland. Ecology and conservation in northern temperate regions*. Cambridge University Press, Cambridge. Reino Unido.
- Puettmann, K.J., Coates, K.D., Messier, C. 2009. *A critique of silviculture. Managing for complexity*. Island Press, Washington D.C.
- Rozas, V. 2001. Detecting the impact of climate and disturbances on tree-rings of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in a lowland forest in Cantabria, Northern Spain. *Annals of Forest Science* 58: 237-251.
- Seymour, R.S., Hunter, M.L. Jr. 1999. Principles of ecological forestry. In: Hunter ML Jr (ed) *Maintaining biodiversity in forest ecosystems*, pp 22-61. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- Schnitzler, A., Borlea, F. 1998. Lessons from natural forests as keys for sustainable management and improvement of naturalness in managed broadleaved forests. *Forest Ecology and Management* 109: 293-303.
- Tiscar, P.A. 2014. Pautas de distribución de encinas y quejigos en un pinar de la sierra de Cazorla (Jaén) tras 90 años de ordenación forestal. *Ecosistemas* 23: 116-123.
- Tiscar, P.A., Linares, J.C. 2011. *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* forests from Southeast Spain: using structure and process information to guide management. En: Frisiras, C.T. (ed.) *Pine forests: Types, Threats and Management*. Nova Science Publishers Inc. Hauppauge, NY, Estados Unidos.
- Tiscar, P.A., Linares, J.C. 2014. Large-scale regeneration patterns of *Pinus nigra* subsp. *salzmannii*: Poor evidence of increasing facilitation across a drought gradient. *Forests* doi:10.3390/f5010001.
- Tiscar, P.A., Lucas-Borja, M.E., Candel, D. 2011. Changes in the structure and composition of two *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* forests over a century of different silvicultural treatments. *Forest Systems* 20: 525-535.
- Tiscar, P.A., García-Abril, A.D., Aguilar, M., Solís, A. 2015 (en prensa). *Gestión Forestal Próxima a la Naturaleza: potencialidades y principios para su aplicación en los pinares de montaña mediterráneos como medida de adaptación al cambio climático*. MAGRAMA.
- Veblen, T.T. 1992. Regeneration dynamics. En: Glenn-Lewin, D.C., Peet, R.K., Veblen, T.T. (eds.), *Plant succession. Theory and prediction*, pp. 152-187. Chapman and Hall, Londres, Reino Unido.
- Watt, A.S. 1947. Pattern and process in the plant community. *Journal of Ecology* 35: 1-22.
- Wissel, C. 1992. Modelling the mosaic cycle of a Middle European beech forest. *Ecological Modelling* 63: 29-43.
- Woodall, C.W. 2008. When is one core per tree sufficient to characterize stand attributes? Results of a *Pinus ponderosa* case study. *Tree-ring Research* 64:55-60.