Invest Agrar: Sist Recur For (2006) 15(1), 120-133

Tendencias radiales de la densidad y sus componentes en *Pinus nigra* Arn. de la Península Ibérica

E. Rodríguez Trobajo* y M. Ortega Quero

INIA-CIFOR. Ctra. de La Coruña, km. 7,5. 28040-Madrid

Resumen

Las tendencias radiales de la densidad media del anillo y sus componentes: densidades de las maderas inicial y final y textura en *Pinus nigra* Arn. son ajustadas a las maderas juvenil y madura mediante un modelo cúbico-lineal de regresión segmentada. Este método permite comparar las tendencias radiales y estimar la edad de transición entre las maderas juvenil y madura. La densidad de la madera final y la textura determinan la densidad media del anillo y las peculiares características tecnológicas de la madera de *Pinus nigra* Arn.

No se encuentran efectos significativamente diferentes entre las dos procedencias analizadas (Serranía de Cuenca y Sierras de Cazorla-Segura), pero algunas diferencias entre localidades son relacionadas con los factores genéticos o ambientales.

La calidad de estación tiene una influencia más significativa sobre la densidad media del anillo y la textura que sobre las densidades de las maderas inicial y final. Se discute este efecto no reflejado en la bibliografía y se evidencia la importancia de la textura en los patrones radiales y axiales de esta madera.

Palabras clave: madera juvenil, madera madura, madera de transición, densidad de la madera inicial, densidad de la madera final, textura, regresión segmentada.

Abstract

Radial trends of wood density and components in *Pinus nigra* Arn. of Iberian Peninsula

Radial trends of wood density, earlywood density, latewood density and latewood proportion in *Pinus nigra* Arn. are fitted in juvenile wood and mature wood by means of a cubic-linear segmented regression model. This method allows to compare radial trends and to estimate the transition age between juvenile and mature wood. Latewood density and latewood proportion determine wood density and peculiar technologic characteristics of European black pine wood.

None significant effect are found between two analyzed provenances (Serranía de Cuenca and Sierras de Cazorla-Segura), but some differences between sites were related to genetic or environmental factors.

Site index has a more significant influence on wood density and latewood proportion than earlywood density and latewood density. This unknown effect in bibliography is discussed and the importance of latewood proportion on radial and axial wood patterns is showed.

Key words: juvenile wood, mature wood, transition wood, earlywood density, latewood density, latewood proportion, segmented regression.

Introducción

El estudio de las maderas juvenil y madura en coníferas es objeto de un interés creciente en el campo de la calidad de la madera. Un buen número de características como densidad, longitud y grosor de fibra, orientación de microfibrillas, proporción lignina/celulosa, etc., difieren en los dos tipos de madera y son responsables de grandes cambios en las propiedades fisicomecánicas y de transformación de la madera (Zobel y van Buijtenen, 1989). La diferenciación madera juvenil/madura en coníferas tiene un componente genético (Loo *et al.,* 1985; Abdel-Gadir y Krhamer, 1993a; Vargas y Adams, 1991), pero es también un proceso ecofisiológico complejo que ha llevado a una continua revisión de conceptos y términos (Larson, 1969; Amaresekara y Dennne, 2002; Burdon *et al.,* 2004). Una definición

* Autor para la correspondencia:
Recibido: 05-09-05; Aceptado: 02-02-06.

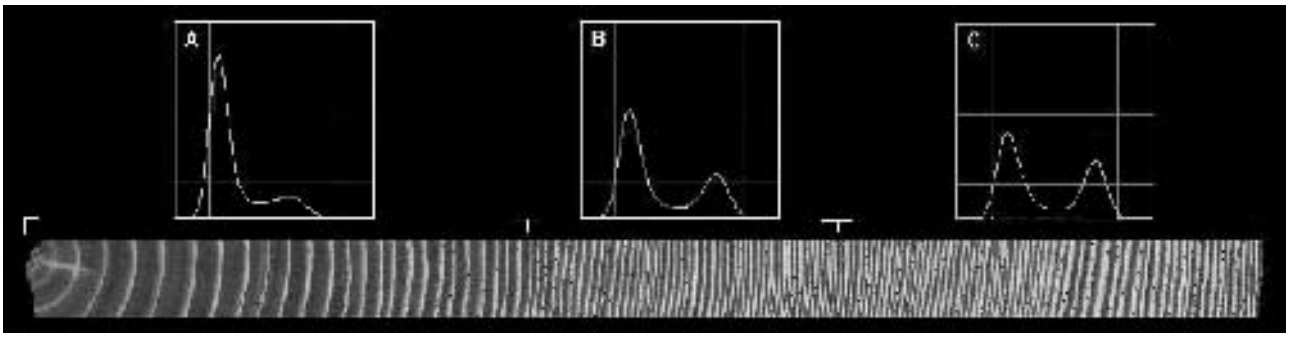

Figura 1. Morfogramas medios de las maderas juvenil (A), de transición (B) y madura (C) correspondientes a una muestra radial de *Pinus nigra.* La doble onda del morfograma representa el volumen de las maderas inicial (izquierda) y final (derecha) en función de la densidad de los elementos celulares.

«consensuada» hace referencia a la zona próxima a la médula en la que múltiples características varían rápidamente en función de la edad cambial, en contraste con la estabilidad que se alcanza en la zona externa o madura del tronco (Zobel y Sprague, 1998).

La densidad es una de las variables más ligada a las propiedades físicas de la madera, siendo un buen predictor de los módulos de elasticidad y rotura, coeficientes de dureza y de contracción (Cown, 1999; Evans y Ilic, 2001). Entre las coníferas españolas, la madera de pino laricio *(Pinus nigra* Arn. subsp. *saltzmannii)* destaca por su elevada densidad, que la hace un 20% y un 30% más resistente que las maderas de pino silvestre y pino pináster, respectivamente (Fernández-Golfín *et al.,* 2001, 2004; Pazdrowski, 2004). Por otra parte, mientras que *Pinus sylvetris L.* y géneros como *Abies* y *Picea* presentan tendencias radiales de la densidad poco marcadas, en *Pseudosuga* y en muchos pinos del subgénero *Pinus* («hard pines»), la densidad tiene una fuerte pendiente positiva en la madera juvenil (Di Lucca, 1989). Entre éstos se encuentra *Pinus nigra* (Cown, 1973; Pazdrowski, 2004), lo que explica que su madera tenga un mayor número de piezas deformadas que el pino silvestre (Fernández-Golfín *et al.,* 2001). Por consiguiente, los modelos radiales de la densidad y sus componentes, así como los factores que los modifican, son los principales parámetros que condicionan las aplicaciones y usos de la madera de *Pinus nigra.*

El mecanismo de la formación de las maderas juvenil y madura ha sido explicado por Larson (1969) como un balance entre el crecimiento celular (madera inicial), activado por auxinas procedentes de yemas y brotes de la parte alta de la copa, y el engrosamiento de la pared celular (madera final), dependiente del aporte de nutrientes de la parte inferior de la copa [1]. Por consiguiente, la madera juvenil tiene algunos caracteres ligados a la distancia y tamaño de la copa que conforman una «madera de copa» (crown formed wood), tal como han estudiado Amarasekara y Denne (2002) en *Pinus nigra,* mientras que otros caracteres sólo están ligados a las edades cambial e internodal (Kucera, 1994). Una imagen de esta evolución morfológica en *Pinus nigra* se muestra en la figura 1, en la que se diferencia una madera de transición (B) entre las maderas juvenil (A) y madura (C). Por otra parte, en este trabajo, se estudia la tendencia radial a una altura fija de 3 m, tratando de evitar las anomalías que presenta la densidad en la zona basal del tronco; tal como se ha descrito en *Pinus taeda* (Megraw *et al.,* 1999) y en *Pinus radiata* (Xu y Walter, 2004), en los que sólo a partir de 3-3,5 m de altura se llega a estabilizar el módulo de elasticidad para una determinada edad cambial.

Otro aspecto de interés tecnológico es la delimitación práctica entre madera juvenil y madura que tiene como inconvenientes la posición variable del límite según la característica considerada y la presencia de una zona de transición entre las dos maderas (Zobel y Sprague, 1998). Con estas limitaciones, se han ensayado distintos métodos utilizando variables más o menos fá-

[1] Utilizamos «madera inicial» y «madera final» para designar las dos partes que integran el anillo de crecimiento por ser términos claros y concisos. De igual modo, «densidad inicial» y «densidad final» hacen referencia a las densidades medias respectivas de estas maderas y se reservan los términos «densidad» o «densidad media» para indicar la densidad media total del anillo. El término «textura» es tomado según su definición más usual, es decir, como la proporción de madera final que tiene un anillo.

ciles o de mayor interés tecnológico. En ocasiones, se ha recurrido a la determinación visual del punto de ruptura en la densidad media de *Pseudotzuga menziesii, Pinus taeda* y otros pinos meridionales (Zobel *et al.,* 1959; Clark y Saucier, 1989). Otros ensayos han aplicado variables transformadas, como Vargas-Hernández *et al.* (1994) en *Pseudotsuga menziesii,* que utilizan la densidad y sus componentes ponderados por el área. Se han aplicado también diversos procedimientos basados en la regresión lineal, bien mediante la iteración de pendientes sucesivas (Bendtsen y Senft, 1986), bien por intersección de dos rectas ajustadas a los tramos de madera juvenil y madura (Loo *et al.,* 1985; Abdel-Gadir y Krahmer, 1993b).

Estos procedimientos han sido desplazados por los modelos de regresión segmentada lineal/no lineal (Di Lucca, 1989; Bendtsen y Senft, 1986; Tasissa y Burkhart, 1998; Sauter *et al.,* 1999; Mutz *et al.,* 2004), que cuentan con la ventaja de estimar simultáneamente el punto de ruptura y la tendencia en los dos segmentos. Los mejores resultados se han conseguido con un ajuste cuadrático-lineal de la densidad final del pino silvestre (Sauter *et al.,* 1999), con/sin tratamiento de la autocorrelación de residuos. Más recientemente, Mutz *et al.* (2004), utilizando el mismo material y método, han ensayado modelos mixtos no lineares aplicados a masas enteras, logrando mejorar la estima del punto de transición.

Una cuestión de interés, no tratada en la bibliografía, es la aplicación de la regresión segmentada a la densidad media del anillo y a todos sus componentes (densidades inicial, final y textura), con objeto de analizar de manera conjunta sus tendencias. La forma atenuada de algunas variables, o la propia técnica de iteración de la regresión no lineal, que puede converger sobre mínimos locales, son inconvenientes que incrementan la desviación estándar del punto de transición. En este trabajo se ha tratado de evitar estos problemas ensayando algunas variaciones del procedimiento, como un paso previo al análisis comparativo de las tendencias.

Material

Se han analizado 44 árboles de *Pinus nigra* Arn. subsp. *salzmannii,* que forman parte del muestreo realizado en un estudio tecnológico de la madera de esta especie en la Península Ibérica (Fernández-Golfín *et al.,* 2001). Todos los árboles pertenecen a masas enclavadas en el piso supramediterráneo, si bien proceden de dos regiones fitoclimáticas diferenciadas: la Serranía de Cuenca (Sistema Ibérico), de régimen hídrico seco a húmedo y carácter continental, y las Sierras de Cazorla y Segura (Cordilleras Béticas), con alta precipitación anual, pero con intensa sequía estival, y ligera continentalidad (Elena *et al.,* 1985; Romera *et al.,* 2001). Ambas zonas coinciden, respectivamente, con las subregiones 7A y 8A de las regiones de procedencias de *Pinus nigra* Arn. definidas por Catalán *et al.* (1991).

Se eligieron 7 localidades, 3 en la Serranía de Cuenca y 4 en las Cordilleras Béticas, todas ellas sobre litofacies carbonatadas. En la Serranía de Cuenca, dos localidades tenían suelos poco evolucionados, rendzinas empardecidas, y un balance hídrico subhúmedo, mientras que la tercera, «Cerrogordo», tenía suelo pardo calcimórfico y carácter húmedo. En las 4 localidades béticas los suelos eran más evolucionados, pardo calcimórfico o argilúvico calizo, con balances hídricos húmedo o perhúmedo (Sánchez *et al.,* 1990). Los rodales tenían diferentes orientaciones y pendientes medias entre el 4 y el 20%, apreciándose hasta 3 diferentes calidades de estación (Gómez Loranca, 1996). Todos los árboles eran dominantes o codominantes, de diámetros medios con corteza de 40 y 50 cm y edades medias de 154 y 176 años (regiones 7A y 8A, respectivamente). En cada parcela la elección de los árboles fue aleatoria, y se cortaron en cada árbol discos a 3 m de altura para la extracción de muestras radiales.

En la tabla 1 aparece el diseño de muestreo realizado, en el que se distribuyen los árboles según localidad y calidad de estación, obtenida ésta a partir de la altura

Tabla 1. Diseño del muestreo

Procedencia	**Serranía de Cuenca**			**Sierras de Cazorla y Segura**			
Localidad	1	2	3	4	5	6	7
Calidad de estación	3	3	1	2	1	3	2
Número de árboles	7	10	7	5	1	9	5

Localidades: Los Palancares (1), Fuencaliente (2), Cerrogordo (3), Mesa de la Loma (4), Parque Cinegético (5), Riomadera (6), Umbría del Jaral (7).

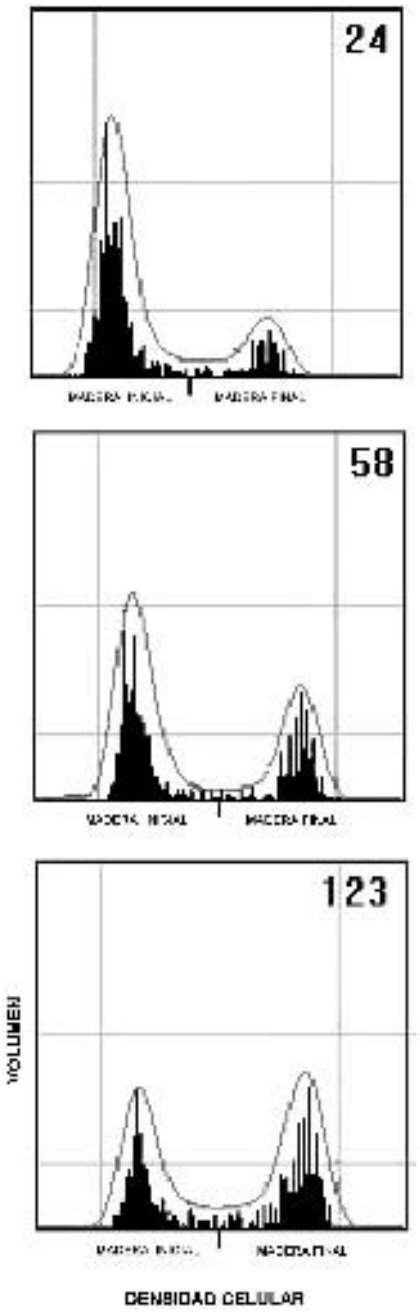

Figura 2. Histogramas (barras) y morfogramas (curvas) de los anillos con edades cambiales 24, 58 y 123, en una muestra radial de *Pinus nigra.* El límite entre las maderas inicial y final viene dado por el mínimo de la curva bimodal. La textura corresponde al área relativa de la madera final en el histograma.

total y edad de cada árbol según las curvas elaboradas por Gómez Loranca (1996).

Métodos

Sobre el diámetro mayor de cada sección se cortaron láminas de 1,6 mm de espesor en el plano transversal a la fibra y se eliminaron los extractivos mediante disolución de ciclohexano/etanol (1:1) en un extractor Soxhlet durante 48 horas. El material se acondicionó al 12% de contenido de humedad para su exposición a la radiación X y las imágenes radiográficas se captaron a 1200 dpi de resolución. Todo el proceso de medición y análisis ha sido realizado con un programa experimental *(Perfila)* que utiliza un nuevo algoritmo de delimitación entre las maderas inicial y final (figura 2), que es equivalente al de otros procedimientos basados en el punto de inflexión del perfil densitométrico (Barbour *et al.,* 1997; Koubaa *et al.,* 2002).

Frente a la elección de un modelo cuadrático-lineal, que ha sido aplicado con buenos resultados en otras coníferas (Sauter *et al.,* 1999; Mutz *et al.,* 2004), hemos preferido un ajuste cúbico en la madera juvenil, manteniendo el ajuste lineal para la madera madura. De este modo, se ha conseguido mejorar la flexibilidad del ajuste y, al mismo tiempo, se han controlado los efectos anómalos de los ciclos plurianuales mediante el uso de restricciones en la función cúbica. En la densidad final se ha exigido la presencia de un máximo único, mientras que para la textura y densidad media se ha admitido el mismo patrón o, como alternativa, un mínimo seguido de un máximo. En el caso de la densidad inicial, se han adoptado los dos patrones anteriores, permitiendo además que el punto de transición coincidiese con un máximo o un mínimo. No obstante, debido a causas individuales no identificadas, algunos árboles presentan tendencias que difieren netamente de los patrones indicados, por lo que han sido tratadas como tendencias atípicas. En la figura 3 se muestra un caso individual representativo del conjunto, salvo en el punto de transición de la densidad inicial, que ha sido desplazado en sentido positivo por efecto de una fluctuación plurianual.

El método de regresión polinómica segmentada (Gallant y Fuller, 1973) ha sido implementado mediante el programa Statistica 6.1. de StatSoft, Inc. 1984-2002. En la ecuación de evaluación se ha expresado la variable independiente (edad cambial) en función del propio punto de transición a estimar y, de este modo, se ha podido realizar un barrido completo de mínimos locales en amplios rangos del punto de transición. Sin embargo, en el modelo bisegmentado se estima un punto de

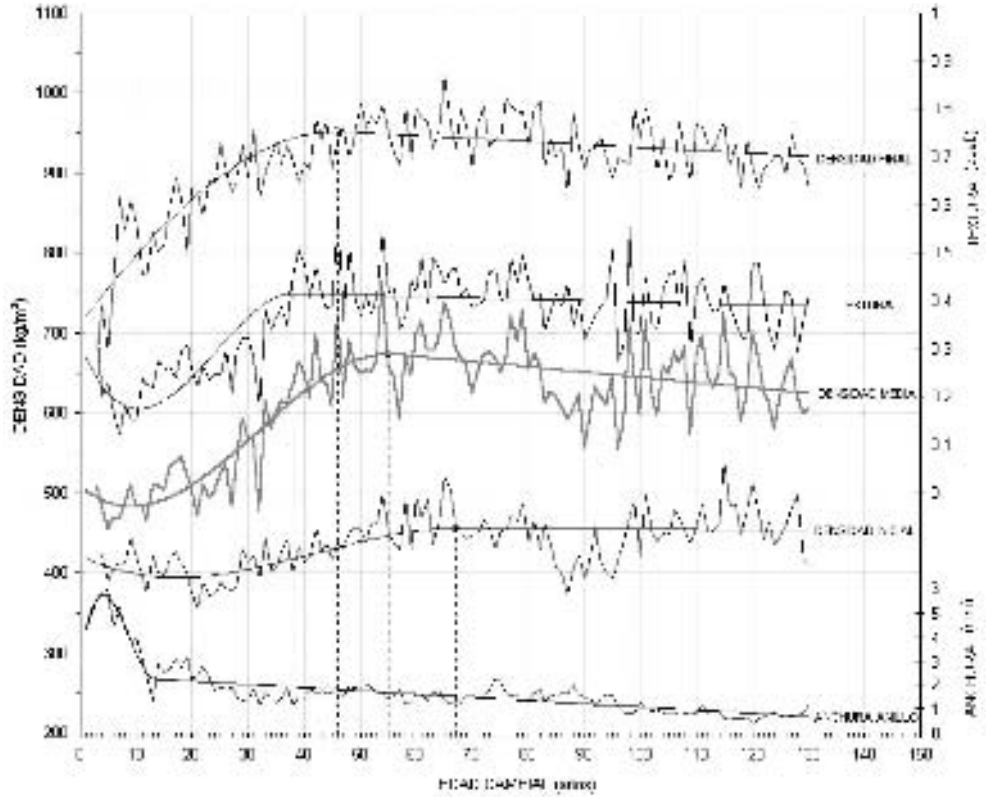

Figura 3. Ajustes de tendencias bisegmentadas de la densidad media y sus componentes (textura y densidades inicial y final), así como de la anchura de anillo, en una muestra radial de *Pinus nigra.*

discontinuidad que no existe como tal en el modelo real, lo que contribuye a incrementar la desviación típica del punto de ruptura. En un ensayo posterior, la condición de conexión entre las dos funciones fue eliminada, con objeto de que cada tendencia pudiera ajustarse libremente a su tramo respectivo, juvenil o maduro, manteniendo tan sólo en común la estima del punto de transición. De este modo, se pudo reducir la desviación típica del punto de conexión pasando, por ejemplo, de 21,9 a 11,5 años en un ajuste cuadrático-lineal de la densidad final. Por consiguiente, hemos adoptado esta variante en dos etapas del método: en la primera, sin la condición de conexión entre segmentos y realizando un barrido de mínimos para encontrar el punto de transición con el R^2 más elevado; en la segunda, haciendo fijo este punto de transición y exigiendo la condición de conexión entre segmentos para estimar los parámetros restantes.

La comparación entre tendencias de las variables densidad media, densidad inicial, densidad final y textura se realizó en tres edades cambiales: anillo 6° (madera juvenil), anillo i° (edad de transición entre madera juvenil y madura) y anillo 130° (madera madura). Se analizaron también las dos pendientes resultantes entre las tres edades anteriores para las 4 variables indicadas. Las edades de transición entre madera juvenil y madura correspondientes a estas 4 variables han sido testadas con un análisis multivariante de la varianza. En este análisis los factores de variación o variables independientes son la procedencia y la calidad de estación, con la localidad encajada en ambos. Asimismo las propias variables textura y densidades inicial, final y media se han testado mediante análisis multivariante de la varianza a las 3 edades indicadas (anillos 6°, de transición i° y 130°). En cada análisis, los factores de variación o variables independientes son la procedencia y la calidad de estación, en los que se ha encajado la localidad. Se ha contrastado la distribución de todas las variables dependientes con la normal y no se han encontrado diferencias significativas.

Asimismo sus varianzas han resultado ser homocedásticas. Por tanto los resultados de los análisis multivariante de la varianza son válidos.

Resultados

Modelos radiales de la densidad media y sus componentes

Las pendientes de las 4 variables analizadas en los dos segmentos (juvenil y maduro) en que queda dividida la madera según los modelos ajustados a los datos originales (44 árboles) presentaron en la mayoría de los casos unas desviaciones estándar superiores a las medias en las dos etapas de la madera, juvenil y madura (Tabla 2). La identificación de valores heterogéneos en cada una de las variables, aplicando el criterio de dos desviaciones estándar, permitió la identificación de los árboles cuya tendencia se apartaba del modelo distorsionando la tendencia común y los efectos producidos por la procedencia o la calidad de estación. Al rechazar 7 de los 44 árboles en la madera juvenil y 5 de 44 en la madera madura, las desviaciones estándar de los 37 árboles restantes descendieron estabilizándose los modelos, y el contraste de pendientes respecto de cero mejoró su significación, sobre todo en la densidad media de la madera madura (Tabla 2).

El patrón de pendientes de las densidades media y final (Tabla 2) es parecido: una fuerte pendiente positiva en la madera juvenil, que pasa a levemente negativa en la madera madura. La densidad inicial, por el contrario, no presenta pendientes significativamente diferentes de cero en ambas maderas y la textura tiene pendiente positiva en la madera juvenil y nula en la madera madura.

Tal como se deduce de la Tabla 3, la tendencia de la densidad media está fuertemente ligada a las tendencias de la densidad final y textura, pero escasamente a la tendencia de la densidad inicial. En la madera madura la caída de la densidad final se transmite a la densidad media, aunque es amortiguada por la textura y la densidad inicial que se mantienen constantes. En la figura 2, se reflejan las diferencias entre madera juvenil y madura a nivel celular. El desarrollo de la madera final es aún incipiente en el anillo 24, y las ondas de madera inicial y final sólo alcanzarán su mayor separación al final de la madera juvenil (anillo 58). Un efecto propio de la maduración es el incremento máximo de la textura llegándose a igualar las maderas inicial y final (anillo 123).

Otro aspecto de interés es la edad cambial a la que se produce la transición entre las maderas juvenil y madura. Hay que destacar que no existen diferencias significativas ($F = 1{,}68$ p = n.s.) entre las edades de transición de las 4 variables estudiadas: 48,1 ± 12,7 años en la densidad media, 44,1 ± 10,5 en la densidad final, 42,78 ± 13,2 en la densidad inicial y 45,1 ± 11,2 en la textura. En todos los límites existe mucha dispersión debido al procedimiento de ajuste utilizado, tal como se observa en la edad de transición de la densidad inicial de la figura 3. Aunque no significativo, se observa un ligero retardo de la transición de la densidad media en relación a sus componentes.

Tabla 2. Contraste de pendientes de la densidad y sus componentes con pendientes nulas

	Madera juvenil					Madera madura				
	N.º pies	**Media**	**Desv. Std.**	**t**	**p**	**N.º pies**	**Media**	**Desv. Std.**	**t**	**p**
Densidad Media	44	1,58	2,26	4,64	0,001	44	–0,23	0,76	2,01	0,05
	37	2,17	1,32	10,02	<0,001	39	–0,24	0,59	2,47	0,02
Densidad inicial	44	–0,31	1,54	1,34	n.s.	44	–0,01	0,35	0,14	n.s.
	37	–0,06	1,37	0,25	n.s.	39	–0,04	0,36	0,64	n.s.
Densidad final	44	4,61	2,03	15,05	0,001	44	–0,42	0,96	2,95	0,001
	37	5,01	1,78	17,13	0,001	39	–0,61	0,83	4,46	<0,001
Textura	44	0,3	0,3	4,95	0,001	44	0,01	0,1	1,17	n.s.
	37	0,3	0,2	11,20	<0,001	39	0,001	0,1	0,51	n.s.

Densidad sin extractivos y al 12% de humedad. Unidades: densidad ($kg.m^{-3}.año^{-1}$); textura ($\%.\ año^{-1}$).

Tabla 3. Medias y desviaciones estándar de las tendencias de la densidad media y sus componentes en tres edades cambiales

	Anillo 6		Anillo de transición i		Anillo 130	
	Media	**Desv. Est.**	**Media**	**Desv. Est.**	**Media**	**Desv. Est.**
Densidad media	453,20	40,48	546,67	54,19	527,21	60,21
Densidad inicial	400,33	36,81	406,30	30,51	399,66	39,17
Densidad final	684,62	67,46	877,35	56,45	824,01	70,34
Textura	15,4	4,2	29,0	7,4	29,7	7,5

Densidad sin extractivos y al 12% de humedad. Unidades: densidad (kg.m^{-3}); textura (%).

Efecto de la procedencia y la calidad de estación en la edad de transición

El análisis multivariante de la varianza de la edad de transición entre la madera juvenil y la madura no muestra diferencias significativas entre procedencias, ni calidades de estación (Rao R=1,34 p=0,28; Rao R=1,93 p=0,07; respectivamente). Los análisis univariantes de las 4 variables analizadas protegidos por el análisis multivariante muestran que las densidades inicial, final y total no muestran diferencias significativas entre procedencias ni calidades de estación. Únicamente la textura cambia entre procedencias, siendo mayor en Cazorla que en Cuenca, y entre calidades, siendo la calidad 1 mayor que la 2 y la 3 que son similares (Tabla 4). Sin embargo, si se compara los efectos sobre esta variable de la procedencia dentro de un grupo homogéneo «Calidad 3» y, por otra parte, la calidad de estación en una misma procedencia «Cuenca», se pierde la significación en ambos efectos. Por ello, no consideramos suficientemente probado ninguno de estos dos posibles efectos sobre el punto de demarcación.

Efecto de la procedencia y la calidad de estación en los niveles de la densidad media y sus componentes

Estos efectos se han testado sobre las tendencias cúbico-lineales de la densidad y sus componentes ajustadas a cada árbol en tres puntos representativos: el anillo 6°, el anillo i°, que marca la transición de la madera juvenil a la madura, y el anillo 130° El análisis multivariante de la varianza de la textura y las densidades inicial, final y total en el anillo 6° muestra diferencias significativas entre procedencias y calidades de esta-

Tabla 4. Análisis de la varianza multivariante de la edad de transición de madera juvenil a madura calculada a través de los modelos cúbico-lineales de la densidad media y sus componentes

	Procedencia			Calidad de estación		
	Muestra	**F**	**p**	**Muestra**	**F**	**p**
Densidad media	Total	0,31	n.s.	Total	0,27	n.s.
	Calidad 3	0,66	n.s.	Cuenca	0,05	n.s.
Densidad inicial	Total	0,79	n.s.	Total	1,51	n.s.
	Calidad 3	3,02	n.s.	Cuenca	3,39	n.s.
Densidad final	Total	0,01	n.s.	Total	0,27	n.s.
	Calidad 3	0,03	n.s.	Cuenca	0,22	n.s.
Textura	Total	4,78	0,04	Total	3,82	0,03
	Calidad 3	0,26	n.s.	Cuenca	0,13	n.s.

Densidad sin extractivos y al 12% de humedad. Unidades: densidad (kg.m^{-3}); textura (%).

Tabla 5. Análisis de la varianza multivariantes de la densidad y sus componentes en tres edades cambiales de los modelos cúbico-lineales ajustados. En esta tabla se evalúa el efecto de la procedencia.

	Muestra	Anillo 6		Anillo de transición i		Anillo 130	
		F	P	F	p	F	p
Densidad media	Total	10,77	0,001	0,07	n.s.	0,002	n.s.
	Calidad 3	6,84	0,02	0,37	n.s.	4,46	0,05
Densidad inicial	Total	4,50	0,04	0,01	n.s.	2,05	n.s.
	Calidad 3	0,83	n.s.	0,81	n.s.	2,15	n.s.
Densidad final	Total	0,41	n.s.	2,61	n.s.	0,01	n.s.
	Calidad 3	5,22	0,03	7,99	0,01	0,47	n.s.
Textura	Total	0,25	n.s.	2,51	n.s.	0,27	n.s.
	Calidad 3	1,68	n.s.	0,05	n.s.	2,02	n.s.

Densidad sin extractivos y al 12% de humedad. Unidades: densidad ($kg.m^{-3}$); textura (%).

ción (Rao R=2,69 p=0,051; Rao R=4,26 p=0,0005; respectivamente). Por el contrario, en el anillo de transición i° sólo se muestran diferencias significativas entre calidades de estación (Rao R=5,72 p<0,00) y lo mismo resulta en el anillo 130° (Rao R=4,21 p=0,0007). Los análisis univariantes en las 3 edades indicadas atendiendo sucesivamente al factor procedencia (Tabla 5) y calidad de estación (Tabla 6) han mostrado efectos de muy distinta significación.

El efecto de la procedencia sobre la densidad media sólo es significativo en el anillo 6°, siendo esta densidad mayor en Cuenca que en Cazorla. La densidad inicial muestra un comportamiento similar a la densidad media en los efectos de la procedencia en la madera juvenil (anillo 6°), pues la densidad es mayor en Cuenca que en Cazorla, pero la significación desaparece si nos limitamos a la calidad 3. En la madera madura y en la edad de transición no se han encontrado efectos significativos para esta variable. En la densidad final no ha sido significativo el efecto de la procedencia. Sin embargo, si analizamos por separado los árboles de la calidad 3 encontramos que el efecto de la procedencia es significativo en el anillo 6° y en el anillo de transición; en ambos la densidad final de Cuenca es mayor que la

Tabla 6. Análisis de la varianza multivariantes de la densidad y sus componentes en tres edades cambiales de los modelos cúbico-lineales ajustados. En esta tabla se evalúa el efecto de la calidad de estación

	Muestra	Anillo 6		Anillo de transición i		Anillo 130	
		F	p	F	p	F	p
Densidad media	Total	8,82	0,001	6,11	0,01	6,82	0,004
	Cuenca	0,65	n.s.	12,48	0,003	11,57	0,003
Densidad inicial	Total	6,39	0,01	1,69	n.s.	1,53	n.s.
	Cuenca	7,69	0,01	0,94	n.s.	5,26	0,03
Densidad final	Total	1,13	n.s.	1,11	n.s.	3,93	0,03
	Cuenca	0,01	n.s.	0,03	n.s.	4,97	0,04
Textura	Total	3,76	0,03	24,06	0,000	7,95	0,002
	Cuenca	0,65	n.s.	44,97	0,000	12,69	0,002

Densidad sin extractivos y al 12% de humedad. Unidades: densidad ($kg.m^{-3}$); textura (%).

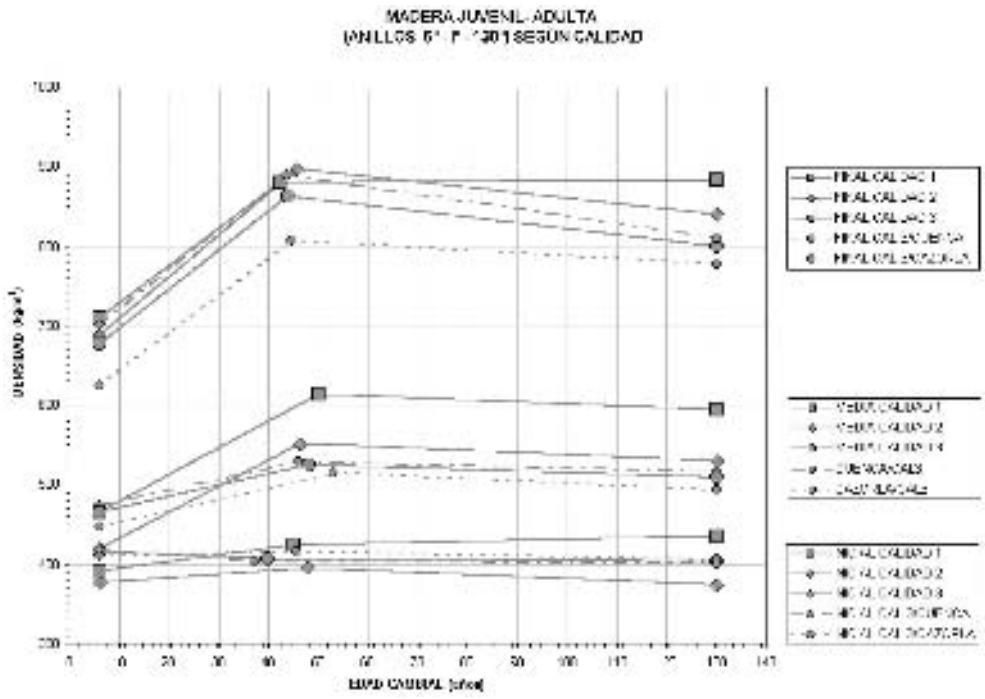

Figura 4. Valores medios de las tendencias de las densidades final, media e inicial según tres calidades de estación en las edades cambiales: 6, edad de transición (i) y 130. La calidad 3 se ha desdoblado en las dos procedencias estudiadas (Serranía de Cuenca y Sierras de Cazorla y Segura).

de Cazorla (Figura 4). Finalmente, el efecto de la procedencia tampoco ha sido significativo en la textura, ni siquiera analizando por separado los árboles de la calidad 3.

El efecto de la calidad de estación (Tabla 6) sobre la densidad media es significativo en las tres edades analizadas. En la edad de transición y en el anillo 130°, la densidad media es mayor en la calidad 1 que en la 3, siendo la calidad 2 similar a la 3 en el anillo de transición y similar a la 1 en la madera madura. Este resultado se invierte en el anillo 6°, en el cual la densidad media de la calidad 1 y 2 son menores que la densidad de la calidad 3. No obstante, si se analizan sólo los árboles de Cuenca no se llega a apreciar una diferencia significativa en el anillo 6°. Estos efectos de la calidad de estación sobre la densidad media resultan idénticos a los encontrados por Gutiérrez *et al.* (2005), tanto en la madera juvenil como en la madura. En la figura 4 se observa como la calidad 3 tiene un gradiente menor que las otras calidades en la madera juvenil, y como entre la calidad 1 y 3 la densidad media alcanza una diferencia importante de 90 kg/m^3 en la edad de transición, que se mantiene a lo largo de la madera madura.

La densidad inicial muestra un comportamiento similar a la densidad media en la madera juvenil (anillo 6°), ya que esta densidad es menor en las calidades 1 y 2 que en la 3, resultado que se mantiene al considerar sólo los árboles de Cuenca. En la madera madura y en la edad de transición no se han encontrado efectos significativos. En la densidad final, el efecto sólo es significativo en la madera madura, en la que las calidades 1 y 2 muestran más densidad final que la calidad 3. Por último, el efecto sobre la textura es significativo en las tres edades analizadas, siendo mayor en la calidad 1 que en la 3. El nivel de significación de esta variable en el punto de transición es muy alto, reflejando la notable diferencia del 15% entre las calidades 1 y 3, que supera al incremento medio total de esta variable en la madera juvenil.

La influencia de la calidad de estación sobre la densidad media en función de los efectos producidos en sus componentes se visualiza en las figuras 4 y 5. Es evidente que la textura es el principal responsable de la significación que alcanza la densidad media en la madera madura (figuras 4 y 5). Por el contrario, las densidades inicial y final ejercen su mayor influencia en los

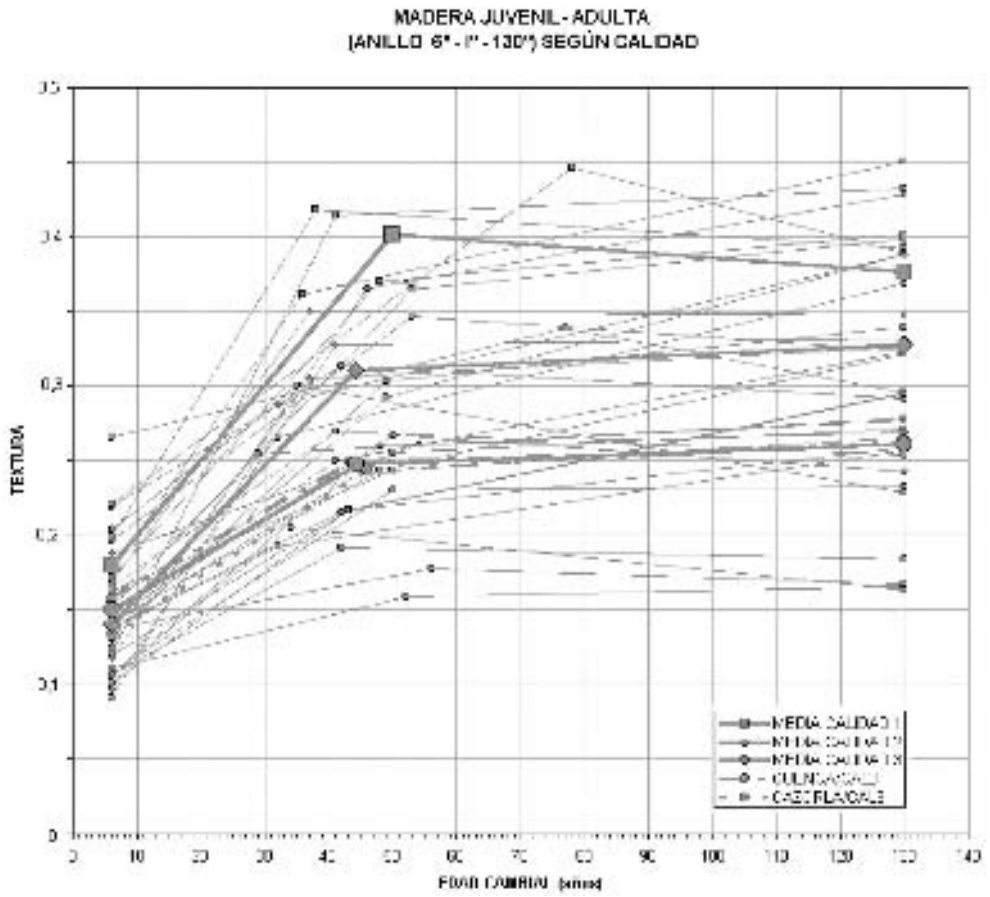

Figura 5. Valores medios de la tendencia de la textura según tres calidades de estación en las edades cambiales: 6, edad de transición (i) y 130. La calidad 3 se ha desdoblado en las dos procedencias estudiadas (Serranía de Cuenca y Sierras de Cazorla y Segura). Se incluyen también los valores individuales con líneas finas y discontinuas.

extremos de la madera juvenil y madura. En el tramo de la madera juvenil, valores altos de la densidad inicial en la calidad 3 son los responsables de la mayor densidad media en el anillo 6° (figura 4). En la madera madura, la ligera significación que adquiere la densidad final al pasar del anillo de transición al anillo 130° (Tabla 6) es causa también de que la densidad media mejore su significación (Tabla 6 y figura 4).

Discusión

Modelos radiales de la densidad media y sus componentes

El patrón que hemos descrito para *Pinus nigra* Arn. subsp. *salzmannii* en la Península Ibérica es el más frecuente entre coníferas (Zobel y Sprague, 1998) y coincide con los resultados de los escasos y parciales estudios realizados en distintas subespecies y variedades de *Pinus nigra* Arn. No obstante, se han obtenido algunas tendencias atípicas que no siguen el patrón general. Este fenómeno se presenta también en otras especies, como refiere Sautier *et al.* (1999) en pino silvestre, y el criterio adoptado es considerarlos valores heterogéneos que deben ser depurados previamente a la estima de los parámetros del patrón general.

Los resultados de densidad varían según estén referidos a densidad básica o al 12% y dependen también de la altura de muestreo en el tronco, pero podemos considerar que la densidad media (Tabla 3) es similar a las indicadas por Cown (1973) sobre las variedades *calabrica* y *austriaca* introducidas en Nueva Zelanda y por Tsoumis y Panagiotidis (1980) en la subespecie autóc-

tona (¿*pallasiana*?) de Grecia; y es algo superior a la registrada por Amarasekara y Denne (2002) en la variedad *maritima* (¿*subsp. laricio*?) de Gales (Gran Bretaña) y bastante inferior (–25%) a los resultados de Pazdrowski (2004) sobre la variedad ¿*austriaca*? en Polonia.

De igual modo, se han encontrado valores semejantes en algunos componentes de la densidad media como la textura (Tabla 3) en Cown (1973), Tsoumis y Panagiotidis (1980), Lebourgeois y Becker (1996) y Amarasekara y Denne (2002). Tal como se observa en la figura 3, la textura suele presentar en la madera juvenil una semionda negativa de 10-12 años de longitud que puede reflejarse también en la densidad media. Esta peculiaridad de *Pinus nigra* ha sido observada en diferentes subespecies y se correlaciona negativamente con el crecimiento radial, que forma una semionda positiva de igual longitud (Lebourgeois y Becker, 1996). Un efecto similar se produce en la textura de *Pseudotsuga menziesii* (Abdel-Gadir y Krahmer, 1993b; Vargas-Hernández *et al.,* 1994) y en *Pinus ponderosa* (Burdon y Low, 1991), si bien los patrones del resto de variables de estas especies son ya diferentes a los de *Pinus nigra.*

Podemos aceptar un sincronismo del punto de transición en las cuatro variables estudiadas, por lo que valen indistintamente para delimitar la madera juvenil. Sin embargo, destaca la notable amplitud del periodo de madera juvenil definido por la densidad media (48±13 años), que difiere de los resultados obtenidos en la misma especie y otras coníferas. Entre los estudios ya citados, los intervalos de madera juvenil se distribuyen entre 20-25 años (Cown, 1973; Amarasekara y Denne, 2002) y 35-40 años (Lebourgeois y Becker, 1996; Tsoumis y Panagiotidis, 1980); divergencias que no pueden ser explicadas únicamente a partir de las diferencias de altura en el tronco. En otras coníferas, los intervalos no superan los 20-25 años, como sucede en una especie afín como el pino silvestre, cuyo intervalo típico es de 22±7 años (Sauter *et al.,* 1999), es decir, un periodo de madera juvenil mitad que el del *Pinus nigra* estudiado por nosotros.

Entre las implicaciones de orden tecnológico de los modelos de tendencia descritos, hay que destacar el notable incremento de la densidad media en la madera juvenil, 93 kg/m^3 a la altura estudiada de 3 m, que afecta al comportamiento mecánico de los despieces. Asimismo, el periodo de madera juvenil es muy amplio, 48±13 años, pero si descontamos la zona final de menor gradiente, el tramo afectado abarcará los 35 primeros anillos del tronco. Estos resultados concuerdan con los valores indicados por Fernández-Golfín *et al.* (2001), en los que la resistencia se hace máxima y estable a partir de los 30 años. Por otra parte, el promedio de tendencias de densidad tiene su máximo en la edad de transición, al que sigue un ligero declive de 19 kg/m^3 hasta los 130 años. Por consiguiente, la densidad no es un factor que deba ser tenido en cuenta en la determinación del turno óptimo, que se ha estimado en 100-120 años para la calidad de estación 1 (Gómez Loranca, 1996).

Efecto de la procedencia y la calidad de estación en la edad de transición

Diferentes estudios en especies de pinos muestran una relación positiva entre latitud y periodo de madera juvenil (Clark y Saucier, 1989; Tasissa y Burkhart, 1998; Cown y Ball, 2001). Sin embargo, dada la pequeña distancia geográfica entre las dos procedencias analizadas no cabe esperar diferencias significativas y, en cualquier caso, este efecto debería apuntar en sentido inverso al obtenido (Tabla 4). Por el contrario, existen otros factores no considerados en este estudio que tienen influencia sobre la edad de transición, principalmente los de carácter genético y ambiental (Cown y Ball, 2001). En efecto, la variabilidad genotípica del límite de la madera juvenil ha sido bien probada en coníferas para diferentes familias y procedencias (Abdel-Gadir y Krahmer, 1993a; Vargas-Hernández *et al.,* 1994). Así mismo, en una estimación conjunta por localidades realizada en el presente estudio, se obtuvieron diferentes edades para la densidad final: 45 en Los Palancares, 40 en Cerrogordo, 50 en Mesa de la Loma, 39 en Río Madera y 55 en Umbría del Jaral. Aunque no llegan a ser significativas, las desviaciones más grandes están asociadas a algunas localidades de las Sierras de Cazorla y Segura.

Por otro lado, la relación entre la edad de transición y calidad de estación ha sido también observada en otras coníferas como *Picea abies* (Kucera, 1994), a través del sincronismo existente con el crecimiento en altura, según el cual la edad de transición se produce más tempranamente en las calidades más altas. Por el contrario, nuestros resultados indican un efecto inverso, ya que es la calidad superior la de mayor edad de transición. Asimismo, en este caso no encontramos significación al comparar masas con calidades distintas (1 y 3) e igual procedencia (Cuenca).

Efecto de la procedencia y la calidad de estación en los niveles de la densidad media y sus componentes

Numerosos estudios han mostrado como la densidad media decrece con la latitud, tanto en el conjunto de las angiospermas (Wiemann y Williamson, 2002), como entre coníferas (Cown y Ball, 2001), lo que ha sido confirmado en *Pinus nigra* (Cown, 1973; Tsoumis y Pangiotidis, 1980). Si bien nuestro resultado es coincidente con los estudios indicados (Tabla 5), se contradice con el obtenido por Gutiérrez *et al.* (2005) sobre el mismo material. Es probable que ambos resultados sean circunstanciales por deficiencias del diseño experimental y que puedan estar influyendo factores genotípicos y ambientales, además de la posible interacción del efecto calidad de estación (Tabla 6), como nos indica la caída de significación cuando se consideran únicamente los árboles de la calidad 3.

Los resultados muestran también una significación moderada del factor procedencia sobre las densidades inicial y final. La interpretación de este resultado no es clara, pues podría deberse a variaciones genotípicas, o bien a factores ambientales, en cuyo caso las localidades de Cuenca reflejarían un mayor estrés hídrico en el periodo vegetativo (von Wilpert, 1991; Wimmer *et al.,* 2000). Finalmente, la textura no muestra significación en ninguna edad y viene a reforzar las dudas expresadas sobre el efecto procedencia en la densidad media, ya que según los estudios antes citados la textura se comporta igual que la densidad media en relación a la procedencia geográfica.

El efecto del crecimiento en altura, es decir, la calidad de estación o *site index,* sobre la densidad y sus componentes presenta resultados contrapuestos en la bibliografía. Así, Tsoumis y Pangiotidis (1980) hacen referencia al efecto positivo de la calidad de estación sobre la densidad media y sobre la textura en *Pinus nigra,* si bien el efecto «calidad» no aparece bien definido y separado del efecto de dominancia de cada árbol. Por el contrario, Amarasekara y Denne (2002) han encontrado en *Pinus nigra* una correlación muy negativa (–0,923) entre textura y altura del árbol al comparar árboles con diferente grado de dominancia, ya que los árboles dominantes desarrollan copas mayores y producen anillos más gruesos pero de menor textura. No obstante, hay que puntualizar que en este estudio todos los árboles pertenecen a la misma masa y no son comparadas masas de diferentes calidades como en nuestro caso. Por otra parte, distintos estudios genéticos muestran relaciones negativas entre altura del árbol y densidad, si bien los resultados son desiguales y muestran gran variabilidad entre distintas familias (Vargas-Hernández y Adams, 1991; Zhang *et al.,* 1996). A nuestro juicio, todos estos factores no siempre están bien diferenciados en la literatura y, en consecuencia, se encuentran resultados contradictorios sobre la relación entre altura del árbol y densidad.

En nuestro análisis la comparación se ha realizado tomando una misma altura (3 m) en todas las calidades de estación, pero si contabilizamos el número de internodos existentes desde la base del árbol, éste será mayor a medida que decrece la calidad. En consecuencia, si la comparación se realizase a igual altura internodal, en lugar de igual altura métrica, las diferencias entre calidades resultarían menores, ya que la densidad media y la textura en *Pinus nigra* disminuyen con la altura (Amarasekara y Denne, 2002). En definitiva, será importante conocer los patrones de variación de la densidad y sus componentes tanto en unidades internodales como métricas para poder explicar el mecanismo de diferenciación entre madera juvenil y madura en *Pinus nigra.*

Conclusiones

La densidad media y todos los componentes (densidades inicial y final y textura) tienen tendencias con un buen ajuste cúbico en la madera juvenil y lineal en la madera madura. La pendiente del ajuste lineal no difiere significativamente de cero en la densidad inicial y la textura, mientras en la densidad final es significativamente negativa. La tendencia de la densidad media depende sobre todo de la textura y de la densidad final, si bien el efecto es variable a lo largo del radio, siendo en la madera madura cuando la tendencia se hace ligeramente negativa por efecto de la densidad final.

La delimitación entre madera juvenil y madura tiene gran variabilidad (±10-13 años), aunque no hay diferencias significativas entre variables, de manera que cualquiera de ellas puede ser utilizada para delimitar las maderas juvenil y madura. La densidad media presenta una edad de transición elevada (48,1 ± 13 años), muy superior a los resultados conocidos en la misma especie y en otras coníferas. Por consiguiente, los tratamientos silvoculturales conducentes a disminuir el periodo de madera juvenil tienen un especial interés en el caso de *Pinus nigra* de la Península Ibérica.

Una característica peculiar de *Pinus nigra* es el fuerte incremento de la densidad media (93 kg/m^3) a lo largo de la madera juvenil, que es generado en proporción similar por los incrementos de la densidad final y la textura. Este fuerte gradiente explica las frecuentes deformaciones de las piezas que contienen madera juvenil. Si excluimos la zona externa de menor gradiente, el fenómeno afecta a los 35 primeros anillos a partir de la médula.

En contrapartida, la madera de *Pinus nigra* Arn. alcanza al final de la madera juvenil su máxima densidad, 547 ± 54 kg/m^3, que supera a la de especies afines como el pino silvestre y explica su buen comportamiento fisicomecánico. En la madera madura (edad cambial >50 años) apenas varía la densidad, con un leve declive medio de sólo 19 kg/m^3 en 80 años, por lo que la densidad no es un factor importante en la determinación de los turnos óptimos de aprovechamiento de esta madera.

No se han encontrado efectos significativamente diferentes entre la Serranía de Cuenca y las Sierras de Cazorla y Segura, que son las principales regiones de procedencia de *Pinus nigra* en la Península Ibérica. Diferencias entre localidades en la densidad final y textura, apuntan a la influencia de los factores ambientales (estrés hídrico), si bien esta explicación no es concluyente, dado que el material analizado no ha sido definido genéticamente.

El efecto que muestra mayor significación es la calidad de estación (site index). La mayor influencia se produce sobre la textura, alcanzando diferencias del 15% en la edad de transición, mientras que los efectos sobre los otros componentes son menores y se localizan en los extremos del radio. En consecuencia, el fuerte efecto sobre la textura se transmite a la densidad media que muestra también diferencias significativas entre las calidades 1 y 3, alcanzando una diferencia máxima de 90 kg/m^3 en la edad de transición. En relación con este fenómeno, se evidencia la necesidad de analizar los patrones de tendencias en unidades internodales y métricas para explicar en detalle la diferenciación entre las maderas juvenil y madura.

Referencias Bibliográficas

ABDEL-GADIR A.Y., KRAHMER R.L., 1993a. «Genetic variation in the age of demarcation between juvenile and mature wood in Douglas-Fir.» Wood and Fiber Science 25(4): 384-394.

ABDEL-GADIR A., KRAHMER R., 1993b. «Estimating the age of demarcation of juvenile and mature wood in Douglas-Fir.» Wood and Fiber Science 25(3): 242-249.

AMARASEKARA H., DENNE M., 2002. «Effects of crown size on wood characteristics of Corsican pine in relation to definitions of juvenile wood, crown formed wood and core wood.» Forestry 75(1): 51-61.

BARBOUR R.J., BERGQVIST G., AMUNDSON C., LARSSON B., JOHNSON J.A., 1997. New methods for evaluating intra-ring X-ray densitomery data: maximun derivative methods as compared to Mork's index. En: Zhang et al (ed.) CTIA/IUFRO International Wood Quality Workshop Proceedings, Québec, pp. 1161-67.

BENDTSEN B.A., SENFT J., 1986. Mechanical and anatomical properties in individual growth rings of plantation-grown eastern cottonwood and loblolly pine. Wood and Fiber Science. 18(1): 23-38.

BURDON R.D., LOW C.B., 1992. Performance of Pinus ponderosa and P. jeffreyi provenances in New Zealand. Can. J. For. Res., 21. pp. 1401-1414.

BURDON R.D., KIBBLEWHITE R.P., WALKER J.C.F., MEGRAW R.A., EVANS R., COWN D.J., 2004. Juvenile versus mature wood: a new concept, orthogonal to corewood versus outerwood, with special reference to Pinus radiata and P. taeda. Forest Science 50(4): 399-415.

CATALAN BACHILLER G., GIL MUÑOZ P., GALERA PERAL R., MARTIN ALBERTOS, S., AGÚNDEZ LEAL D., ALIA MIRANDA R., 1991. Regiones de procedencia *Pinus sylvestris L., Pinus nigra* Arn. *Subsp. Salzmanni.* Monografía ICONA, ISBN 84-8014-004-6.

CLARK A., III, SAUCIER J.R., 1989. Influence of initial planting density, geographic location, and species on juvenile wood formation in Southern Pine. Forest Products Journal. 39(7/8): 42-48.

COWN D.J., 1973. Physical properties of corsican pine grown in New Zealand. New Zealand Journal of Forestry Science, 4(1): 76-93.

COWN D.J., 1999. New Zealand pine and Douglas-fir: Suitability for processing (2.ª edición). For. Res. Bull. N.º 216. 72 p.

COWN D.J., BALL R.D., 2001. Wood densitometry of 10 Pinus radiata families at seven contrasting sites: influence of tree age, site, and genotype. New Zealand Journal of Forestry Science, 31(1), pp. 88-100.

DI LUCCA C.M., 1989. Juvenile-mature wood transition. En: R.M. KELLOGG, ed.. Second-growth Douglas-fir: Its management and conversion for value. Special Publication n.º SP-32. Forintek Canada Corp., Vancouver, pp. 23-38.

ELENA R., SÁNCHEZ O., CARRETERO P., 1985. Estudio fisiográfico y climático de los pinares autóctonos españoles de Pinus nigra Arn. Comunicaciones INIA. Serie Recursos naturales, n.º 36, 128 p.

EVANS R., ILIC J., 2001. Rapid prediction of wood stiffness from microfibril angle and density. Forest Products Journal, 51(3), pp. 53-57.

FERNÁNDEZ-GOLFÍN J.I., DÍEZ M.R., BAONZA M.V., GUTIÉRREZ A., HERMOSO E., CONDE M., VAN DEN

EYNDE V., 2001. Caracterización de la calidad y las propiedades de la madera de pino laricio *(Pinus nigra Arn. salzmannii)*. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales, 10(2), 311-331.

FERNÁNDEZ-GOLFÍN J.I., DÍEZ M.R., HERMOSO E., CONDE M., 2004. Mechanical characterization of timber from Spanish provenances of laricio pine according to European standards. Wood Sci.Technol., 38, pp. 25-34.

GALANT A.R., FULLER W.A., 1973. Fitting segmented polynomial regression models whose join points have to be estimated. J. Am. Stat. Assoc., 68: 144-147.

GÓMEZ LORANCA J.A., 1996. *Pinus nigra* Arn. en el Sistema Ibérico: Tablas de crecimiento y producción. Monografías INIA n.º 93, 106 pp.

GUTIÉRREZ OLIVA A., BAONZA MERINO M.V., FDEZ-GOLFÍN J.I., CONDE GARCÍA M., HERMOSO PRIETO, E., 2005. Effect of growth conditions on wood density of Spanish *Pinus nigra.* Wood Sci. Technol. (aceptado).

KOUBAA A., ZHANG S., MAKNI S., 2002. «Defining the transition from earlywood to latewood in black spruce based on intra-ring wood density profiles from X-ray densitometry.» Ann. For. Sci. 59: 511-518.

KUCERA B., 1994. «A hypothesis relating current annual height increment to juvenile wood formation in Norway Spruce.» Wood and Fiber Science 26(1): 152-167.

LARSON P.R., 1969. Wood formation and the concept of wood quality. Sch. For. Bull. 74. New Haven, CT: Yale University. 54 p.

LARSON P., KROTSCHMANN D., CLARK III, A., ISEBRANDS J.G., 2001. «Formation and properties of juvenile wood in southern pines; a sinopsis.» Gen. Tech, Rep. FPL-GTR-129: 42pp.

LEBOUGEOIS F., BECKER M., 1996. Dendroécologie du pin laricio de Corse dans l'ouest de la France. Évolution du potentiel de croissance au cours des dernières décennies. Ann. Sci. For., 53, pp. 931-946.

LOO J.A., TAUER C.G., MCNEW R.W., 1985. Geneticvariation in the time of transition from juvenile to maturewood in loblolly pine *(Pinus taeda)*. Silva Genetica., 34: 14-19.

MEGRAW R., BREMER D., LEAF G., ROERS J., 1999. Stiffness in loblolly pine as a function of ring position and heigth, and its relationship to microfibril angle and specific gravity. En: Proc. IUFRO WP. S5.01-04. Third wokshop on conecction between silviculture and wood quality through modelling approaches and simulation software. La Lande-les-Mares. Sept. 1999. Nepveu, G. (ed.). Pubication Equipe de Recherches sur la Qualité de Bois 1992/2, Dicim. INRA. Nancy.

MUTZ R., GUILLEY E., SAUTIER U.H., NEPVEU G., 2004. Modelling juvenile-mature wood transition in scots pine (Pinus sylvestris L.) using nonlinear mixed-effects models. Ann. For. Sci., 61: 831-841.

PAZDROWSKI W., 2004. The proportion and some selected physical and mechanical properties of juvenile maturing and adult wood of black pine and scots pine. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities. Series Forestry, 7(1).

ROMERA E., FERNÁNDEZ A., GRAU J.M., CARRASCOSA R.B., 2001. Límites y clasificación fitoclimática de *Pinus nigra* Arn. Cuad. Soc. Esp. Cien. For., 12: 99-108.

SÁNCHEZ O., ELENA R., CARRETERO M.P., 1990. Caracterización edáfica de los pinares autóctonos españoles de *Pinus nigra* Arn. Comunicaciones INIA. Serie Recursos Naturales, n.º 55, 95 p.

SAUTER U.H., MUTZ R., MUNRO B.D., 1999. «Determining juvenile-mature wood transition in Scots pine using latewood density.» Wood and Fiber Science 31(4): 416-425.

TASISSA G., BURKHART H.E., 1998. Juvenile-mature wood demarcación in loblolly pine trees. Wood an Fiber Science, 30(3), pp. 119-127.

TSOUMIS G., PANAGIODITIS N., 1980. Effect of growth conditions on wood quality characteristics of black pine *(Pinus nigra Arn.)*. Wood Sci. Technol., 14: 301-310

VARGAS-HERNÁNDEZ J., ADAMS W., 1991. «Genetic variation of wood density components in young coastal Douglas-fir: implications for tree breeding.» Can. J. For. Res. 21: 1801-1807.

VARGAS-HERNÁNDEZ J., ADAMS W., KRAHMER R.L., 1994. «Family variation in age trends of wood density traits in young coastal Douglas-fir.» Wood and Fiber Science 26(2): 229-236.

VON WILPERT K., 1991. Intra annual variation of radial tracheid diameters as a monitor of site specific water stress. Dendrochronologia 9, pp. 95-114.

WIEMANN M.C., WILLIAMSON G.B., 2002. Geographic variation in wood specific gravity: effects of latitude, temperature, and precipitation. Wood and Fiber Science, 34(1), pp. 96-107.

WIMMER R., STRUMIA G., HOLAWE F., 2000. Use of false rings in austrian pine to reconstruct early growing season precipitation. Can. J. For. Res., 30(10), pp. 1691-1697.

XU P., WALKER J.C.F., 2004. Stiffness gradients in radiata pine trees. Wood Sci. Technol., 38: 1-9.

ZHANG S.Y., SIMPSON D., MORGENSTERN E.K., 1996. Variation in the relationship of wood density with growth in 40 black spruce (Picea mariana) families grown in New Brunswick. Wood and Fiber Science, 28(1), pp. 91-99.

ZOBEL B.J., WEBB C., HENSON F., 1959. Core or juvenile wood of loblolly and slash pine trees. TAPPI Journal. 42: 345-356.

ZOBEL B.J., VAN BUIJTENEN J.P., 1989. Wood variation: Its causes and control. Springer-Verlag, Berlin, 363 p.

ZOBEL B.J., SPRAGUE J.R., 1998. Juvenile wood in forest tree. Springer-Verlag, Berlin, 300 p.