



# 7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios  
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia  
Cáceres, Extremadura

---

---

7CFE01-167

---

---

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales  
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017  
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

## Indicadores de sostenibilidad en la gestión forestal actual de las masas de *Pinus pinea* L

CALAMA, R.<sup>1,7</sup>; MONTERO, G.<sup>1,7</sup>; VÁZQUEZ-PIQUÉ, J.<sup>2</sup>; ALEJANO, R.<sup>2</sup>; GORDO, F.J.<sup>3</sup>; MORO, J.<sup>4</sup>; GANDÍA, R.<sup>5</sup>; CAMACHO, V.<sup>6</sup>; NATALINI, F.<sup>2</sup>, MADRIGAL, G.<sup>1,7</sup>; CONDE, M.<sup>1</sup>; PARDOS, M.<sup>1,7</sup>

<sup>1</sup> INIA-CIFOR. Dpto. Selvicultura y Gestión de los Sistemas Forestales. Ctra A Ciruña km 7.5. 28040 Madrid

<sup>2</sup> Departamento de Ciencias Agroforestales, Universidad de Huelva. Crta. Palos-La Rábida s/n 21819 Palos de la Frontera

<sup>3</sup> Servicio Territorial de Medio Ambiente de Valladolid. Junta de Castilla y León. , Duque de la Victoria, 5, 47071, Valladolid

<sup>4</sup> Centro de Montes Lugar Nuevo y Selladores. OAPPNN. C/Camino de las Cruces nº 26; 23003 Jaen

<sup>5</sup> Servicio Territorial de Medio Ambiente de Ávila. Junta de Castilla y León. Pje. Císter, 1, 05001 Ávila

<sup>6</sup> Ayuntamiento de Almonte (Huelva). Plaza Virgen del Rocío, 1, 21730 Almonte, Huelva

<sup>7</sup> Instituto Universitario de Gestión Forestal Sostenible INIA-Uva. Avda Madrid s/n. 34004 Palencia

### Resumen

Las masas de *Pinus pinea* constituyen una importante fuente de bienes y servicios, entre los que destacan la producción de piña y piñón, producción de leñas y madera, fijación de CO<sub>2</sub> atmosférico, uso recreativo y paisajístico y protección frente a la erosión. En el presente trabajo se definen y comparan, en términos de distintos indicadores de sostenibilidad económica y ecológica, los esquemas de selvicultura actual de cuatro casos de estudio: grupo de pinares de Viana de Cega (Valladolid), pinares de Almonte (Huelva), Lugar Nuevo (Jaén) y montes de Hoyo de Pinares (Ávila). Los esquemas de selvicultura actual e indicadores han sido definidos para cada caso de estudio en colaboración con los gestores de los montes. Se ha utilizado el modelo PINEA2 y tablas de producción existentes para simular la evolución y producción de una hectárea tipo de pinar a lo largo del turno definido por la selvicultura actual, asumiendo las condiciones climáticas actuales. Como resultado principal se observa que la selvicultura actual de los cuatro casos de estudio verifica el principio de multifuncionalidad, aunque existe una mayor orientación hacia la producción de piña en los casos de estudio de Castilla y León, frente a un mayor interés maderero en los pinares de Andalucía

### Palabras clave

Pino piñonero, selvicultura, servicios ecosistémicos, piñón, PINEA2

### 1. Introducción

La gestión sostenible de los sistemas forestales y de sus producciones queda definida en la 2ª Conferencia Pan-Europea de Protección de Bosques, Helsinki, 1993, como “La administración y uso de los bosques y tierras forestales de forma e intensidad tales que mantengan su biodiversidad, productividad, capacidad de regeneración, vitalidad y su potencial para atender, ahora y en el futuro, las funciones ecológicas, económicas y sociales relevantes a escala local, nacional y global, y que no causen daño a otros ecosistemas”. La sostenibilidad de la gestión forestal debe evaluarse a través de diferentes criterios e indicadores, definidos como:

- **Criterios:** se refieren a los elementos clave que permiten evaluar la sostenibilidad de la gestión forestal, a una determinada escala (nacional, regional o unidad de gestión); p.ej. mantenimiento de los recursos y contribución al ciclo del C o Mantenimiento y fomento de la capacidad productiva de los bosques.
- **Indicadores:** parámetros cuantitativos, cualitativos o descriptivos que pueden ser medidos, y que corresponden a un criterio determinado. Permiten evaluar si se progresa o se retrocede en el cumplimiento de un criterio: p.ej. existencias actuales o producción de madera en rollo.

La adecuada definición de indicadores y su cuantificación permite la comparación en términos de sostenibilidad entre alternativas de gestión de los sistemas forestales. Los tres aspectos (definición de indicadores, técnicas de cuantificación y alternativas de gestión) dependen de la escala de trabajo utilizada: nacional, regional, local, escala de monte, rodal. Mientras que gran parte de los

esfuerzos realizados se centran en la evaluación de la sostenibilidad a grandes escalas como respuesta a distintas políticas forestales, es mucho menos común encontrar trabajos centrados en la respuesta en términos de sostenibilidad de una unidad de gestión tipo monte o grupo de montes, en respuesta a una silvicultura determinada (MÄKELA et al., 2012).

Dentro de esa escala inferior, los modelos forestales permiten simular la evolución de un rodal en el tiempo bajo diferentes escenarios ambientales y de gestión, prediciendo la provisión de diferentes servicios ecosistémicos. Las salidas proporcionadas por estos modelos pueden permitir cuantificar de forma directa o indirecta distintos indicadores de sostenibilidad, por lo que su uso se considera fundamental para la evaluación de la sostenibilidad de la gestión forestal, al menos a escala de rodal o monte (MONSERUD 2003, MÄKELA et al. 2012), tanto ante escenarios actuales como escenarios futuros de cambio global.

El pino piñonero, *Pinus pinea* L., es una especie paradigmática de los sistemas forestales mediterráneos, ocupando en España una superficie superior a las 400000 ha (MONTERO et al. 2008), en un amplio rango de condiciones ecológicas y climáticas. Las masas forestales de pino piñonero se consideran un ejemplo de multifuncionalidad en la gestión, pues constituyen una importante fuente de servicios ecosistémicos, entre los que destacan la producción de piña y piñón, producción de leñas y madera, fijación de CO<sub>2</sub> atmosférico, uso recreativo y paisajístico y protección frente a la erosión.

## 2. Objetivos

El objetivo del presente trabajo es utilizar modelos ya desarrollados para evaluar diferentes indicadores de sostenibilidad en la gestión forestal actual en masas de *Pinus pinea* comparando cuatro regiones de estudio distintas: arenales de la Meseta Norte, pinares costeros de Andalucía Occidental, Valles del Tiétar y del Alberche y masas repobladas de Sierra Morena (figura 1). Para alcanzar este objetivo principal se plantean distintos objetivos específicos:

- Definición de los esquemas de silvicultura actual en cada región de estudio
- Selección de indicadores de Gestión Forestal Sostenible
- Identificación y adaptación de las herramientas de simulación disponibles que permitan evaluar los indicadores de GFS, y desarrollo de las simulaciones
- Comparación interregional en términos de sostenibilidad de la gestión

## 3. Materiales

### 3.1. Casos de estudio

- Zona de estudio 1: Pinares en los arenales de la Meseta Norte

Estos pinares ocupan aproximadamente 40000 ha distribuidas por la zona sur-oeste de la provincia de Valladolid, noroeste de Segovia, y norte de Ávila. Las masas de pino piñonero se localizan en altitudes comprendidas entre 600 y 750 m de altitud, ocupando la zona de campiñas, llanuras con formas suaves modeladas por la erosión sobre terrenos blandos, asentadas sobre suelos de sustrato arenoso caracterizados por una baja fertilidad y capacidad de retención de agua. La precipitación media anual se sitúa en torno a los 400 mm (rango 250 – 550 mm), y la temperatura media anual oscila en torno a 12 °C. Dentro de la región dominan las masas puras de *Pinus pinea*, o mezcladas en distintas proporciones con *Pinus pinaster*. La gestión de estas masas se orienta a la producción conjunta de madera y piña, buscando masas semiregulares que presenten bajas densidades de arbolado desde edades tempranas. La gestión de gran parte de estas masas recae sobre la Administración, estando catalogadas en su mayoría como montes de utilidad pública. Dentro de la región de estudio se ha seleccionado como caso de estudio el grupo de montes de Viana de Cega, con unas 6000 ha de superficie, y que agrupa a los MUP 24, 35, 43, 44, 45, 58 y 59 de Valladolid.

- Zona de estudio 2: Pinares costeros de Andalucía Occidental

Esta región abarca los pinares situados mayoritariamente en el este de la provincia de Huelva y en la costa gaditana. Crecen entre el nivel del mar y los 200 m de altitud. Las masas se desarrollan sobre sedimentos terciarios marinos, y terrenos cuaternarios, tales como depósitos aluviales, terrazas arenosas, dunas y playas fósiles. Se trata de los pinares más termófilos de la especie, con una temperatura media anual de 19°C, con inviernos suaves, sin heladas y un largo periodo de sequía que alcanza los 5 meses. La precipitación media es de 550 mm anuales. Los pinares más próximos al mar están formados por árboles de poca altura, pero que tienen un gran interés como protectores y fijadores de los suelos arenosos (duna de Mazagón), unido al valor paisajístico en el entorno (Doñana). La silvicultura de estos pinares ha estado tradicionalmente relacionada al interés protector de la masa como fijadora de terreno, y la piña se ha considerado un aprovechamiento secundario de piña. Los pinares situados más lejos del mar crecen sobre arenas más enriquecidas, con mayor porcentaje de materia orgánica y menor influencia de los vientos marinos, alcanzándose mayores calidades de estación. En estas masas interiores se ha venido aplicando tradicionalmente una silvicultura orientada a la protección y a la producción de madera con una producción secundaria de piña. Son masas con estructura regular, mantenidas en densidades elevadas, si se compara con la densidad de los pinares fruteros. Dentro de la región se ha seleccionado como caso de estudio el monte catalogado: grupo ordenado de Almonte (HU-50003-AY), perteneciente al Ayuntamiento de Almonte, con 8000 ha de superficie, y ubicado en las llanuras interiores.

- Zona de estudio 3: Pinares de los Valles del Tiétar y del Alberche

Estos pinares están situados entre el sureste de la provincia de Ávila, suroeste de la provincia de Madrid y norte de la provincia de Toledo, ocupando una superficie cercana a 30000 ha. En este territorio las masas de pinar aparecen entre 600 y 1000 metros de altitud, en las estribaciones orientales de la Sierra de Gredos y occidentales de la Sierra de Guadarrama. Son masas que ocupan laderas con fuerte pendiente, salpicadas de afloramientos graníticos y berrocales. Los suelos presentan texturas arenosas a muy arenosas, con baja capacidad de retención de agua. Las precipitaciones oscilan entre 500 y 1000 mm anuales, con un gradiente marcado por la altitud. La temperatura media anual en el territorio se sitúa en torno a 14 °C. Son masas cuya vocación preferente actual es el uso recreativo, paisajístico y la producción de piña, manteniendo un importante objetivo secundario ganadero, orientándose la gestión a la creación y mantenimiento de las estructuras multiedad. Dentro de la región se ha seleccionado como caso de estudio el grupo de montes de Hoyo de Pinares (MUP 70, 72, 73 y 75 de Ávila).

- Zona de estudio 4: Pinares de repoblación de Sierra Morena

En este territorio se incluyen las masas procedentes de repoblación localizadas en el norte de las provincias de Huelva, Sevilla, Córdoba y Jaén y Sur de Badajoz y Ciudad Real. Las masas se localizan en un paisaje de orografía muy accidentada, ocupando altitudes comprendidas entre 200 y 800 m. Estos pinares se asientan sobre materiales muy antiguos de naturaleza silíceo. Los suelos son ácidos, con texturas francas a arenosas, y con baja fertilidad. Por su amplia extensión superficial a lo largo de Sierra Morena se produce una variabilidad climática caracterizada por la pérdida de influencia de los vientos húmedos oceánicos y el aumento de la continentalidad hacia el este, oscilando la precipitación media anual entre 500 mm en los pinares jienenses y 1000 mm en la Sierra de Aracena. La temperatura media anual es elevada, oscilando entre 15 y 19 °C, sin presencia de heladas. La superficie supera las 100000 ha, conformando grandes superficies coetáneas, repobladas mayoritariamente entre 1950 - 1970. El objetivo preferente de estas masas es el protector frente a la erosión, con vocación secundaria productiva de madera y piña. En el momento de su instalación las repoblaciones se realizaron a altas densidades, superando los 2000 pies ha<sup>-1</sup>. La gestión actual se basa en la aplicación de claras moderadas para preservar su función protectora, ya que la producción de piña es baja y la recolección muy costosa, salvo en enclaves especiales. Dentro de la zona de estudio 4 se ha seleccionado como caso de estudio la finca Lugar Nuevo en Jaén (T.M. Andújar y Marmolejo), pertenencia del Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente y gestionada por el

Organismo Autónomo de Parques Nacionales. La finca tiene una superficie de 9230 ha, de las cuales unas 4700 están ocupadas por repoblaciones de pinar con una edad actual de entre 30 y 70 años.

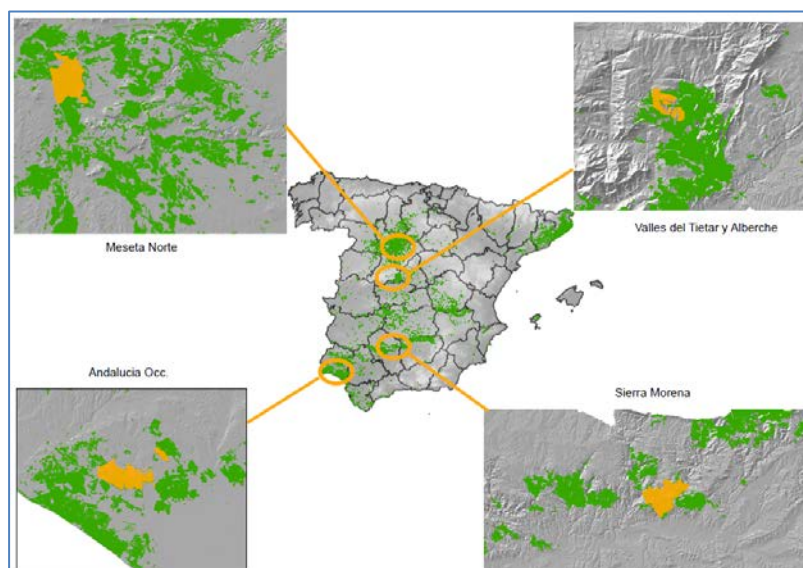


Figura 1. Zonas de estudio y localización de los pinares caso de estudio dentro de cada zona

### 3.2. Modelo PINEA2

PINEA2 es un modelo de árbol individual independiente de la distancia para la gestión integral de masas puras regulares de *Pinus pinea* (CALAMA et al. 2007). Originalmente desarrollado para las masas de la Meseta Norte, en la actualidad ha sido calibrado también para los Valles del Tietar y del Alberche (CALAMA et al. 2016). Asimismo se ha desarrollado PINEA\_REPO (CALAMA et al. 2009) una versión específica para las repoblaciones de Sierra Morena y Submeseta Sur. PINEA2 es un sistema modular que permite simular el crecimiento y producción (madera, piñas y leñas) de un rodal de *Pinus pinea* bajo distintas alternativas de gestión (definidas por el turno y la programación de claras). El modelo simula la evolución de cada árbol del rodal. Para el presente trabajo se ha utilizado la versión que simula en “pasos” de cinco años asumiendo el clima actual, aunque en la actualidad se está desarrollando una anualización del modelo sensible a futuros escenarios climáticos (CALAMA et al. 2016). Las variables de entrada del modelo incluyen un listado del diámetro de los pies del rodal, la superficie del mismo, edad y altura dominante. PINEA2 incluye los siguientes módulos:

- Módulo auxiliar: incluye las funciones requeridas para calcular a partir de las variables de entrada variables como el área basimétrica, la densidad de masa, fracción de cuba cubierta, índices de Reineke y Hart-Becking, índices de competencia, diámetro medio y dominante, altura media y dominante.
- Módulo de calidad de estación
- Módulo de estado, que incluye cuatro submódulos:
  - Tamaño de árbol: utiliza las relaciones alométricas para escribir el estado de los pies del rodal en cada instante.
  - Producción de madera: incluye la función de perfil que permite la predicción de volumen con clasificación final de productos junto con la función de definición del nivel de pudrición de la madera por *Phellinus pini*.
  - Biomasa: incluye las funciones de biomasa para árbol completo y fracciones, así como los factores de conversión de biomasa en CO<sub>2</sub> absorbido.

- Producción de piña: aunque se dispone de modelos para la producción anual sensibles al clima, en el presente trabajo al centrarnos en clima actual, se van a utilizar los modelos de producción media por árbol para periodo de cinco años.
- Módulo de transición: permite definir el estado de un rodal a una edad  $t+5$  a partir del estado del mismo a la edad  $t$ , e incluye el modelo para predecir el incremento en diámetro de los pies y la función de mortalidad por autoaclareo.

Como salidas de PINEA2 se obtienen para cada periodo de 5 años de simulación (i) atributos de masa: densidad, área basimétrica, diámetro y altura media y dominante; (ii) volumen maderable en pie, total, extraído, por árbol individual, clasificado de acuerdo a su uso final y nivel de producción; (iii) producción de piña anual y acumulada, por ha y árbol; (iv) biomasa acumulada y en pie, por fracciones, y  $\text{CO}_2$  fijado; (v) crecimientos corrientes y medios en volumen y biomasa; (vi) un listado con las dimensiones (altura, diámetros, copa...) y producciones de cada pie del rodal. PINEA2 se encuentra implementado en tres simuladores de rodal (PINEA2\_v.0 para Meseta Norte, PINEA2\_SC para Valles del Tiétar y del Alberche y PINEA\_REPO para las repoblaciones de Sierra Morena), que pueden ser descargados libremente en la página web: (<https://sites.google.com/site/regeneracionnatural/pinea2>).

### 3.3. Tablas de producción de selvicultura variable

La calibración del modelo PINEA2 para los pinares costeros de Andalucía Occidental se está llevando a cabo actualmente en el marco del proyecto de investigación RTA-2013-00011-C02-00, "Vulnerabilidad y Adaptación de las masas de *Pinus pinea* al cambio climático". Por esta razón, para simular la selvicultura actual en esta zona de estudio se han utilizado tablas de producción de madera y piña de selvicultura variable presentadas en Montero et al. (2004). Estas tablas presentan la evolución de un rodal regular bajo distintas alternativas de gestión, entre las que se encuentra la selvicultura actual de la zona de estudio considerada en este trabajo. Las tablas se han mejorado para poder realizar estimaciones de clasificación de volumen maderable según uso final, nivel de pudrición de madera por *Phellinus pini*, fracción de biomasa y carbono fijado. La única limitación es que al no disponer las tablas de un módulo de desagregación diamétrica, de los indicadores de servicios ecosistémicos asociados a la diversidad estructural (ver sección *Definición de indicadores de GFS*) únicamente puede calcularse el relativo al área basimétrica de pies remanentes tras la corta.

## 4. Métodos

### 4.1. Selviculturas propuestas

Para cada uno de los cuatro casos de estudio se ha definido una selvicultura modelo, representativa de lo que aplica en la actualidad en la zona de estudio. Estas selviculturas se han descrito a partir de lo considerado en los Proyectos de Ordenación de los montes de la zona, bibliografía general sobre selvicultura de la especie (Montero et al. 2004, Montero et al. 2008), así como un proceso de intercambio de información y discusión con los técnicos gestores de las zonas de estudio. Las selviculturas propuestas se resumen en:

- Grupo de Montes de Viana de Cega: partiendo de una densidad inicial de 500 pies  $\text{ha}^{-1}$ , turno de 120 años, aplicando dos claras bajas a los 25 y 45 años de edad, reduciendo la densidad hasta 150 pies  $\text{ha}^{-1}$ . A los 100 años se plantea la realización de una corta-preparatoria diseminatoria, bajando la densidad hasta 75 pies  $\text{ha}^{-1}$ , planteándose un periodo de regeneración de 25-30 años. Al finalizar del turno se propone dejar 6-10 pies  $\text{ha}^{-1}$  como reservorios de diversidad y grandes productores de fruto. Es una selvicultura orientada a la producción mixta de madera y mixta.
- Grupo de Montes del Hoyo de Pinares: partiendo de una densidad inicial de 800 pies  $\text{ha}^{-1}$ , turno de 150 años, cuatro intervenciones a lo largo del ciclo, tres claras bajas a los 20, 40 y 60 años,

reduciendo la densidad hasta 125 pies ha<sup>-1</sup>, más una corta selectiva a los 90 años, dejando los mejores 75 pies/ha, que se mantienen hasta los 120 años, cuando se propone comenzar las cortas aclaratorias en un periodo de regeneración de 30 años. Al finalizar el turno se propone dejar 15 pies ha<sup>-1</sup> como reservorios de diversidad y grandes productores de fruto. Es una selvicultura orientada a la producción de piña y la transformación hacia masas semirregulares.

- Lugar Nuevo: partiendo de una densidad inicial de 1000 pies ha<sup>-1</sup>, turno de 90 años, claras bajas a los 35 y 50 años, reduciendo la densidad hasta 250 pies ha<sup>-1</sup>. Corta selectiva a los 70 años, dejando 150 pies ha<sup>-1</sup>. A los 80 años se plantea la realización de una corta diseminatoria, bajando la densidad hasta 75 pies ha<sup>-1</sup>, planteándose un periodo de regeneración de 10 años, y la sustitución total de la masa. Es una selvicultura orientada a la producción de madera de calidad en turnos cortos y al mantenimiento de espesuras suficientes que garanticen la producción frente a la erosión.

- Pinares Ordenados de Almonte: se parte de una densidad inicial de 900 pies ha<sup>-1</sup>, turno de 120 años, claras a los 35, 40 y 70 años, reduciendo la densidad hasta 625, 400 y 220 pies ha<sup>-1</sup>. A los 100 años comienzan a aplicarse las cortas de regeneración, planteándose un periodo de regeneración de 20 años para la sustitución total de la masa. Es una selvicultura orientada a la producción de biomasa y a la protección frente a la erosión.

En la definición de las selviculturas planteadas se han considerado otros tratamientos intermedios como limpias, podas o clareos precomerciales, no incluidos en el presente análisis. Para más detalle se pueden consultar la descripción completa de las selviculturas en (<https://sites.google.com/site/regeneracionnatural/proyecto-rta2013-00011-c02-00/difusion-y-transferencia>)

#### 4.2. Definición de indicadores de GFS

En el marco del presente trabajo analizamos dieciséis indicadores de Gestión Forestal Sostenible, obtenidos o modificados a partir de los definidos en MCPFE (2002). Estos indicadores han sido seleccionados tras un proceso de discusión participativa con distintos agentes implicados en la gestión de las masas de pino piñonero en el marco del proyecto RTA-2013-00011-C02-00, y se caracterizan además porque pueden obtenerse directamente a partir de las salidas del modelo PINEA2 o de la tabla de producción mejorada (salvo los indicados expresamente). Estos indicadores pueden agruparse en cinco categorías distintas.

##### *Existencias y contribución al ciclo de carbono:*

- Volumen total (V, m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>): calculado como el volumen medio en pie en la masa a lo largo del ciclo productivo
- Área Basimétrica total (AB, m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>): calculado como el área basimétrica media en la masa a lo largo del ciclo productivo.
- Stock de carbono (C, t ha<sup>-1</sup>). Calculado como el promedio del carbono acumulado en la biomasa área a lo largo del ciclo productivo propuesto.

##### *Producción*

- Producción madera: crecimiento medio anual de la masa (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>), calculada como el volumen de madera total producido a lo largo del ciclo productivo (contando extracciones), dividido por el turno.
- Producción media de piña (kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>), calculada como la producción total de piña a lo largo del ciclo productivo, dividido por el turno.
- Producción media de leñas (t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>), obtenido a partir de la producción de biomasa de leñas finas y leñas gruesas a lo largo del ciclo productivo, dividido por el turno.

##### *Ingresos económicos:*

- Renta media asociada a la producción de madera y leñas (€ ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>): ingreso medio anual a lo largo del ciclo productivo asociado al aprovechamiento maderero, asumiendo que el coste de la madera varía según su uso final y su nivel de afección por *Phellinus pini*:
  - o Madera de sierra (trozas > 35 cm), nivel de afección I, II, III, IV: 45, 40, 30 y 25 € m<sup>-3</sup> respectivamente.
  - o Madera de trituración: 20 € m<sup>-3</sup>.
  - o Leñas: 10 € / t.
- Renta media asociada al aprovechamiento de piña (€ ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>): ingreso medio anual a lo largo del ciclo productivo asociado al aprovechamiento de piña, asumiendo que el coste de la piña varía según la producción media por árbol (rendimiento de recogida):
  - o Producción por árbol < 1 kg: 0.10 € kg<sup>-1</sup>; 1-5 kg: 0.25 € kg<sup>-1</sup>; > 5 kg: 0.45 € kg<sup>-1</sup>.
- Renta total (€ ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>): suma de las dos anteriores
- VAN (€ha<sup>-1</sup>): valor actualizado a comienzo del ciclo de los ingresos anuales por aprovechamientos, suponiendo una tasa de descuento del 3%.

#### *Diversidad estructural:*

- Estructura horizontal (CV\_dbh): coeficiente de variación de los diámetros normales del rodal calculados en el momento en que dan comienzo las cortas de regeneración.
- P9010: diferencia entre los percentiles 90 y 10 de la distribución diamétrica de los pies del rodal, calculados en el momento en que dan comienzo las cortas de regeneración.
- Estructura vertical (CV\_H): coeficiente de variación de las alturas del rodal calculados en el momento en que dan comienzo las cortas de regeneración.
- LST>50: Número de pies con diámetro normal > 50 cm en el momento en que dan comienzo las cortas de regeneración.
- Área basimétrica (BA\_extra, m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>) de extramaduros remanentes al finalizar el turno.

#### *Cobertura*

- FCC (%): calculado como la fracción de cabida cubierta media mantenida en la masa a lo largo del ciclo productivo.

### 4.3. Simulaciones

Se ha procedido a simular la evolución de un rodal modelo de calidad intermedia en cada caso de estudio, aplicando la selvicultura actual propuesta. Las calidades de estación, definidas como la altura dominante del rodal a los 100 años de edad, consideradas como intermedias en cada caso de estudio, no son las mismas. En el presente trabajo se han simulado rodales puros y regulares con índice de calidad de estación 16,5 m en Viana de Cega y Montes del Hoyo de Pinares, 17,5 m en los montes de Almonte y 18,5 m en Lugar Nuevo. Las simulaciones se inician a los 20 años de edad, partiendo de los diámetros iniciales y espesuras definidas en cada selvicultura. La simulación abarca el turno completo definido en cada selvicultura, acabando en el momento en el que se realiza la corta final del rodal. La simulación se realiza asumiendo un escenario climático actual, lo que permite utilizar modelos no sensibles al clima.

### 4.4. Análisis de los datos

En una primera fase se ha llevado a cabo un análisis exploratorio sobre los valores obtenidos para los 16 indicadores, utilizando un análisis de componentes principales al objeto de identificar patrones de correlación y agrupación entre los indicadores, y entre éstos y los casos de estudios. Asimismo, se ha realizado una comparación entre casos de estudio sobre los 16 valores de indicadores en su conjunto, utilizando un análisis de la varianza. Al objeto de poder incluir indicadores con gran disparidad en cuanto a las unidades se ha procedido a estandarizar cada indicador, restándole a cada valor la media correspondiente a los cuatro casos de estudio, y dividiendo por su



desviación típica. El análisis de la varianza entre casos de estudio se ha realizado también considerando en conjunto los indicadores correspondientes a los cuatro grandes grupos de servicios ecosistémicos (existencias y almacenamiento de carbono, ingresos, diversidad y producción). Por último, se ha utilizado un diagrama de estrella o ameba para representar en global la sostenibilidad de la silvicultura aplicada por medio de los valores alcanzados en cada indicador para los distintos casos de estudio, estandarizando en este caso a valores entre 0 y 1 (dividiendo el valor obtenido por el valor máximo observado en los cuatro casos).

## 5. Resultados

La tabla 1 muestra el valor obtenido para cada uno de los indicadores a partir de la simulación de la silvicultura actualmente aplicada. El caso de estudio Hoyo de Pinares presenta los mayores valores en los indicadores correspondientes a producción de piña, renta de piña, renta total, y diversidad estructural, mientras que presenta bajos valores en los indicadores asociados a existencias medias y producción maderera. Por el contrario, el caso de estudio Ordenados de Almonte presenta los mayores valores en los indicadores referidos a existencias medias, stock de carbono, producción y renta maderera y cobertura. Viana de Cega y Lugar Nuevo presentan valores muy similares en muchos indicadores, e intermedios de los observados en los otros dos sitios de ensayo, aunque con una mayor orientación a la producción de madera en Lugar Nuevo, y mayores valores de producción de piña y existencias y almacenamiento de carbono en Viana de Cega.

Servicio Ecosistémico	Indicador	Lugar Nuevo	Viana de Cega	Hoyo de Pinares	Almonte
Existencias y contribución al ciclo de carbono	V (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	73,8	76,1	67,1	<b>138</b>
	AB (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	12,9	13,2	10,8	<b>20,9</b>
	C almacenado (t ha <sup>-1</sup> )	28,530	33,893	28,948	<b>45,070</b>
Producción	Prod madera (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	2,605	1,775	1,518	<b>2,978</b>
	Prod leñas (t m.s ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	0,608	<b>0,689</b>	0,564	0,614
	Prod piña (kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	96,9	151,6	<b>363,2</b>	116,3
Ingresos	Renta piña (€ año <sup>-1</sup> )	8,57	28,47	<b>106,67</b>	12,386
	Renta madera (€ año <sup>-1</sup> )	61,83	46,20	34,01	<b>64,49</b>
	Renta anual (€año <sup>-1</sup> )	70,40	74,67	<b>140,68</b>	76,88
	VAN (€)	1016	753	<b>2090</b>	1104
Diversidad estructural	CV_dbh	0,059	0,056	<b>0,085</b>	na
	CV_H	0,027	0,028	<b>0,048</b>	na
	P9010 (cm)	5,19	6,97	<b>9,93</b>	na
	LSLT>50	0	<b>38</b>	34	0
	BA_extra (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	0	1,41	<b>4,5</b>	0
Cobertura	FCC	42,5	33,3	26,2	<b>66,2</b>

Tabla 1. Cuantificación de los distintos indicadores para cada caso de estudio (en negrita se indica el caso más favorable para cada indicador)

El análisis de componentes principales sobre los 13 indicadores comunes en las cuatro regiones de estudio permite definir dos ejes que en conjunto explican más del 96% de la variabilidad total observada (Figura 2). Se observa una clara agrupación de los indicadores asociados a producción maderera, existencias y almacenamiento de carbono, otra agrupación de los parámetros asociados a la producción de piña y una tercera de los valores económicos agregados (VAN y renta anual total). El primer eje, que explica un 72,6% de la variabilidad total, se define por valores positivos

asociados a los indicadores referidos a producción maderera, existencias, almacenamiento de carbono y cobertura, y por valores negativos asociados la producción de piña y a la diversidad estructural. Estos resultados indican la dificultad para compatibilizar la optimización de la producción de madera y el almacenamiento de carbono, frente a la optimización de la producción de piña y el aumento de la diversidad estructural, parámetros estos últimos relacionados positivamente entre sí. El segundo eje, de más difícil explicación, asocia valores positivos de pies gruesos, leñas y existencias en general frente al VAN. La ubicación de los casos de estudio en el diagrama del análisis de componentes principales revela que Lugar Nuevo y Almonte se asocian con los indicadores de producción de madera, existencias y almacenamiento de carbono, mientras que Hoyo de Pinares se asocia con la producción de piña y la diversidad estructural, y Viana de Cega ocupa una posición intermedia.

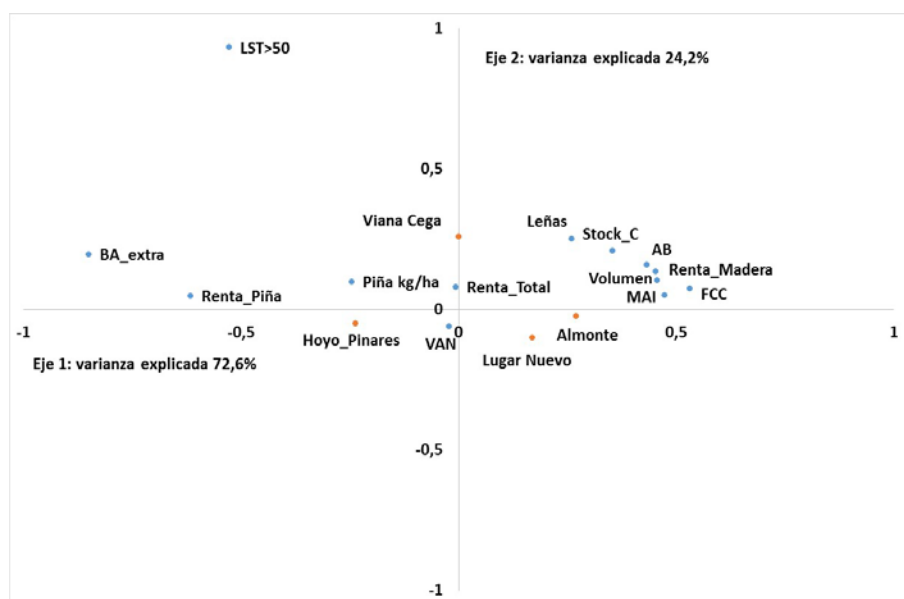


Figura 2. Análisis de componentes principales para los distintos indicadores (salvo diversidad estructural) y casos de estudio

El análisis de la varianza entre regiones sobre los valores estandarizados de los distintos indicadores, sin considerar ponderación alguna, revela que existen diferencias significativas ( $p$ -valor  $< 0,05$ ) entre Hoyo de Pinares y Almonte con respecto a Lugar Nuevo, y menos significativas ( $p$ -valor  $< 0,10$ ) con respecto al caso de estudio Viana de Cega (figura 3). Debe indicarse en este caso que al no disponer de datos para los indicadores de estructura horizontal y vertical en Almonte el promedio para ese caso de estudio puede estar sobreestimado. En cualquier caso, es importante destacar que en este análisis se da el mismo peso a todos los indicadores, por lo que los resultados indican que tanto Almonte como Hoyo de Pinares concentran los mayores valores de indicadores individuales, aunque correspondientes a distintos servicios ecosistémicos. Al realizar el análisis por separado para cada servicio ecosistémico general, agregando los indicadores estandarizados de cada servicio (figura 3), se observa cómo la silvicultura actual aplicada en el caso de estudio Hoyo de Pinares es significativamente superior al resto en diversidad e ingresos, mientras que la silvicultura de Almonte conduce a valores agregados de los indicadores de existencias y almacenamiento de carbono significativamente superiores al resto. No se observan diferencias entre casos de estudio en los indicadores asociados a la producción, lo que nuevamente apunta a que la optimización de la producción maderera implica reducciones en la producción de piña y viceversa.

Por último, el diagrama de estrella o de ameba (figura 4) muestra nuevamente la polarización en los indicadores correspondientes a Hoyo de Pinares, con una silvicultura que optimiza la diversidad, la producción de piña, la provisión anual de rentas y el VAN, frente a los de Almonte, donde se optimizan las existencias, el almacenamiento de carbono y la producción de madera. Las

selvicultura propuestas en el caso de estudio Viana de Cega presenta valores intermedios en prácticamente todos los indicadores, apuntado a que, sin llegar a optimizar ningún servicio, puede resultar en una buena alternativa de compromiso. Por último, la selvicultura aplicada en el caso de estudio Lugar Nuevo, aunque optimiza la producción de madera minimizando la producción de piña, no llega a ser tan eficiente en estos indicadores en comparación con Almonte.

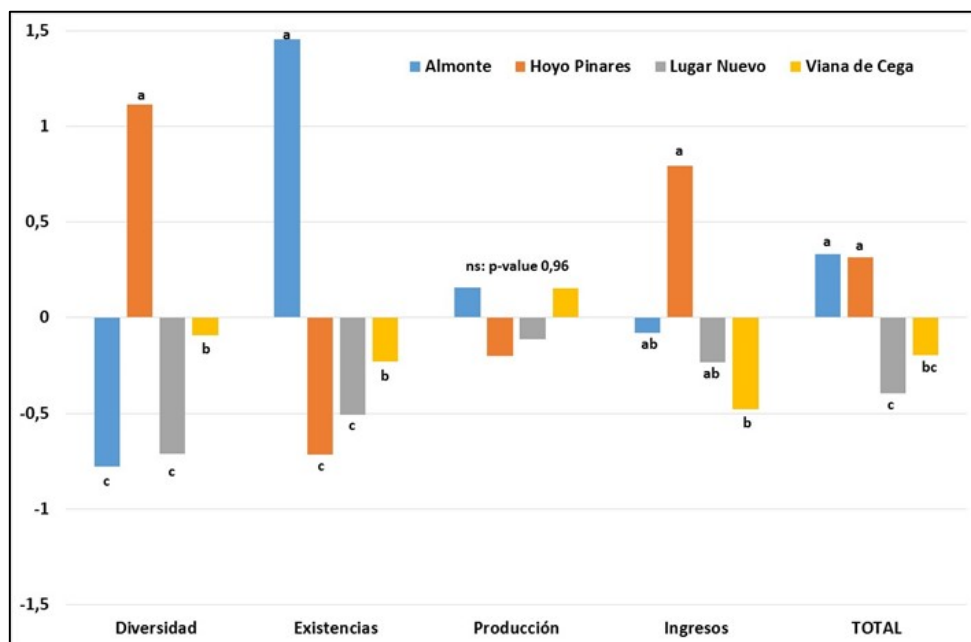


Figura 3. Análisis de la varianza interregional para los distintos servicios ecosistémicos y total. Barras con la misma letra indican diferencias no significativas entre regiones

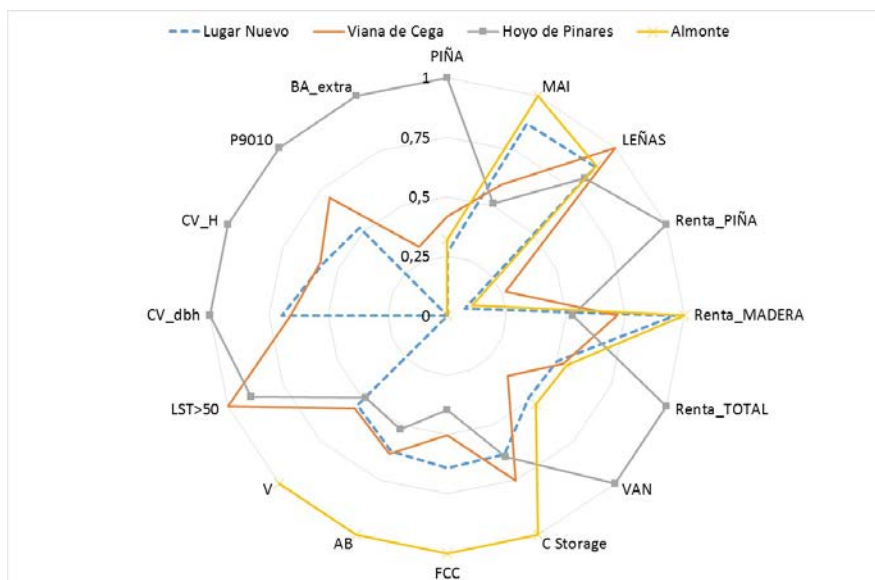


Figura 4. Diagrama de araña para evaluar la sostenibilidad de la gestión actual en los distintos casos de estudio

## 6. Discusión y conclusiones

Los resultados apuntan a la existencia de patrones de agrupación y de incompatibilidad o compromiso entre los distintos indicadores de gestión forestal sostenible estudiados. Entre los

primeros cabe destacar la asociación positiva entre los indicadores orientados a la producción de madera (en volumen total así como en renta maderera) y los asociados al mantenimiento en pie de existencias y almacenaje de carbono. Esta asociación se optimiza en la silvicultura aplicada en el caso de estudio Almonte, donde se aprovecha al máximo la ocupación del espacio, llegando a valores de espesura muy cercanos a los de comienzo de mortalidad por autoaclareo, cifrados en torno a un índice de Reineke de 600 (MONTERO Y CANDELA, 1998). Otra asociación positiva se observa entre los indicadores asociados a diversidad estructural y la producción de piña, apuntando a que las estructuras más diversas son mejores productoras de piña, resultado en concordancia con los estudios previos (DEL RÍO et al. 2016). En este caso, la silvicultura aplicada en Hoyo de Pinares, tendente a alargar los turnos y a orientar la masa hacia estructuras abiertas semirregulares optimiza tanto la producción de fruto como la diversidad estructural. En cuanto a los compromisos entre servicios, debe resaltarse como la aplicación de una silvicultura orientada a la producción de piña implica una reducción en la producción maderera, así como en las existencias y el carbono almacenado. Sin embargo, y debido al elevado precio actual de la piña en comparación con el de la madera y las leñas, las rentas y el VAN se optimizan maximizando la producción de fruto. La consideración en estas partidas del precio del C almacenado, así como una valoración de la diversidad estructural asociada, podrá alterar de forma notable estos resultados (OVANDO et al. 2010).

El análisis de los casos de estudio revela las marcadas diferencias entre las silviculturas aplicadas en Almonte y en Hoyo de Pinares, optimizando la primera las existencias y la producción de madera, y la segunda la producción de piña y la diversidad estructural. Ambos casos de estudio definen dos polos opuestos, en los que cualquier modificación de la gestión orientada a mejorar algunos de los servicios deficitarios (p.ej. la producción de piña en Almonte) debiera hacerse a expensas de la reducción de otro de los servicios (en este caso el stock de carbono). En cualquier caso, a la hora de elegir la silvicultura a aplicar deben tenerse en cuenta factores propios de cada caso. Los pinares de Almonte tienen bajas producciones de piña, en parte motivados por su cercanía al mar y escasez de precipitaciones estivales, que redundan en mortalidad de flores durante el primer verano. Por otra parte, son zonas con alta calidad de estación, y al ser zonas llanas tienen una explotación maderera sencilla, sucesos ambos que pueden justificar su orientación hacia una silvicultura para la producción de madera. El caso de estudio de Hoyo de Pinares presenta alta producción de fruto, asociada a una mayor precipitación y difícil explotación maderera, lo que justifica su orientación hacia la producción de piña. En cualquier caso, unas gestiones tan polarizadas pueden conducir a sistemas poco resilientes, en los que una pequeña alteración en un factor extrínseco - pérdidas en la producción de fruto asociadas a un agente exótico, como *Leptoglossus occidentalis*, o mortalidad por decaimiento asociado a estrés hídrico en masas muy densas - puede conducir a graves desequilibrios. En este sentido, la silvicultura propuesta en Viana de Cega supone una solución de compromiso entre ambas tendencias, lo que puede dotarle de una mayor plasticidad a la hora de reorientar los objetivos de la gestión en escenarios cambiantes. Por último, la silvicultura aplicada en Lugar Nuevo no resulta en una optimización de ninguno de los indicadores. En el caso de esta finca debe tenerse en cuenta la gran disparidad de condiciones ambientales, abarcando un gradiente altitudinal de 400 metros de diferencia entre las zonas bajas y las zonas altas. En este sentido, parece recomendable proponer orientar la gestión hacia la producción de piña en las zonas más altas, reduciendo las densidades, mientras que en las zonas bajas podría optarse por una silvicultura más orientada a la producción de madera y biomasa.

Los resultados anteriores indican que las silviculturas propuestas cubren los objetivos de gestión planteados ante un escenario climático actual. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que bajo los escenarios climáticos predichos para el futuro, donde para el entorno Mediterráneo se prevé una significativa reducción de la precipitación y aumento de las temperaturas, debe reevaluarse la validez de estos esquemas de gestión y analizar la provisión de servicios ecosistémicos asociados. Estos análisis - al igual que el presentado en este trabajo - se están llevando a cabo en la actualidad en el marco del proyecto RTA-2013-00011-C02-00.

## 7. Agradecimientos

El presente trabajo se ha desarrollado en el marco del proyecto RTA-2013-00011-C02-00, “Vulnerabilidad y adaptación de los pinares de *Pinus pinea* frente al cambio climático” y del convenio “PROPINEA”

## 8. Bibliografía

CALAMA, R. SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, M., MONTERO G. 2007. Management oriented growth models for multifunctional Mediterranean forests: the case of stone pine (*Pinus pinea* L.) .EFI Proceedings, 56:57-70 ([www.efi.int/portal/virtual\\_library/publications/proceedings/56/](http://www.efi.int/portal/virtual_library/publications/proceedings/56/) )

CALAMA, R., DEL RÍO, M., SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, M., MADRIGAL, G., GARRIGA, E., MORO, J. , MONTERO, G. 2009. Modelo para la gestión multifuncional de repoblaciones de *Pinus pinea* L. en Sierra Morena y Meseta Sur. Ponencia oral en 5º Congreso Forestal Español. Mesa 2. Ávila, septiembre 2009

CALAMA R, GORDO J, MADRIGAL G, CONDE M, BRAVO-OVIEDO A, LÓPEZ-SENEPLEDA E, GALLARDO C, DE DIOS-GARCÍA J, MONTERO G, VÁZQUEZ-PIQUÉ J, PARDOS M . 2016. Cone production in *Pinus pinea* forests facing climate change: proposals for adaptive management. Conference Wild Forest Products in Europe. 13–14 October 2016. Barcelona, Spain

DEL RÍO M., BARBEITO I., BRAVO-OVIEDO A., CALAMA R., CAÑELLAS I., HERRERO C., BRAVO F. 2017 Carbon sequestration in Mediterranean pine forests. En F. BRAVO et al. (ed.), Managing Forest Ecosystems: the challenge of Climate Change, 2ND Edition. Kluwer Academic Publishers.

MÄKELA A., RÍO M., HYNYNEN J., HAWKINS M.J., REYER C., SOARES P., VAN OIJEN M., TOMÉ M. 2012. Using stand-scale forest models for estimating indicators of sustainable forest management - Forest Ecology and Management 285 (2012) 164–178

MCPFE, 2002. Improved Pan-European Indicators for Sustainable Forest Management as Adopted by the Ministerial Conferences on the Protection of Forests in Europe (MCPFE) Expert Level Meeting 7–8 October 2002. MCPFE Liaison Unit, Vienna

MONSERUD, R.A., 2003. Evaluating forest models in a sustainable forest management context. For. Biol. Model. Inf. Sci. 1, 35–47

MONTERO, G., CANDELA, J.A. 1998. Manual de claras para repoblaciones de *Pinus pinea* L. Junta de Andalucía – EGAMSA. 47 pp.

MONTERO, G., RUIZ-PEINADO, R., CANDELA, J.A., CAÑELLAS, I., GUTIERREZ,M., PAVÓN, J., ALONSO, A., del RÍO, M., BACHILLER, A. , CALAMA, R. 2004. Selvicultura de *Pinus pinea* L. (Cap. 3) En El Pino piñonero (*Pinus pinea* L.) en Andalucía: Ecología, Distribución y Selvicultura, p. 113-252. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía

MONTERO, G., CALAMA R, RUIZ PEINADO R . 2008. Selvicultura de *Pinus pinea* L. En MONTERO G., SERRADA R, REQUE J (Eds.) Compendio de Selvicultura de Especies, pp 431-470. INIA – Fundación Conde del Valle de Salazar

OVANDO, P., CAMPOS, P., CALAMA, R., MONTERO, G. 2010. Landowner net benefit from Stone pine (*Pinus pinea* L.) afforestation of dry-land cereal fields in Valladolid, Spain. Journal of Forest Economics 16(2): 83-100. doi:10.1016/j.jfe.2009.07.001