



Universidad de Valladolid
Campus de Palencia

Escuela Técnica Superior de

Ingenierías Agrarias

**Máster en Investigación en Ingeniería para la
Conservación y Uso Sostenible de Sistemas Forestales**

**MODELIZACIÓN DE LA GESTIÓN FORESTAL
DEL MONTE “PINAR GRANDE” (SORIA) BAJO
DISTINTOS ESCENARIOS UTILIZANDO
TÉCNICAS MULTICRITERIO**

Autor: Jorge Aldea Mallo

Director: Luis Díaz Balteiro

Tutor: Fernando Martínez Peña

Junio, 2014

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	3
ABSTRACT.....	4
1. ANTECEDENTES.....	5
2. OBJETIVOS.....	7
3. MATERIAL Y MÉTODOS.....	7
3.1. Principales características del área de estudio.....	7
3.2. Escenario determinista.....	10
3.2.1. <i>Producción y precio de madera</i>	10
3.2.2 <i>Producción y precio de las setas</i>	11
3.2.3. <i>Carbono capturado</i>	14
3.3. Escenario no determinista.....	15
3.4. El modelo de planificación de cortas.....	15
3.4.1. <i>Definición del modelo de GP</i>	16
3.4.2. <i>Restricciones</i>	18
3.4.3. <i>Definición de criterios</i>	18
4. RESULTADOS.....	23
4.1. Matrices de pago.....	23
4.2. Encuesta a stakeholders.....	24
4.3. Modelo LGP.....	25
5. DISCUSIÓN.....	26
6. CONCLUSIONES.....	29
7. BIBLIOGRAFÍA.....	30

RESUMEN.

La gestión de productos forestales no maderables tiene gran transcendencia en la actualidad, de modo que la gestión forestal requiere adecuadas herramientas para el cálculo de estos nuevos criterios y su integración en los actuales planes de gestión. En el presente estudio se exponen y discuten modelos de gestión del monte "Pinar Grande" (Soria) que permiten integrar objetivos maderables (producción de madera procedente de cortas finales de *Pinus sylvestris* L. y estructura de monte normal) y no maderables (recolección de setas, captura de carbono y rentabilidad económica). Para ello se han empleado técnicas de decisión multicriterio a través de dos escenarios, uno determinista y otro no determinista en relación a precios de madera y precios y producciones de *Lactarius* gr. *deliciosus* y *Boletus edulis*.

Las preferencias de los diferentes stakeholders se han integrado en distintos aspectos en la construcción de un modelo de programación de futuras cortas del monte, como en la elección del método de decisión multicriterio. Estas técnicas permiten encontrar soluciones eficientes para solventar el nivel de conflicto existente entre los diferentes criterios. Finalmente el modelo establecido se basó en la programación por metas lexicográficas (lexicographic goal programming model, LGP) incorporando distintos pesos para cada uno de los cinco criterios arriba señalados, según las preferencias de estos stakeholders.

Los resultados obtenidos en el escenario determinista revelan la existencia de una solución eficiente y muy próxima a las preferencias de los stakeholders. La solución obtenida refleja un nivel de logro del 73 % con respecto al ideal para el criterio de volumen de corta, del 70 % respecto del ideal para la estructura de monte normal, del 89 % respecto del ideal para la recolección de setas, del 76 % del ideal para la rentabilidad de la masa y del 68% con respecto a la captura de carbono. En el escenario no determinista se constata una importante variación en el criterio de recolección de setas y en menor medida en el criterio de rentabilidad (58% y 16% respectivamente comparando con el escenario determinista). Dichas diferencias están ocasionadas fundamentalmente al introducir el riesgo asociado a la producción fúngica y en menor medida debida al de los precios de las setas y de la madera.

ABSTRACT.

Non-wood forest products provide important recreational and commercial activities, so that forest management requires new and specific tools to integrate correctly these resources into forest management planning. This study is focused in a strategic forest management in "Pinar Grande" (Soria) to integrate classic forestry objectives (timber yield from final fellings of *Pinus sylvestris* L. and stand structure which replicate the idea of normal forest) and non-wood forest products (mushrooms harvest, carbon sequestration and net present value). Multi-criteria decision making techniques were used in two scenarios; one deterministic and non deterministic regarding prices and yields of *Lactarius gr. deliciosus* and *Boletus edulis* species.

The preferences of different stakeholders were take into account to choice the goal programming model and to define some aspects of this technique. These procedures allow find an efficient solution to solve the conflict between the different management criteria. Finally, a lexicographic goal programming model (LGP) was used, which incorporate different weights for each of the five criteria outlined above, according to the preferences of stakeholders.

The results obtained in the deterministic scenario reveal the existence of an efficient solution and very close to the stakeholders' preferences. It has an achievement level of 73% with respect to the ideal criteria regarding timber yield, 70% from the ideal for the normal forest idea, 89% from the mushrooms harvest, 76% of ideal for the net present value and 68% with respect to carbon sequestration. In the non-deterministic scenario high variation was found in the mushrooms harvest criteria and to a lesser extent in the net present value criteria (58% and 16% respectively compared to the deterministic scenario). These differences are basically caused by introducing the risk associated with the edible mushrooms yield and less due to the different prices considered in this study.

1. ANTECEDENTES.

En los últimos años ha ganado importancia la gestión de productos forestales no maderables (PFNM) como la producción de setas o la fijación de carbono y otros bienes y servicios sin valor de mercado, debido a que en ambientes mediterráneos estos productos superan habitualmente al valor generado por las producciones de madera (Sánchez-González *et al.*, 2007; Palahí *et al.*, 2009).

Sin embargo, pese a la importancia de estos recursos, habitualmente los proyectos de ordenación no los consideran y, en el mejor de los casos, los relegan a un objetivo secundario subordinado a la producción de madera (Aldea *et al.*, 2011). Esto se ha traducido en la escasez de herramientas de apoyo a la decisión de la gestión basadas en la optimización de la producción no maderable (Calama *et al.*, 2010). Por tanto, la gestión forestal requiere adecuadas herramientas para el cálculo de los valores óptimos de estos nuevos criterios y para su integración en los actuales planes de gestión forestal.

De acuerdo con ello, existen algunos ejemplos que constatan la posibilidad de integrar estos recursos en los planes de gestión forestal por medio de herramientas de optimización, confirmando la importancia económica de los mismos. Díaz-Balteiro *et al.*, (2003) demostraron que la producción de setas de un monte de repoblación de *Pinus sylvestris* L. en Zamora (España) genera un ingreso regular a lo largo del tiempo, contribuyendo a una producción sostenida del monte. De forma análoga, Palahí *et al.* (2009) reflejaron la importancia económica del recurso fúngico en montes de *Pinus sylvestris* y *Pinus nigra* Arn. en los Pirineos Catalanes, concluyendo que el valor de éste recurso supera con creces el generado por la madera. Por otra parte, Aldea *et al.* (2012), en un escenario determinístico, incluyen la producción de madera y la producción de hongos en la planificación forestal del monte "Pinar Grande", que es el mismo caso de estudio en este trabajo, por medio de un modelo de programación compromiso, reflejando de nuevo la importancia económica de este recurso.

De forma análoga, en los últimos años ha aumentado el número de estudios que consideran los montes como sumidero de dióxido de carbono (CO₂), haciendo de éstos una herramienta para contribuir a la mitigación del calentamiento climático. Este propósito está basado siguiendo indicaciones gubernamentales tanto a nivel internacional (IPCC, 2003; European Commission, 2013) como nacional (MAGRAMA,

2002). En este sentido, Bravo *et al.*, (2008a) destacan la importancia de la fijación de carbono en pinares, especialmente en lugares de baja calidad de estación, demostrando que dicha fijación permite complementar en términos económicos otros objetivos tradicionales de la gestión forestal.

Estos trabajos muestran la complejidad de la planificación forestal debido principalmente a la multifuncionalidad de los sistemas forestales que hace que haya un número elevado de criterios implicados en las decisiones de gestión (Díaz-Balteiro & Romero, 2008). Por tanto, los problemas de optimización que subyacen a la planificación forestal deberían ser formulados bajo el paraguas de la teoría de decisión multicriterio, debido al problema asociado a la existencia de un cierto nivel de conflicto entre objetivos que impiden que todos sean simultáneamente optimizados. Así, las técnicas de decisión multicriterio permiten encontrar soluciones eficientes en el sentido de que no existe otra solución factible que pueda mejorar un objetivo sin empeorar alguno de los restantes (Steuer, 1989).

Por otro lado, la complejidad de la mayoría de los problemas forestales está creciendo en la actualidad debido a la necesidad de integrar las opiniones de los “stakeholders” o grupos sociales que disfrutan de los productos y servicios que ofrece el monte.

La programación por metas o “goal programming” (GP) es posiblemente la técnica de decisión multicriterio que ha sido empleada con mayor frecuencia en la gestión forestal asociada a la resolución de problemas continuos (Díaz-Balteiro *et al.*, 2013a). En el ámbito forestal, y relacionado con la ordenación de montes, esta técnica ha sido empleada para formular criterios que garanticen la consecución tradicional de estrategias que simulan el objetivo clásico de monte normal, para desarrollar esquemas de plantación donde se aúnan distintos objetivos, así como para establecer programaciones de cortas (finales e intermedias) donde se obtienen soluciones eficientes teniendo en cuenta el conflicto existente entre criterios de diferente naturaleza. Finalmente, la GP permite también diseñar modelos de decisión en grupo donde se asignan distintos pesos a los objetivos establecidos para la gestión de un sistema forestal de acuerdo con las preferencias de los distintos “stakeholders” implicados (Díaz-Balteiro *et al.*, 2009).

Por otra parte, en los últimos diez años ha aumentado el empleo de análisis no deterministas, conjuntamente con distintas técnicas multicriterio, con el fin de

considerar el riesgo o la incertidumbre de muchos de los criterios u objetivos asociados a la gestión forestal. De este modo, se ha empleado el riesgo como análisis de problemas derivados de la probabilidad de incendio, inventarios, preferencias del centro decisor, enfermedades y plagas, etc. (Díaz-Balteiro & Romero, 2008).

2. OBJETIVOS.

En el presente trabajo se exponen y discuten modelos de gestión del monte “Pinar Grande” (Soria) que permiten integrar objetivos maderables y no maderables por medio de GP a través de dos escenarios (uno determinista y otro no determinista). En concreto, el escenario no determinista abarca la consideración de variables como el precio de la madera y de los hongos, y de las producciones de algunas de las especies fúngicas con mayor demanda en este monte. Se trata pues, hasta donde se conoce, del primer estudio en el que se emplean técnicas de optimización junto con un escenario de riesgo para integrar productos forestales no madereros como los hongos. Además, en este modelo se incluyen las preferencias de los stakeholders tanto en la fijación de los pesos otorgados a cada objetivo, como en distintos aspectos asociados al diseño del modelo final de GP.

Esta metodología permite a su vez alcanzar los siguientes objetivos:

- La integración de PFNM en la gestión forestal del monte “Pinar Grande” mediante GP.
- Cuantificar el coste de oportunidad asociado a los distintos criterios considerados en este análisis, cuantificado tanto en unidades monetarias como físicas.
- Obtención de soluciones eficientes para la gestión multifuncional del monte incluyendo el riesgo en los precios y producciones de algunos de estos criterios, así como las preferencias de los stakeholders.

3. MATERIAL Y MÉTODOS.

3.1. Principales características del área de estudio.

El área de estudio está localizada en el monte de utilidad pública “Pinar Grande” situada en la zona norte de la Península Ibérica (Sistema Ibérico, 41.5–42.0° N y 2.5–3.0° W, figura 1). Este monte cubre una superficie de 12.533 ha compuesta

principalmente (más del 70 % de la superficie) por masas monoespecíficas y regulares de *Pinus sylvestris* L.. Además, dentro del monte existen pequeñas masas mixtas de esta especie junto con *Pinus pinaster* Ait. o *Quercus pyrenaica* Willd. La altitud varía entre 1.097 y 1.553 m.s.n.m. dominando las orientaciones este y oeste. La precipitación media anual es de 865 mm/año con una temperatura media de 8,8 °C.

El proyecto de ordenación del monte comenzó en 1907 y, en la actualidad, se está abordado la novena revisión con un considerable retraso de ocho años respecto a la fecha prevista para ello. Esta circunstancia ocasiona el problema de tratar con la información, en ocasiones obsoleta, sobre la gestión del monte, remitiéndose a la información presente en la octava revisión (año 1999-2005). En dicha revisión se constata que el objetivo principal de la ordenación es la producción de madera, utilizándose para ello una selvicultura basada en cortas a hecho por fajas seguida de siembra en los lugares donde no se consigue una regeneración natural. La ordenación que se ha seguido en este monte ha variado desde el método de tramos permanentes en el Proyecto de Ordenación original, hasta el método de tramo móvil aplicado en la actualidad. La división dasocrática del monte queda compuesta por cinco secciones y 27 cuarteles, conformado por un total de 135 tramos.

Desde el año 2011 se encuentra encuadrado dentro del sistema de regulación del aprovechamiento y comercialización micológico MYAS-RC, por el que la propiedad recibe un ingreso medio anual en concepto de permisos de recolección de setas por valor de 0,96 €/ha. Por otra parte, es posible diferenciar dos calidades de estación en cuanto a producción de setas de acuerdo con un análisis estadístico (ANOVA) (Martínez-Peña, 2003), de modo que se puede asumir una producción diferente para las “cañadas” (áreas de elevada humedad y pendiente inferior al 5%, de gran producción) y los testereros (zonas de pendiente superior al 5% de difícil acceso y con una producción menor de setas, véase figura 1).

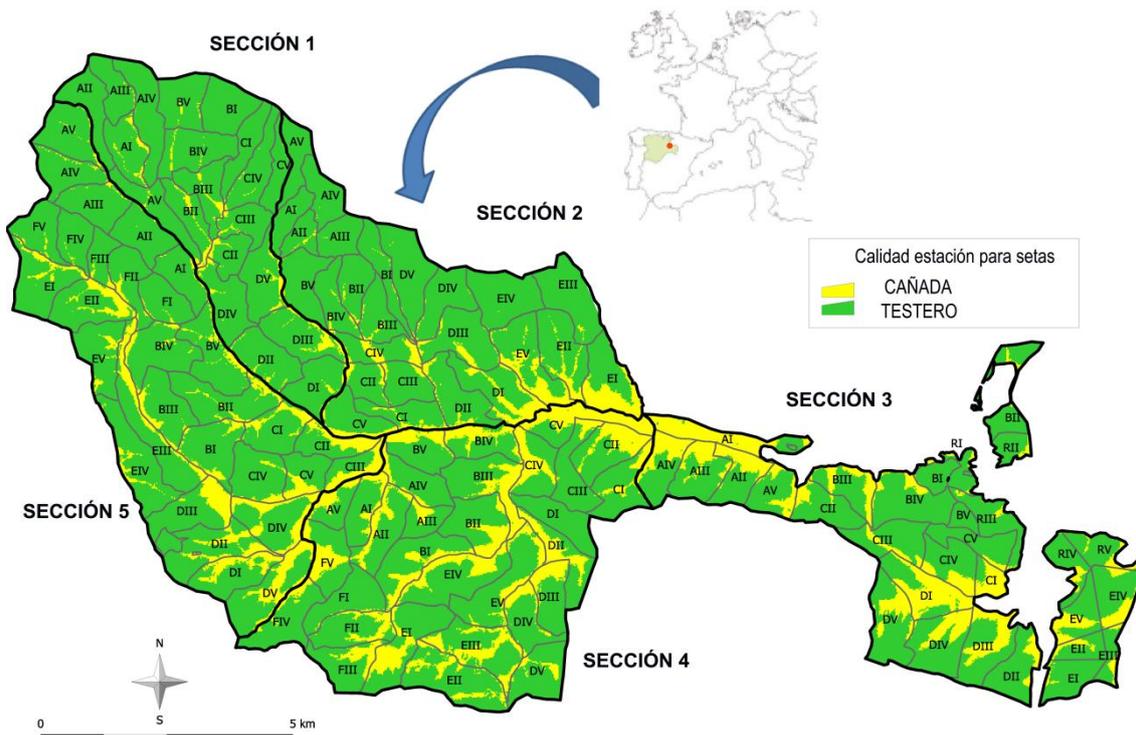


Figura 1. Localización, descripción de los tramos de ordenación de Pinar Grande y calidad de estación para la producción de setas.

A la hora de abordar el presente trabajo se tuvieron en cuenta criterios y objetivos relacionados tanto con la producción de madera y su rentabilidad económica como otros importantes PFNM presentes en el monte, además de la consecución de objetivos tradicionales en la gestión forestal. Estos criterios fueron los siguientes (explicados con mayor exactitud en el apartado 3.4.3):

1. Producción de madera.
2. Producción recolectada de *Lactarius gr. deliciosus* y *Boletus edulis*.
3. Carbono capturado.
4. Rentabilidad obtenida en el monte de ambos productos (madera y hongos).
5. Obtención de una estructura de masa que se acerque lo más posible a la idea de monte normal.

Por otra parte, en la gestión forestal pueden existir factores de riesgo y/o incertidumbre que pueden tener gran importancia en la gestión como pueden ser los precios o las producciones físicas en sí. Por ello, para llevar a cabo la gestión de Pinar Grande se han considerado dos escenarios, uno determinista y otro no determinista. En el

primero de ellos se consideran hipótesis de producción y precios invariables en el tiempo, mientras que en el segundo escenario (no determinista) se considera la presencia de un riesgo que puede afectar a la cuantía o valor de los productos generados en el monte. A continuación se describen con detalle cada uno de los escenarios descritos.

3.2. Escenario determinista.

Para la construcción de la planificación de cortas del monte (véase apartado 3.4.) se consideró un horizonte de planificación o turno de transformación de 100 años, comenzando en el año 2013, divididos en 10 periodos (la mitad del periodo de regeneración empleado en el proyecto de ordenación) en el que, por convención, las futuras cortas se refieren al punto medio de cada periodo. Sin embargo, la producción fúngica se considera año a año, de forma que se suman convenientemente las producciones a lo largo de cada uno de los periodos. Por otro lado, en el escenario determinista las variables a emplear en el análisis no están sujetas a fluctuaciones en el tiempo.

3.2.1. Producción y precio de madera.

A pesar de la existencia de otras especies maderables, para este criterio solamente se consideró la producción asociada a *Pinus sylvestris*, ya que representa más del 70% de las existencias e ingresos derivados de su aprovechamiento. Las predicciones de crecimiento de madera fueron estimadas según tablas de producción (Rojo & Montero, 1996) empleadas para la gestión actual del monte (en la octava revisión se constató la incorrecta asignación de calidades y estimación de producciones siguiendo el trabajo de García-Abejón, 1981). Para la estimación de la producción futura de madera se tuvo en cuenta tanto la calidad de estación, la edad y el área basimétrica actual para cada tramo. A pesar de que no se han considerado las cortas de otras especies, se ha supuesto que en el futuro se mantienen las proporciones iniciales entre especies.

Por otro lado, a pesar de que las claras se han tenido en cuenta en la gestión del monte, solamente se consideraron los ingresos procedentes de cortas finales, debido a que las cortas de mejora son autofinanciables, permitiendo así reducir la complejidad estructural del modelo.

Para la determinación de los ingresos obtenidos por las cortas de madera, se tuvo en cuenta el precio de adjudicación de las cortas finales de la especie *P.sylvestris* en el monte durante el periodo de tiempo 2002-2013. Dichos precios se actualizaron de acuerdo con el IPC normalizado al año 2013, de modo que se trabajó con precios constantes. La figura 2 refleja la distribución de los precios derivados de las cortas finales durante dicho periodo, obteniendo un precio medio de 50,9 €/m³.

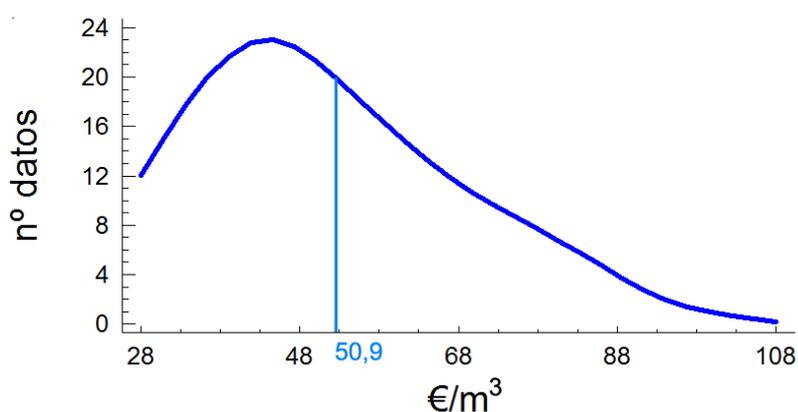


Figura 2. Función de distribución de los precios actualizados en 2013 para las cortas finales de *P.sylvestris* en el periodo 2002-2013 . Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, para determinar el coste de gestión del monte, se ha calculado un coste global anual de acuerdo con el plan de ordenación actual de “Pinar Grande”, estimándose un coste de 39,7 €/ha y año, cifra ya actualizada según el IPC en el año 2013.

3.2.2 Producción y precio de las setas.

La producción de setas depende tanto de factores bióticos como abióticos, aunque existe un consenso en la literatura que constatan a la meteorología y edafología como factores de mayor influencia (Martínez de Aragón *et al.*, 2007; Kausrud *et al.*, 2008; Bonet *et al.*, 2008). Como consecuencia de ello se ha constatado una elevada variabilidad de producciones de acuerdo con factores como la temperatura y la precipitación otoñal (Martínez-Peña *et al.*, 2012).

Para estimar las producciones de setas, se dispone de un diseño experimental aleatorio de acuerdo con las clases de edad del arbolado en la gestión actual del

monte: 0-15, 16-30, 31-50, 51-70, 71-90 y más 90 años de edad. De este modo, 18 parcelas valladas de 150m² se distribuyen entre las clases de edad en zonas de vaguada (“cañadas”) y fueron muestreadas durante los años 2002-2013. Los muestreos se realizaron semanalmente durante las semanas 35 a 50 de los años citados coincidiendo con la estación de mayor producción de setas (otoño). Un total de 40 especies pertenecientes a 26 géneros fueron recolectados, destacando *Boletus edulis* Bull.:Fr. y *Lactarius gr. deliciosus* (L.) Gray como las especies más abundantes y de mayor importancia económica. La figura 3 muestra la variabilidad de las producciones según clase de edad del arbolado para ambas especies fúngicas de los años 2002-2013. En dicha figura queda representado el valor medio de la producción (altura de columna) por clase de edad del arbolado para *Boletus edulis* (azul) y *Lactarius gr. deliciosus* (rojo), así como la desviación típica para cada una de ellas (desde cero, en años muy secos, hasta la longitud de la barra de error).

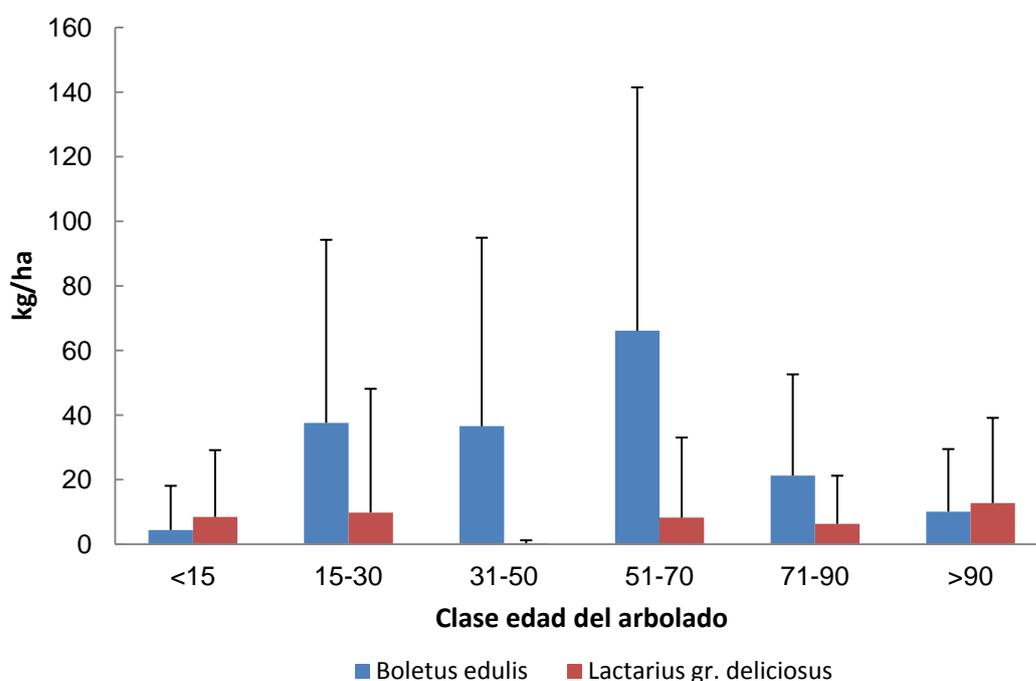


Figura 3. Producciones fungicas según clase de edad del arbolado en Pinar Grande para el periodo 2002-2013. Fuente: elaboración propia

Para estimar la diferencia de producciones entre calidades de estación para la producción fúngica (cañadas y testereros) se diseñó un inventario semanal durante los años 2004-2006 por medio de transectos (nueve transectos en cada calidad de estación distribuido homogéneamente entre las clases de edad), determinando unos

ratios de producción entre “cañadas” y “testeros” de 4,12:1 para *Boletus edulis* y de 5,16:1 para *Lactarius gr. deliciosus*. De este modo, las producciones anuales para la calidad de estación “testeros” fueron calculadas en base a dichas relaciones asumiendo semejantes para todas las clases de edad.

Asimismo, la comparación entre las producciones de las parcelas valladas y los transectos, permiten estimar un ratio de recolección del 53% en la calidad de estación denominada como “cañadas”, y un 32% de la producción potencial en los “testeros” (Martínez-Peña, 2003). Esta información fue empleada para estimar las cantidades recolectadas dentro de los modelos de gestión propuestos en este estudio. Es decir, se ha asumido que no ha variado desde entonces dicho ratio de recolección.

Por otra parte, el precio pagado al recolector de las setas se caracteriza también por una elevada variabilidad inter e intra-anual, generada por la variación de las producciones y de los precios marcados por mercados nacionales e internacionales. Ante la imposibilidad de emplear información sobre precios procedentes de comerciantes locales de setas en el entorno del monte, se utilizó información de mercados centrales. Para el caso de la especie *Lactarius gr. deliciosus*, se utilizó información semanal de precios de Mercabarna, actualizados también hasta el año 2013 según IPC (Díaz-Balteiro *et al.*, 2013b), mercado de gran importancia para estos productos durante el periodo de tiempo 2002-2013 (figura 4). Finalmente, el precio medio asignado para esta especie fue de 12,5 €/kg.

Sin embargo, para la especie *Boletus edulis* no se halló información alguna ni en mercados nacionales ni en los pequeños comerciantes del entorno del monte, de modo que se adoptó un precio medio pagado al recolector procedente de encuestas a pie de campo en Pinar Grande (Martínez-Peña *et al.*, 2007). Los precios procedentes de dicho estudio se actualizaron al año 2013 según IPC, asumiendo finalmente un precio medio para *Boletus edulis* de 6,4 €/kg. Esta cifra se considera conservadora, ya que existen evidencias de precios superiores en función de la fecha y condiciones internacionales de mercado.

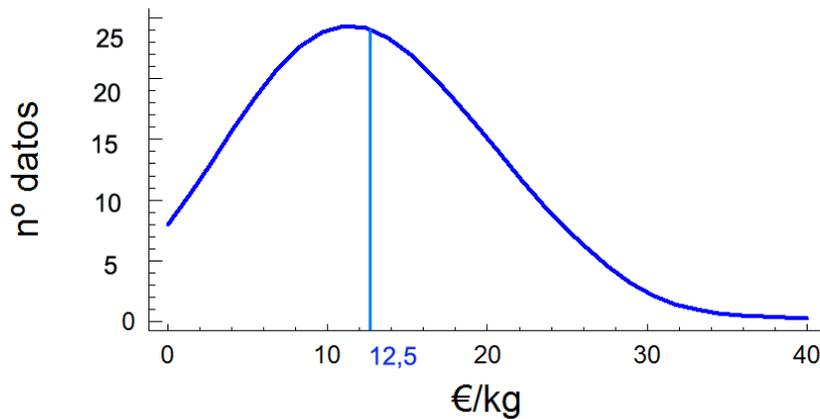


Figura 4. Función de distribución de los precios semanales actualizados en 2013 para *Lactarius gr. deliciosus* según Mercabarna en el periodo 2002-2013 . Fuente: elaboración propia a partir de Diaz-Balteiro *et al.*, (2013b).

Por otra parte, se asume un precio por cada kg recolectado de setas pero no un coste derivado de dicha recolección dado que no se analiza esta producción desde un punto de vista privado. Finalmente, para el cálculo de la rentabilidad económica (valor actual neto o VAN) de la producción de madera y setas se asumió una tasa de descuento del 2 %, valor habitualmente empleado para este tipo de masas (Diaz-Balteiro & Prieto, 1999; Aldea *et al.*, 2012).

3.2.3. Carbono capturado.

En el presente estudio se han empleado las ecuaciones para el cálculo de biomasa de las distintas partes del arbolado (biomasa de fuste, ramas, ramillas, hojas y raíces) descritas en Ruiz-Peinado *et al.*, (2011) para *P.sylvestris*. Para el cálculo de la cantidad de carbono secuestrado, no se ha considerado el carbono fijado en el suelo debido principalmente a la falta de datos sobre la variación anual del carbono existente en el suelo.

Para la transformación de biomasa a carbono capturado por el arbolado, se empleó el ratio de 50,9 cg de C/g madera, propuesto por Montero *et al.*, (2005). Por otra parte, los bosques también pueden ser fuentes de carbono por medio de extracción de madera por cortas, incendios, deforestación, plagas y/o enfermedades, así como una ausencia de gestión adecuada que lleva al estancamiento de la masa o disminución

del crecimiento. De este modo, se puede definir el carbono neto como el balance resultante expresado como diferencia entre el fijado debido al crecimiento de la masa menos las emisiones de carbono. Para el cálculo de este carbono neto fijado a lo largo del horizonte de planificación se descontaron las emisiones procedentes de la extracción de madera de las cortas finales, obviando la emitida por los incendios forestales ya que no se dispone de una estimación fiable de la probabilidad anual de éstos en el monte.

3.3. Escenario no determinista.

Para este segundo escenario, se emplearon conjuntamente técnicas de optimización junto con un escenario de riesgo asociado a la producción de hongos (de elevada variabilidad en función de factores meteorológicos) y de precios para la especie *Lactarius gr. deliciosus* y para el precio de madera. Como se mencionó anteriormente, la imposibilidad de obtener un registro histórico de precios pagados al recolector para *Boletus edulis*, hizo que se excluyera esta variable en este análisis. Para realizar el estudio de riesgo se empleó el programa informático @RISK (®Palisade Corporation).

Una vez elegidas las variables objetivo que se pretenden simular (descritas anteriormente), el siguiente paso consistió en determinar la distribución de probabilidad que mejor se ajustaba al registro histórico de los datos (2002-2013) teniendo en cuenta test estadísticos y gráficos. Seguidamente, se estableció el número de interacciones con el que generar la información de salida de acuerdo con la distribución ajustada. Después se ejecutó una simulación y calculó cientos de veces según dicha distribución hasta obtener unos resultados convergentes. Finalmente, se analizaron los resultados y se dieron nuevos valores de producción para cada clase de edad del arbolado para ambas especies de setas, así como nuevos precios para la recolección de niscaló y madera.

3.4. El modelo de planificación de cortas.

El modelo de gestión forestal empleado en este trabajo se corresponde una planificación de tipo estratégico mediante la que se pretende establecer una programación de cortas finales en el tiempo que permita obtener una solución eficiente de acuerdo con los criterios, restricciones, y demás elementos considerados en dicho modelo. Para ello se define de forma que abarque todas las cortas previstas para cada

unidad de gestión a considerar en el horizonte de planificación (2013-2113). Cada una de estas prescripciones (superficies de corta) engloba aspectos como las edades a las cual se realizan las cortas finales, que permite establecer una corriente futura de inputs y outputs. Siguiendo a Johnson & Scheurman (1977) el modelo seguido se conoce como Modelo I y para ello se parte de las características intrínsecas de cada unidad de gestión según el plan de ordenación actual del monte (véase figura 1). Las unidades de gestión (258 unidades en total) se definieron combinando las calidades de estación para madera y las establecidas para la producción de setas. La edad de corta comprendía el rango entre 80 y 140 años, estableciéndose un total de 1.682 prescripciones de corta para la totalidad del monte. Una descripción más detallada de este modelo se puede consultar en Aldea *et al.* (2011).

3.4.1. Definición del modelo de GP.

A través de programación lineal (LP), se intentó optimizar todos los criterios de gestión introduciendo algunos de ellos como restricciones exógenas, pero las soluciones obtenidas no eran factibles, ya que presentan un nivel de conflicto muy acentuado entre ellas. Esto se puede constatar por medio de la construcción de una matriz de pagos que consiste en una matriz cuadrada resultante de optimizar cada criterio separadamente. Para superar este problema, el empleo de GP permite la incorporación de diversos criterios conjuntamente, con una cierta flexibilidad en el cumplimiento de los objetivos establecidos.

La estructura matemática de GP se compone para la i -enésima meta de:

$$f_i(X) + n_i - p_i = t_i \quad \text{donde:} \quad [1]$$

$f_i(X)$ es la expresión matemática para el atributo i -enésimo, es decir, función del vector X de las prescripciones de corta.

t_i = objetivo para el atributo i -enésimo, es decir, el nivel de logro que se considera aceptable para el atributo i -enésimo.

n_i = variable de desviación negativa, es decir, cuantificación de la subestimación del nivel de logro i -enésimo.

p_i =variable de desviación positiva, es decir, la cuantificación de la sobrestimación del nivel de logro i -enésimo.

Una vez formulada las metas e identificadas las variables de desviación no deseadas, esto es, aquellas que se desean minimizar, el siguiente paso es el de generar el modelo de GP adecuado. La mayoría de los trabajos en los que se emplea la GP, las funciones de logro están definidas de forma arbitraria, de manera que no se capture las características esenciales de la realidad forestal analizada (Díaz-Balteiro *et al.*, 2013a). Para evitar esto, se realizó una encuesta a los stakeholders implicados en la gestión del entorno del monte Pinar Grande. En concreto, se realizaron 40 encuestas a autoridades públicas, propietarios forestales privados, micólogos y recolectores de setas, expertos de centros de investigación y Universidades, así como excursionistas y ciudadanos que disfrutaban de actividades de ocio en este monte.

Las encuestas se enviaron por correo electrónico en formato digital y constaban de un total de 23 preguntas ordenadas por apartados. En primer lugar se preguntaba por la importancia de los bienes y servicio generados por el monte. Seguidamente por la importancia de los diferentes criterios de gestión considerados en el presente trabajo, la comparación de estos mismos criterios dos a dos para el establecimiento de pesos para cada criterio y de una pregunta que intentaba justificar qué modelo de GP debería ser empleado en este estudio. También se recogió el nivel de logro aceptable para cada criterio respecto de su valor óptimo, así como la importancia o peso según la tipología de cada stakeholder y por último, preguntas referentes a la gestión del aprovechamiento micológico.

La información obtenida de la encuesta se empleó para definir la estructura exacta del modelo GP y los niveles de logro aceptables para cada criterio. En este sentido, en la mayoría de los casos reales de gestión forestal, las preferencias de los agentes implicados no quedan bien reflejadas únicamente por medio de una simple variante de GP, sino que requiere una combinación de funciones de logro, como ocurre en este caso. Como se explicará en los apartados 4.2 y 4.3, el modelo finalmente empleado fue el de Programación Lexicográfica por metas (LGP). Este modelo consiste en cumplir una serie de metas de acuerdo con un orden de importancia, es decir, que los stakeholders asocian prioridades excluyentes a las diferentes metas (el logro de las metas situadas en cierta prioridad es inconmensurablemente preferido al logro de cualquier otro conjunto de metas situadas en una prioridad más baja). Para esta

metodología muchos autores recomiendan agrupar los objetivos del problema de GP, de manera que conformen un número relativamente pequeño de prioridades, no más de tres o cinco (Romero, 1991; Jones & Tamiz, 2010).

3.4.2. Restricciones.

Para la definición del modelo de GP se tuvieron en cuenta conjuntamente tres restricciones con el fin de asegurar un escenario realista. La primera de ellas consiste en asegurar que la superficie de corta a lo largo del horizonte de planificación para cada unidad de gestión no sea mayor que es en la realidad. Estas son las restricciones endógenas necesarias para asegurar el correcto funcionamiento del modelo y que se definen de la forma siguiente:

$$\sum_{j=1}^J X_{ij} = B_i \quad [2]$$

donde X_{ij} es la superficie de corta para la unidad de gestión i de acuerdo con la prescripción j de modo que la suma de todas ellas no sea superior a B_i que es la superficie total de la unidad de de gestión.

Además, se estableció la restricción de una superficie mínima de corta de 1 ha en cada unidad de gestión, estimando que valores inferiores a esta superficie no son realistas, debido al incremento de costes que supone realizar el aprovechamiento en áreas tan reducidas. Finalmente, se determinó la condición de que el ingreso generado por la recolección de setas debiera ser necesariamente superior al obtenido por la adjudicación del aprovechamiento de acuerdo con el proyecto MYAS-RC.

3.4.3. Definición de criterios.

Como se ha comentado anteriormente, en este trabajo se han considerado para la gestión del monte aquellos criterios productivos, económicos y técnicos que se han estimado presentan una mayor importancia en la gestión del monte, y que pudieran ser objeto de una modelización a lo largo de todo el horizonte de planificación. De acuerdo con la estructura matemática de GP, estos objetivos se plantean en forma de metas tal y como se detallan a continuación:

1. **Producción de madera.** Este criterio persigue estimar la producción de madera (m³) procedente de las cortas finales al terminar el horizonte de planificación.

$$\sum_{i=1}^{258} \sum_{j=1}^J V_{ij} X_{ij} + n_V - p_V = t_V V^* \quad [3]$$

donde V_{ij} es el volumen de corta para la prescripción j de la unidad de gestión i , X_{ij} es la superficie de corta de la prescripción j de la unidad de gestión i , n_V es la variable de desviación negativa, p_V es la variable de desviación positiva, t_V es nivel aceptable de logro para este criterio según las preferencias de los stakeholders y V^* es el valor máximo (valor ideal) que se obtiene cuando se optimiza este criterio por separado atendiendo exclusivamente a las restricciones endógenas. Por tanto, la variable de desviación no deseada a minimizar sería n_V .

2. **Recolección de setas.** Mediante este criterio se estima la cantidad de setas recolectadas (kg) de acuerdo con la producción de la masa forestal en función de las clases de edad del arbolado, de la accesibilidad y calidad de estación para la producción fúngica y de las tasas de recolección del monte.

$$\sum_{i=1}^{258} \sum_{j=1}^J S_{ij} X_{ij} + n_S - p_S = t_S S^* \quad [4]$$

donde S_{ij} es la cantidad de setas recolectadas (*Boletus edulis* y *Lactarius gr.deliciosus*) en la prescripción j de la unidad de gestión i , X_{ij} es la superficie de corta de la prescripción j de la unidad de gestión i , n_S es la variable de desviación negativa, p_S es la variable de desviación positiva, t_S es nivel aceptable de logro según las preferencias de los stakeholders y S^* es el valor máximo de setas recolectadas que se obtiene cuando se optimiza este criterio por separado atendiendo exclusivamente a las restricciones endógenas. Por tanto, estaríamos hablando de una meta del tipo “más mejor”, y la variable de desviación no deseada a minimizar sería n_S .

3. **Carbono capturado.** Este criterio busca estimar el carbón fijado por el arbolado (toneladas de C) a lo largo del horizonte de planificación.

$$\sum_{i=1}^{258} \sum_{j=1}^J (\gamma(BV_{ij}^f + BH_{ij}) - CE_{ij}) X_{ij} + n_{CB} - p_{CB} = t_{CB} CB^* \quad [5]$$

donde γ es el contenido medio de carbono por t de biomasa de madera (0,509 t de C/t de biomasa de madera) BV_{ij}^f es la biomasa generada por el volumen final de la masa para la prescripción j de la unidad de gestión i a lo largo del horizonte de planificación, BH_{ij} es la biomasa generada por el volumen de corta extraído a lo largo del horizonte de planificación para la prescripción j de la unidad de gestión i , CE_{ij} es la cantidad de carbono emitida en toneladas para la prescripción j de la unidad de gestión i de acuerdo con los diferentes residuos y tipo de productos finales procedente de las cortas (Row & Phelps, 1996), X_{ij} es la superficie de corta de la prescripción j de la unidad de gestión i , n_{CB} es la variable de desviación negativa, p_{CB} es la variable de desviación positiva, t_{CB} es nivel aceptable de logro según las preferencias de los stakeholders y CB^* es el valor máximo de carbono que se puede alcanzar en el monte que se obtiene cuando se optimiza este criterio por separado atendiendo exclusivamente a las restricciones endógenas. Por tanto, la variable de desviación no deseada a minimizar sería n_{CB} .

4. **Rentabilidad económica obtenida en el monte.** Esta rentabilidad se asimila al VAN derivado de las cortas de madera y de la recolección de setas (*Boletus edulis* y *Lactarius gr. deliciosus*). Con ello se persigue estimar el ingreso asociado a la producción de estos dos productos al final del horizonte de planificación. Sus unidades son monetarias (€).

$$\sum_{i=1}^{258} \sum_{j=1}^J (NPVm_{ij} + NPVs_{ij})X_{ij} + n_{NPV} - p_{NPV} = t_{NPV}NPV^* \quad [6]$$

donde $NPVm_{ij}$ es valor actual neto generado por las cortas de madera y $NPVs_{ij}$ el correspondiente a la recolección de setas en la prescripción j de la unidad de gestión i , X_{ij} es la superficie de corta de la prescripción j de la unidad de gestión i , n_{NPV} es la variable de desviación negativa, p_{NPV} es la variable de desviación positiva, t_{NPV} es el nivel aceptable de logro según las preferencias de los stakeholders y NPV^* es el valor máximo que se obtiene cuando se optimiza este criterio por separado atendiendo exclusivamente a las restricciones endógenas. Por tanto, al igual que en los criterios precedentes, la variable de desviación no deseada a minimizar sería n_{NPV} .

5. **Estructura de monte normal.** Mediante este criterio se persigue simular a lo largo de los próximos 100 años una estructura que se considera ideal para

asegurar los principios básicos de la gestión forestal y que así se recoge en la última revisión del proyecto de ordenación: estabilidad, persistencia y rentabilidad de la masa. Este criterio equivale a cumplir conjuntamente estos tres objetivos:

- a. **Regulación.** Este objetivo persigue lograr una distribución de edades equilibrada (que cada clase de edad del arbolado ocupe la misma superficie) al finalizar el horizonte de planificación.

$$\sum_{i=1}^{258} \sum_{j=1}^{J=A} X_{ijA} + n_A - p_A = t_n X_A \quad [7]$$

donde X_{ijA} es la superficie que ocupa al final del horizonte de planificación la prescripción j perteneciente a la clase de edad A en la unidad de gestión i , n_A es la variable de desviación negativa, p_A es la variable de desviación positiva, t_n es el nivel aceptable de logro según las preferencias de los stakeholders y X_A es la superficie que debería tener cada clase de edad de forma que todas ellas ocuparan la misma superficie. Por tanto, la variable de desviación no deseada a minimizar sería la suma de las variables de desviación (n_A+p_A) para todas las clase de edad.

- b. **Inventario final.** Mediante este objetivo se intenta asegurar la persistencia de la masa haciendo que las existencias maderables en el monte sean similares a las iniciales.

$$\sum_{i=1}^{258} \sum_{j=1}^J V_{ij}^f X_{ij} = V_k^f$$

$$V_k^f + n_f - p_f = t_n V_k^I \quad [8]$$

donde V_{ij}^f es el volumen de madera al final del horizonte de planificación para la prescripción j en la unidad de gestión i , X_{ij} es la superficie de corta de la prescripción j perteneciente a la unidad de gestión i , V_k^f es el volumen final en la sección k (1...5) del monte, n_f es la variable de desviación negativa, p_f es la variable de desviación positiva, t_n es el nivel aceptable de logro según las preferencias de los stakeholders y V_k^I es el volumen de madera al inicio del horizonte de planificación para la sección k . Por tanto, la variable de desviación no deseada a minimizar

sería la suma de las variables de desviación n_f+p_f para cada una de las secciones del monte, ya que se considera que la estructura actual del mismo es satisfactoria.

- c. **Igualdad de cortas en cada período.** Con la finalidad de conseguir una previsión de rentas homogéneas, se establece el objetivo de que el volumen asociado a las cortas finales sea similar en cada periodo del horizonte de planificación.

$$\sum_{i=1}^{258} \sum_{j=1}^J V_{ij} X_{ij} = H_l$$

$$H_{l+1} - t_n H_l + n_{lH} - p_{lH} = 0; \quad l = 1, \dots, L - 1 \quad [9]$$

donde V_{ij} es el volumen de madera en el periodo de planificación l para la prescripción j en la unidad de gestión i , X_{ij} es la superficie de corta de la prescripción j perteneciente a la unidad de gestión i , t_n es el nivel aceptable de logro según las preferencias de los stakeholders, H_l es el volumen de corta en el periodo l , n_{lH} es la variable de desviación negativa para el periodo l y p_{lH} es la variable de desviación positiva para el periodo l . Por tanto, la variable de desviación no deseada a minimizar serían la suma de las variables de desviación $n_{lH}+p_{lH}$ para todos los periodos de planificación.

De acuerdo con lo explicado, para que se cumpla la condición de estructura normal del monte se agregó y normalizó (para trabajar con variables adimensionales) las condiciones de regulación, inventario final y flujo de volumen. Por tanto, el criterio de estructura normal se cumple cuando la suma de las variables de desviación no deseadas de los tres criterios anteriores (variables a minimizar) es próxima a cero:

$$\min = \left\{ \frac{1}{r_1} \sum_{l=1}^{L-1} (n_{lH} + p_{lH}) + \frac{1}{r_2} \sum_{A=1}^A (n_A + p_A) + \frac{1}{r_3} \sum_{k=1}^K (n_f + p_f) \right\} \quad [10]$$

donde r_1 , r_2 y r_3 son los factores de normalización (Romero, 1991), obtenidos como diferencia de los valores máximos y mínimos de los respectivos criterios, valores obtenidos al maximizar cada uno por separado teniendo en cuenta solamente las restricciones endógenas.

4. RESULTADOS.

4.1. Matrices de pago.

Para obtener información útil e inicial del problema de decisión multicriterio, se obtuvo la matriz de pagos (Tabla 1) para los cinco criterios considerados dentro del escenario determinista. Esta tabla detalla el valor resultante que se obtiene en el resto de criterios cuando se minimiza/n la/s variable/s de desviación para un criterio en concreto. Para ello se obtuvieron en cuenta solamente las restricciones endógenas en el citado escenario determinista. Por ejemplo, la primera columna representa el resultado obtenido al minimizar la variable de desviación no deseada en la producción de madera sujeta a las restricciones endógenas.

Tabla 1. Matriz de pagos para los cinco criterios considerados bajo el escenario determinista (valores ideales en negrita y valores anti-ideales en cursiva). Fuente: elaboración propia.

	Producción madera (m³)	Recolección Setas (kg)	Carbono capturado(t)	VAN (€)	Estructura Normal
<i>Producción madera (m³)</i>	3.615.695	1.911.489	<i>1.742.425</i>	3.423.320	2.253.409
<i>Recolección Setas (kg)</i>	7.155.902	7.972.607	7.933.012	7.731.015	<i>6.502.992</i>
<i>Carbono capturado (t)</i>	<i>277.491</i>	522.197	543.536	306.393	399.609
<i>VAN (€)</i>	97.838.280	86.514.870	85.470.730	102.919.100	<i>61.193.220</i>
<i>Estructura Normal (adimensional)</i>	<i>7,9</i>	<i>4,9</i>	<i>5,4</i>	<i>5,7</i>	0,1

Mediante esta matriz de pagos es fácil conocer el grado de conflicto existente entre los diferentes objetivos de gestión y consecuentemente analizar la posible viabilidad de los diferentes esquemas de corta derivados simplemente de la optimización. En la discusión del presente estudio se analizarán estos resultados.

Por otra parte, atendiendo al análisis de las variables consideradas para el escenario no determinista, se estableció un nuevo precio pagado al recolector para *Lactarius gr. deliciosus* (12,44 €/kg) y otro precio por la madera (51,44€/m³). En el caso del análisis de riesgo de la producción de las especies fúngicas, estas variaciones fueron

estimadas por clase de edad del arbolado siguiendo el registro histórico de producciones semanales para ambas especies durante 2002-2013. La incorporación de esta nueva información al modelo modificó los resultados obtenidos cuando se minimiza la/s variable/s de desviación para algunos de los criterios considerados. De este modo, se obtuvo de forma análoga la matriz de pagos correspondiente con el escenario no determinista (Tabla 2). Más adelante se discutirán estos resultados.

Tabla 2. Matriz de pagos para los cinco criterios considerados bajo el escenario no determinista (valores ideales en negrita y valores anti-ideales en cursiva). Fuente: elaboración propia.

	Producción madera (m³)	Recolección Setas (kg)	Carbono capturado(t)	VAN (€)	Estructura Normal
<i>Producción madera (m³)</i>	3.615.695	2.013.018	<i>1.742.425</i>	3.425.750	2.253.409
<i>Recolección Setas (kg)</i>	<i>2.702.695</i>	3.225.487	2.899.517	2.770.103	3.020.446
<i>Carbono capturado (t)</i>	<i>277.491</i>	458.826	543.536	305.390	399.609
<i>VAN (€)</i>	83.687.630	56.142.430	70.430.700	88.083.240	<i>50.350.040</i>
<i>Estructura Normal (adimensional)</i>	<i>7,9</i>	<i>3,3</i>	<i>5,4</i>	<i>5,7</i>	0,1

4.2. Encuesta a stakeholders.

El análisis de la encuesta a los stakeholders permite justificar la forma del modelo final de GP. En primer lugar, las para los stakeholders existían dos objetivos que debían de cumplirse con extrema importancia respecto del resto, éstos son el de producción de volumen de madera y el de estructura de monte normal. Esto tiene como consecuencia a la hora de definir la estructura del modelo de GP la adopción de una variante de Programación Lexicográfica por metas o LGP. Por otro lado, el resto de criterios (recolección de setas, rentabilidad y carbono capturado) quedaría en una prioridad posterior en orden de importancia. No obstante, se acepta un carácter compensador entre todos ellos, incorporando diferentes pesos preferenciales a los criterios según la opinión de los stakeholders. Para la definición de esta realidad se optó por la determinación de un modelo ponderado de programación por metas

(WGP), el cual permite obtener una solución eficiente en el sentido que se obtiene el logro máximo promedio de los criterios considerados.

Además, a partir de dicha encuesta se obtuvieron los siguientes pesos y niveles de logro para cada uno de los criterios, en donde se constata la importancia de la rentabilidad económica que estos agentes otorgan a los aprovechamientos de Pinar Grande:

$$w_1=0.47; w_2=0.53; w_3=0.21; w_4=0.59; w_5=0.20.$$

$$t_v=0.6; t_n=0.75; t_s=0.6; t_{NPV}=0.65; t_{CB}=0.7.$$

El significado de las ponderaciones anteriormente enumeradas se detalla a continuación en el apartado siguiente, donde se describe la forma y tipo del modelo empleado atendiendo a las preferencias obtenidas a partir de la encuesta a los stakeholders.

4.3. Modelo LGP.

Según lo indicado anteriormente, el primer nivel de logro queda definido de la forma:

$$\min u_1 = \left\{ \frac{w_1}{r_1} n_V + \frac{w_2}{r_2} \sum_{l=1}^{L-1} (n_{IH} + p_{IH}) + \frac{w_2}{r_3} \sum_{A=1}^A (n_A + p_A) + \frac{w_2}{r_4} \sum_{k=1}^K (n_f + p_f) \right\} \quad [11]$$

Sujeto a las restricciones (apartado 3.4.2.) y a las igualdades correspondientes a la primera prioridad de logro (ecuaciones [3], [7], [8] y [9]), donde w_i hace referencia a los diferentes pesos y r_i son los correspondientes factores de normalización para cada uno de los criterios de acuerdo con la matriz de pagos.

El segundo programa lineal minimiza la segunda componente o nivel de logro, definido de la siguiente manera:

$$\min u_2 = \left\{ \frac{w_3}{r_5} n_S + \frac{w_4}{r_6} n_{NPV} + \frac{w_5}{r_7} n_{CB} \right\} \quad [12]$$

Sujeto tanto a las a las restricciones (apartado 3.4.2.) e igualdades correspondientes a la segunda prioridad de logro (ecuaciones [4], [5] y [6]), como a los valores de las variables de desviación resultantes de resolver la prioridad o nivel de logro primero obtenidos en la solución precedente.

Finalmente, se resolvió el modelo multicriterio basado en LGP detallado anteriormente, que obtiene el mejor esquema de cortas según las preferencias de los stakeholders, para el escenario determinista y se comparó con la solución con pesos y logros iguales a la unidad. Además se resolvió el problema de LGP de acuerdo con el escenario no determinista (Tabla 3). Como se observa en la Tabla 3, los resultados obtenidos en el escenario no determinista para los criterios de producción de madera, carbono y estructura normal del monte, coinciden con los del escenario determinista ya que no se incluyeron en el análisis de riesgo.

Tabla 3. Resultados del problema de LGP para el escenario determinista y no determinista (w_i son los pesos asociado a cada criterio y t_i los niveles de logro) Fuente: elaboración propia.

	Determinista		No Determinista $w_i \neq 1, t_i \neq 1$
	$w_i = 1, t_i = 1$	$w_i \neq 1, t_i \neq 1$	
<i>Producción madera (m³)</i>	2.375.940	2.634.970	2.634.970
<i>Recolección Setas (kg)</i>	6.721.150	7.095.220	3.012.234
<i>Carbono capturado (t)</i>	408.908	371.419	371.419
<i>VAN (€)</i>	67.072.000	78.412.510	65.995.910
<i>Estructura Normal (adimensional)</i>	0,2	0,7	0,7

5. DISCUSIÓN.

Los resultados anteriores muestran la posibilidad de encontrar una planificación de cortas que permita satisfacer las preferencias de los stakeholders en la gestión multifuncional del monte Pinar Grande de acuerdo con los cinco criterios de gestión considerados. Además, atendiendo a la Tabla 1 se constata un elevado grado de conflicto entre los distintos criterios. En algunos casos este conflicto es especialmente relevante como en el caso de la producción de madera y la rentabilidad del monte con los criterios de estructura normal o carbono capturado. Asimismo, maximizar la recolección de setas supone un elevado coste de oportunidad en alguno de los criterios como el volumen de corta o la estructura de monte normal. Esto hace que no

existan criterios redundantes y se justifica considerar a todos ellos en el análisis multicriterio. Por otro lado, se comprueba la importancia del monte en la captura de carbono con valores por hectárea análogos a otros trabajos similares (Díaz-Balteiro & Romero, 2003).

Analizando el escenario determinista (Tabla 1) respecto al no determinista (Tabla 2) se observan principalmente diferencias en los criterios concernientes a la recolección de setas y a la rentabilidad del monte, debido a la modificación de los valores de producción fúngica y precios de setas y madera. En cuanto a la rentabilidad, la caída viene generada prácticamente por el descenso en el VAN asociado a la recolección de setas, que es del 61%. En el escenario determinista el valor generado por la recolección de setas representa el 24% del total del monte, mientras que en el escenario no determinista solo representa el 11%. Esto pone de manifiesto la elevada variabilidad de la función recolección de setas cuando se introduce el riesgo en el análisis, producción muy dependiente de factores meteorológicos. Por otro lado, se aprecia que maximizar la recolección de setas en el escenario no determinista conlleva un acercamiento al cumplimiento de estructura normal del monte y viceversa, mejora ligeramente la producción de madera, pero supone un perjuicio para el resto de criterios.

Los resultados obtenidos en el escenario determinista para la solución final del LGP cuando se consideran las preferencias de los stakeholders (columna 2 de la Tabla 3) refleja un nivel de logro del 73 % con respecto al ideal para el criterio de volumen de corta, del 70 % respecto del ideal para la estructura de monte normal, del 89 % respecto de la recolección de setas, del 76 % del ideal para la rentabilidad de la masa y del 68% con respecto a la captura de carbono.

Por otro lado, las diferencias de los distintos escenarios (determinista y no determinista) para la solución de LGP muestran, análogo a lo ocurrido con la matriz de pagos, las diferencias entre los criterios de rentabilidad y recolección de setas (16% y 58% respectivamente de descenso en el escenario no determinista). Esto constata nuevamente que dichas diferencias son causadas en mayor medida por las variaciones en las producciones fúngicas y no tanto por la variabilidad o análisis de riesgo en los precios de mercado del níscolo o de la madera.

La solución determinista del modelo del LGP en el caso de pesos iguales (primera columna Tabla 3) pone de manifiesto la posibilidad de encontrar una solución satisfactoria entre los criterios de forma que sea atractiva para los stakeholders. Esto se constata cuando se compara con los resultados de la matriz de pagos (Tabla 1). Además, si se compara la solución al LGP cuando los pesos son iguales y cuando no lo son, se observa que las soluciones obtenidas en los criterios de producción de madera, recolección de setas y carbono capturado varían poco a cambios tomados en las preferencias de los stakeholders (<10%). La rentabilidad varía un 15 % mientras que el criterio de estructura normal queda modificado sustancialmente debido a las variaciones en las condiciones de igualdad de flujo de volumen y de regulación.

Si comparamos los resultados obtenidos con otros estudios que han empleado herramientas de optimización como en Aldea *et al.*, (2012) para el mismo monte, se aprecian resultados similares, si bien, existen diferencias en cuanto a la cantidad recolectada de setas y a la rentabilidad del monte, como consecuencia de considerar un periodo diferente de datos históricos en el cálculo para la producción fúngica y precios. En el anterior trabajo se obtienen soluciones eficientes por medio de otra técnica de decisión multicriterio como la programación compromiso cuyos resultados son similares a los obtenidos en el presente trabajo. No obstante, en el citado trabajo no tienen en cuenta el criterio de captura de carbono o el riesgo asociado a la producción fúngica y precios de setas y madera. Además, los datos empleados en el presente trabajo son preferibles debido al empleo de un mayor registro histórico de precios y producciones fúngicas, así como de información relativa a los precios de la madera. Asimismo, en el anterior trabajo no se tuvieron en cuenta las preferencias de los stakeholders, de modo que la solución, aunque eficiente, pudiera no ser admisible para dichos agentes.

Por otro lado, en este estudio se han empleado para el cálculo de existencias de madera las tablas de producción empleadas en la gestión del monte, si bien existen otros posibles modelos de masa o bien de árbol individual que podrían ser también empleadas de acuerdo con los trabajos de Rio del & Montero (2001), Palahí & Pukkala (2003) o Bravo *et al.*, (2008b). Además, no se consideró el riesgo asociado a la función objetivo producción de madera, de forma que ésta puede ser una futura línea de investigación. De manera análoga existe un modelo para estimar la producción de setas en el monte (Martínez-Peña *et al.*, 2012), a pesar de que su ajuste no tiene en cuenta los últimos años de producción ni las tasas de recolección del mismo. En este

sentido, el monte está dentro del Sistema de regulación del aprovechamiento micológico MYAS-RC, de modo que tanto tasas de recolección como número de recolectores podrían variar en función de las condiciones de aprovechamiento que se impongan desde el mismo, como por ejemplo el precio del permiso.

Por otra parte, debido al reducido número final de encuestas contestadas por los stakeholders, no fue aceptable la realización de una distinción según tipología e importancia de los mismos en las respuestas y cálculo de pesos. Ésta podría ser una futura línea de estudio la cual permitiría la agregación de las preferencias según la distinta tipología de los stakeholders (Díaz-Balteiro *et al.*, 2009). Asimismo, se podría contemplar la incorporación de otros criterios considerados por estos agentes en la gestión multifuncional del monte, si bien, esta cuestión no está exenta de dificultades debidas a la complejidad en la cuantificación o valoración de servicios sin valor de mercado.

6. CONCLUSIONES.

Las soluciones obtenidas de los modelos de GP a partir de los criterios considerados en la gestión del monte Pinar Grande (producción de madera, recolección de setas, captura de carbono, rentabilidad y estructura normal del monte), evidencian la existencia de un elevado nivel de conflicto entre cada uno de ellos. Por tanto, es necesario el empleo de técnicas de decisión multicriterio que permitan encontrar una solución eficiente y satisfactoria entre todas ellas. De acuerdo con una encuesta se determinaron las preferencias de los stakeholders, lo que permitió definir el tipo de modelo a emplear, la fijación de los pesos otorgados a cada objetivo y otros aspectos asociados al diseño de los modelos de GP, en base a dos escenarios, uno determinista y otro no determinista en relación a precios de madera y precios y producciones de *Lactarius gr. deliciosus* y *Boletus edulis*.

Atendiendo a ello, mediante la construcción de un modelo de LGP que incorpora los cinco criterios de gestión anteriormente citados y combinados mediante modelos WGP, se han obtenido soluciones factibles para la gestión multifuncional del monte Pinar Grande. El modelo propuesto no solo determina la mejor solución eficiente que satisface de manera realista las preferencias de los stakeholders (de forma que habrá mayor probabilidad de que sea aceptada más fácilmente), sino que también permite atenuar el nivel de conflicto e interacción entre los diferentes criterios de gestión.

Los resultados obtenidos en el escenario determinista revelan la existencia de una solución eficiente y muy próxima a las preferencias de los stakeholders. La solución obtenida refleja un nivel de logro del 73 % con respecto al ideal para el criterio de volumen de corta, del 70 % respecto del ideal para la estructura de monte normal, del 89 % respecto de la recolección de setas, del 76 % del ideal para la rentabilidad de la masa y del 68% con respecto a la captura de carbono.

De acuerdo con las soluciones LGP del escenario no determinista, se constata una importante variación en la recolección de setas y en menor medida en el criterio de rentabilidad (58% y 16% respectivamente comparando con el escenario determinista). Dichas diferencias evidencian la elevada variabilidad o análisis de riesgo de la producción de setas, altamente dependiente de las condiciones meteorológicas.

En resumen, el análisis empleado en el presente estudio puede considerarse básico para justificar y determinar una correcta gestión del monte Pinar Grande bajo una perspectiva sostenible de uso múltiple que satisfaga las demandas actuales de la sociedad.

7. BIBLIOGRAFÍA.

Aldea J, Díaz-Balteiro L, Martínez-Peña F. 2011. Integración del recurso micológico en los proyectos de ordenación de montes. En: Manual para la gestión del recurso micológico forestal en Castilla y León (Martínez-Peña F, Oria de Rueda JA, Ágreda T, coords). Ediciones técnicas SOMACYL-Junta de Castilla y León. pp: 215-229.

Aldea J, Martínez-Peña F, Díaz-Balteiro L. 2012. Integration of fungal production in forest management using a multi-criteria method. Eur J Forest Res. 131,1991-2003.

Bonet JA, Pukkala T, Fischer CR, Palahí M, Martínez de Aragón J, Colinas C. 2008. Empirical models for predicting the production of wild mushrooms in Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) forests in the Central Pyrenees. Ann. For. Sci., 65,206

Bravo F, Bravo-Oviedo A, Díaz-Balteiro L. 2008a. Carbon sequestration in Spanish Mediterranean forest under two management alternatives: a modeling approach. Eur J Forest Res., 127, 225-234.

Bravo F, Pando V, Ordóñez C, Lizarralde I. 2008b. Modelling ingrowth in mediterranean pine forests: a case study from Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and mediterranean maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) stands in Spain. Invest. Agr.: Sist. Recur. For.17, 250–260.

Calama R, Tomé M, Sánchez-González M, Miina J, Spanos K, Palahí M. 2010. Modelling non-wood forest products in Europe: a review. Invest. Agr.: Sist. Recur. For.19, 69-85.

- Díaz-Balteiro L, Prieto A. 1999. Modelos de planificación forestal basados en la programación lineal. Aplicación al monte “Pinar de Navafría” (Segovia). Invest. Agr.: Sist. Recur. For.8 (1).
- Díaz-Balteiro L, Álvarez A, Oria de Rueda JA. 2003. Integración de la producción fúngica en la gestión forestal. Aplicación al monte “Urcido” (Zamora). Invest. Agr.: Sist. Recur. For.12, 5–19.
- Díaz-Balteiro L, Romero C. 2003. Forest management optimization models when carbon captured is considered: a goal programming approach. For. Ecol. Manage. 174, 447–457.
- Díaz-Balteiro L, Romero C. 2008. Making forestry decisions with multiple criteria: A review and an assessment. For. Ecol. Manage. 255, 3222–3241.
- Díaz-Balteiro L, González-Pachón J, Romero C. 2009. Participatory decision-making with multiple criteria: a methodological proposal and an application to a public forest in Spain. Scan. J. For. Res. 24, 87-93.
- Díaz-Balteiro L, González-Pachón J, Romero C. 2013a. Goal programming in forest management: customising models for the decision-maker’s preferences. Scan. J. For. Res. 28, 166-177.
- Díaz-Balteiro L, Alfranca O, Voces R. 2013b. Mercado de *Lactarius deliciosus*. Modelización de la oferta en España. I.T.E.A.109, 370-389..
- European Commission, 2013. Communication from the commission to the European parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. A new EU Forest Strategy: for forests and the forest-based sector. Brussels, pp:17.
- García-Abejón JL, 1981. Tablas de producción de densidad variable para *Pinus sylvestris* L. en el Sistema Ibérico. Comunicaciones INIA, Serie: Recursos Naturales, 29,36.
- IPCC. 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Institute for Global Environmental.
- Johnson KN, Scheurman HL (1977) Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives-discussion and synthesis. For. Sci. (Monogr) 18,1–32.
- Jones DF, Tamiz M. 2010. Practical goal programming. New York. Springer.
- Kauserud H, Stige LC, Vik JO, Okland RH, Hoiland K, Stenseth NC. 2008. Mushroom fruiting and climate change. P Natl Acad Sci 105,3811–3814.
- MAGRAMA. 2002. Plan Forestal Español. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. pp:139.

Martínez de Aragón J, Bonet JA, Fischer CR, Colinas C. 2007. Productivity of ectomycorrhizal and selected edible saprotrophic fungi in pine forest of the pre-Pyrenees Mountains, Spain: predictive equations for forest management of mycological resources. *For. Ecol. Manage.* 252, 239–256.

Martínez-Peña F. 2003. Producción y aprovechamiento de *Boletus edulis* Bull.:Fr. en un bosque de *Pinus sylvestris* L. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Castilla y León, Valladolid (Spain).

Martínez-Peña F, Gómez Conejo R, Ortega-Martínez P. 2007. Micodata: Sistema de información geográfica sobre producción, aprovechamiento y ordenación del recurso micológico en Castilla y León.

Martínez-Peña F, de-Miguel S, Pukkala T, Bonet JA, Ortega-Martínez P, Aldea J, Martínez de Aragón J. 2012. Yield models for ectomycorrhizal mushrooms in *Pinus sylvestris* forests with special focus on *Boletus edulis* and *Lactarius group deliciosus*. *For. Ecol. Manage.* 282:63–69.

Montero G, Ruiz-Peinado R, Muñoz M. 2005. Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles. Monografías INIA: Serie forestal, 13, pp 274.

Palahí M, Pukkala T. 2003. Optimising the management of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in Spain based on individual-tree models. *Ann. For. Sci* 60:105–114.

Palahí M, Pukkala T, Bonet JA, Colinas C, Fischer CR, Martínez de Aragón J. 2009. Effect of the inclusion of mushroom values on the optimal management of even-aged pine stands of Catalonia. *For. Sci* 55, 503–511.

Río del M, Montero G. 2001. Modelo de simulación de claras en masas de *Pinus sylvestris* L. Monografías INIA: Forestal nº 3, Madrid.

Rojo A, Montero G. 1996. El pino silvestre en la Sierra de Guadarrama. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid.

Romero C. 1991. Handbook of critical issues in goal programming. Oxford: Pergamon Press.

Row C, Phelps R.B. 1996. Wood carbon flows and storage after timber harvest. En: Sampson R.N., Hair D. (eds.). *Forest and Global Change, Vol 2. Forest Management Opportunities for Mitigating Carbon Emissions*. American Forest, Washington, 27-58.

Ruiz-Peinado R, del Río M, Montero G. 2011. New models for estimating the carbon sink capacity of Spanish softwood species. *Invest. Agr.: Sist. Recur. For.* 20, 176-188.

Sánchez-González M, Calama R, Cañellas I, Montero G. 2007. Management oriented growth models for multifunctional Mediterranean forests: the case of cork oak (*Quercus suber* L.). *EFI Proceedings*, 56, 71-84.

Steuer RE. 1989. *Multiple Criteria Optimization*. Krieger, Malabar.