

NOTA TÉCNICA

DISEÑO DE UN PLAN TÉCNICO DE GESTIÓN UTILIZANDO NUEVAS HERRAMIENTAS DE PLANIFICACIÓN FORESTAL: COMBINACIÓN DE SIMULACIÓN FORESTAL Y MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN NUMÉRICA

Javier Pasalodos-Tato, David Miranda Barrós, Ulises Diéguez Aranda y Eduardo González-Ferreiro

Departamento de Ingeniería Agroforestal. Universidad de Santiago de Compostela. Escuela Politécnica Superior. c/Benigno Ledo s/n. Campus universitario. 27002-LUGO (España). Correo electrónico: javierptato@hotmail.com, david.miranda@usc.es, ulises.dieguez@usc.es, edu.g.ferreiro@gmail.com.

Resumen

El presente estudio pretende reflejar la importancia de las nuevas herramientas de inventario y planificación forestal combinando su uso en el diseño de un plan técnico de gestión de una UXFOR (Unidad de Xestión Forestal) situada en el Ayuntamiento de Guitiriz (Lugo). Este trabajo consta de dos etapas claramente diferenciadas: *inventario forestal* con LiDAR y *planificación forestal* de los recursos forestales presentes en la zona de estudio, utilizando técnicas basadas en modelos de crecimiento para la simulación de alternativas a nivel de rodal, técnicas de optimización a nivel de rodal para guiar la elección de dichas alternativas y métodos de optimización a nivel de monte para integrar las alternativas selvícolas elegidas en el plan de gestión. Los resultados muestran que el empleo de modelos de crecimiento en combinación con técnicas de optimización tanto a nivel de rodal como a nivel de monte, permiten el desarrollo de planes de gestión cuya aplicación es más rápida y flexible y pueden adaptarse a diferentes objetivos y restricciones de manera sencilla.

Palabras clave: *UXFOR, LiDAR, Modelos de crecimiento, Programación lineal*

INTRODUCCIÓN

Una buena planificación forestal facilita y sirve de apoyo en el proceso de toma de decisiones por parte de los gestores o propietarios forestales. Proponer diferentes alternativas de gestión, predecir sus consecuencias y posteriormente clasificar y/o calificar estas alternativas de manera sistemática ayuda a planificar.

Generalmente, el número y tipología de las alternativas elegidas se basa en preferencias subjetivas. A pesar de esa subjetividad, la valoración de estas alternativas se puede automatizar mediante la optimización numérica. Sin embargo, a menudo la planificación forestal es considerada como una herramienta que sólo se ocupa de las consideraciones objetivas en la toma de decisiones. El empleo de la planificación suma-

do a las consideraciones subjetivas, se denomina análisis de decisiones (PUKKALA, 2002).

Tradicionalmente, la planificación forestal en España no ha tenido en consideración las nuevas tendencias en cuanto a herramientas y métodos de planificación que se han desarrollado en el campo de la planificación forestal. Entre estas metodologías cabe destacar el empleo de herramientas matemáticas que pueden utilizarse en gestión forestal, diferenciando entre aquellas que pueden ser utilizadas para la elección de los esquemas selvícolas a nivel de rodal, y aquellas que pueden ser empleadas en la gestión forestal a nivel de monte. Entre las primeras se encuentran metodologías como la programación dinámica, los métodos de búsqueda directa y heurísticos (PASALODOS-TATO, 2010), mientras que en el segundo grupo se situarían técnicas como la programación lineal, programación entera, programación por metas y heurísticos, entre otras. La programación lineal (PL) es el método de optimización más comúnmente utilizado en planificación forestal (DAVIS *et al.*, 2001; BUONGIORNO & GILLESS, 2003). Es un método matemático de resolución de problemas en el que el objetivo es optimizar (maximizar o minimizar) un resultado a partir de la selección de los valores de un conjunto de variables de decisión, respetando restricciones correspondientes a la disponibilidad de recursos, especificaciones técnicas, u otros condicionantes que limiten la libertad de elección. Uno de los primeros ejemplos de aplicación de esta técnica se puede ver en ROMERO (1989). Posteriormente en BRAVO *et al.* (1996) se construye un modelo de programación lineal, con el fin de obtener el máximo beneficio posible, haciendo especial hincapié (se especifican las cortas aclaratorias y finales) en las superficies que se regeneran en cada periodo. En DÍAZ-BALTEIRO Y PRIETO (1999) se compara la ordenación de un monte bajo por el método de tramos permanentes, con la aplicación, a ese mismo monte ("Pinar de Navafría"), de métodos basados en herramientas analíticas optimizadoras. Por último, en BERTOMEU *et al.* (2009) se define una metodología basada en la programación lineal por metas con el propósito de mostrar un modelo general de gestión para plantaciones de *Eucalyptus globulus* en Galicia

en el que la producción de madera, la estructura final de la masa y la constancia de la producción en el futuro puedan ser optimizadas.

Es importante destacar que la programación lineal frecuentemente es utilizada para modelar problemas de modo lineal. Sin embargo, muchos problemas presentan situaciones en que la linealidad del modelo se hace muy difícil de sostener con un conjunto de variables continuas como única herramienta de modelización. Es así como surgen las variables binarias (aquellas que sólo pueden tomar valores 0 y 1) como artificio que permite expresar situaciones no lineales como lineales. El empleo de variables binarias se utiliza, por ejemplo, para solventar el problema que implica la corta del mismo rodal en varios periodos de tiempo. Otra ventaja característica de las variables binarias es que permiten introducir dentro del modelo una las restricciones de adyacencia. Tanto la programación lineal como la programación entera serán empleadas en el presente estudio.

Por otra parte, no es únicamente en el campo de la planificación forestal donde ha tenido lugar el desarrollo de nuevas técnicas, también en otras áreas como en la de inventario forestal los avances han sido altamente relevantes. En este aspecto cabe destacar técnicas de teledetección como es la tecnología LiDAR (Light Detection And Ranging). El LiDAR también conocido como Airborne Laser Mapping es un sensor activo, que montado desde una aeronave, es capaz de proporcionar datos de la topografía y vegetación del terreno sobrevolado. Su principal ventaja con respecto a la foto aérea es que proporciona información de las capas de vegetación situadas bajo una cubierta arbórea.

Esta técnica se utiliza principalmente para la obtención de Modelos Digitales de Superficie (MDS) y Modelos Digitales de Elevación (MDE), a partir de la diferencia algebraica de ambos modelos se puede obtener variables de interés para la gestión forestal, como son, el volumen de madera, las alturas medias, la altura dominante, etc. Los datos LiDAR proporcionan información en tres dimensiones de la masa arbolada a estudiar de manera rápida, fiable y barata. Además de ser una herramienta de gran importancia en inventario forestal, es también un método versátil, con gran cantidad de aplicaciones diferentes en el estudio del medio forestal, como por ejemplo la organiza-

ción óptima de operaciones forestales (CHUNG, 2003), gestión del riesgo de incendio (RIANO *et al.*, 2003). La tecnología LiDAR evoluciona de manera tan rápida que sus inconvenientes o desventajas están siendo superados en cortos plazos de tiempo. Como ejemplo señalar el desarrollo de metodologías para el reconocimiento de especies empleando datos LiDAR (VAUHKONEN *et al.*, 2008).

En este contexto, el objetivo del presente trabajo es ilustrar cómo mediante la combinación de las últimas tendencias en materia de inventario y planificación forestal se consigue obtener herramientas de gestión más flexibles y basadas en análisis cuantitativos. Para conseguir dicho objetivo aplicaremos la metodología que describiremos a continuación a un caso de estudio, una UXFOR situada en el ayuntamiento de Guitiriz, en la provincia de Lugo. Una UXFOR es una superficie forestal continua, en la que los propietarios se unen para llevar a cabo una gestión común de sus parcelas manteniendo siempre su propiedad sin ninguna modificación de la superficie o situación. La UXFOR objeto de estudio se caracteriza por estar poblada por masas de *Pinus radiata*, *Eucalyptus globulus*, *Quercus robur* y pertenecer a diez propietarios.

Para llevar a cabo la gestión forestal de la zona de estudio, se ha estimado oportuno basarse en el esquema propuesto por PUKKALA (2002) (Figura 1). En dicho esquema queda de manifiesto que la toma de decisiones en planificación forestal viene condicionada tanto por elementos subjetivos (preferencias de los propietarios y gestores forestales) que definirán los objetivos a perseguir con la ges-

tión, como por una serie de condicionantes objetivos, que definen el estado de la masa y su dinámica temporal. La combinación de ambos tipos de condicionantes permitirá generar diferentes alternativas selvícolas a nivel de rodal. Dichas alternativas serán combinadas e integradas en un modelo de planificación. Los resultados de la combinación de dichas alternativas selvícolas en el modelo de planificación a nivel de monte han de ser comparados con el fin de elegir el plan que mejor se ajuste a las necesidades del gestor o propietario forestal. Asimismo, se pretende mostrar que la aplicación a la gestión de montes de métodos basados en la programación lineal, proporciona datos muy interesantes al gestor forestal.

METODOLOGÍA

En primer lugar, a la hora de realizar la planificación forestal de la zona de estudio, es imprescindible la caracterización, tanto cualitativa como cuantitativamente, de las masas forestales presentes dentro de sus límites. Esta es la etapa de toma de datos del inventario. En esta fase, como ya se adelantaba en la Introducción, se ha decidido utilizar datos LiDAR. Mediante el empleo de esta tecnología se obtienen las variables dasométricas necesarias para la realización de la división inventarial y el cálculo de existencias de las masas forestales presentes en la zona de estudio. Estas variables dasométricas son la altura media del arbolado (m), la altura dominante (m) y el área basimétrica ($m^2 \cdot ha^{-1}$).



Figura 1. Elementos que intervienen en la toma de decisiones

Una vez realizada la división inventarial distinguiendo distintas tipologías de masas o estratos, se utilizará el simulador de crecimiento y producción GesMO 2009, elaborado en el seno del grupo de investigación Unidade de Xestión Forestal Sostenible (UXFS) de la Universidad de Santiago de Compostela, para predecir el comportamiento de cada estrato en función de las diferentes alternativas silvícolas desarrolladas a lo largo del horizonte de planificación propuesto en este trabajo. En el simulador GesMO 2009 se encuentran implementados los modelos de crecimiento de las principales especies de pinos presentes en Galicia. Como en las parcelas que formarán parte de la UXFOR existen otras especies forestales, por ejemplo *Eucalyptus globulus*, acudiremos a sus respectivas tablas de producción para predecir la evolución de estas masas.

El siguiente paso, una vez recopilada la información de la evolución de cada estrato en el tiempo, consistirá en desarrollar un modelo matemático utilizando los resultados estimados para las diferentes alternativas silvícolas desarrolladas en este estudio. En el presente trabajo, el objetivo último de la planificación forestal de las parcelas que componen la zona de estudio, consiste en maximizar el valor actual neto (VAN) obtenido en las cortas de madera que se realizarán a lo largo de un horizonte de planificación fijado de antemano (20 años). Una vez el modelo ha sido formulado, se desarrollan una serie de hipótesis en función de las posibles preferencias de los propietarios, que serán integradas en el modelo por medio de restricciones. Por último, para realizar la planificación forestal, se ha estimado oportuno utilizar métodos basados en herramientas analíticas, como la programación lineal, con el propósito de obtener soluciones óptimas en función de los posibles intereses que los propietarios quieran llevar a cabo en la UXFOR.

A continuación se describen los diferentes elementos que han de componer el sistema de toma de decisiones.

Análisis de las preferencias de los propietarios e identificación de los objetivos de la gestión forestal

El propósito de la función objetivo desarrollada en este trabajo es maximizar el VAN (€) obtenido en las cuatro cortas de madera que se realizarán en la UXFOR durante los próximos

veinte años, realizando una corta cada cinco años. Como ingresos se contabilizarán los producidos tanto por las cortas finales de los estratos como los obtenidos en las claras. Como gastos, no se van asumir los generados por el transporte de los productos a los centros de transformación, únicamente se contabilizarán los asociados a la realización de claras.

Para dotar de una mayor solidez a los resultados obtenidos, se han formulado una serie de hipótesis en función de los posibles intereses que los propietarios quieran llevar a cabo en la UXFOR. Hay que señalar que se crearon unas hipótesis de base y las demás fueron surgiendo a raíz del análisis de los resultados obtenidos en estas primeras hipótesis, aunque a continuación se presentan todas.

Hipótesis 1: En esta primera hipótesis el objetivo es maximizar el VAN obtenido en las cuatro cortas de madera que se realizarán en la UXFOR durante los próximos veinte años, sujeto únicamente a aquella restricción de carácter endógeno que asegura cortar toda la superficie de los estratos.

Hipótesis 2: La finalidad de esta hipótesis, al igual que en el supuesto anterior, es maximizar el VAN, pero en este caso sujeto a que el área de corta cosechada en cada período sea la misma.

Hipótesis 3: La finalidad de esta hipótesis es obtener la solución óptima que garantice un VAN constante a lo largo de los cuatro períodos.

Hipótesis 4: El objetivo propuesto en esta nueva hipótesis es maximizar el VAN asegurando un flujo constante de volumen de madera cosechada en cada período.

Hipótesis 5: Esta hipótesis surgió a raíz del análisis de los resultados obtenidos siguiendo la hipótesis anterior donde el valor de la función objetivo disminuye de manera significativa al asegurar un volumen cosechado constante a lo largo de los cuatro períodos. Por tanto, para solucionar este problema se ha estimado oportuno añadir una nueva restricción en la que garantice un volumen cosechado en cada período mayor o igual a 900 m³.

Hipótesis 6: La finalidad de esta hipótesis es asegurar que el volumen de masa adulta cosechada en cada período sea el mismo. Se ha considerado que una masa adulta, es aquella de edad igual o superior a treinta años.

Hipótesis 7: El objetivo propuesto en esta hipótesis es, igual que en la Hipótesis 1, maximizar el VAN obtenido de las cuatro cortas de madera, sujeto únicamente a la restricción de carácter endógeno que asegura cortar toda la superficie de la UXFOR. A diferencia de las hipótesis anteriores, en las que cada variable decisoria podía tomar cualquier valor incluyendo valores no enteros, en la presente hipótesis se formulará tanto la función objetivo como las restricciones utilizando variables binarias. La principal diferencia es que todas las variables tienen el mismo peso, es decir, para el programa todas las variables decisorias son iguales debido a que no existen restricciones de superficie. Por ello se precisa expresar el VAN en (€·estrato⁻¹) y el volumen de cada estrato en m³ a diferencia de las hipótesis anteriores donde el volumen se refería a m³·ha⁻¹ por llevar implícita la restricción de superficie.

Hipótesis 8: El propósito de esta nueva hipótesis es averiguar si mediante el empleo de variables binarias se puede garantizar la igualdad en los volúmenes cosechados en cada período. El programa no es capaz de obtener una solución óptima que garantice, por una parte, la igualdad en los volúmenes de madera cosechados en cada período, y por otra parte, que cada estrato se corte íntegramente en un determinado período de tiempo. Por tanto para dotar de una mayor flexibilidad a la función objetivo se ha decidido introducir aquella restricción que asegure que el volumen de madera cosechado en cada período sea superior o igual a 1.000 m³.

Hipótesis 9: De la misma forma que en la hipótesis anterior, se pretende asegurar un área de corta constante a lo largo de los cuatro períodos, utilizando variables binarias. Como sucedió en la hipótesis anterior, no existe una solución óptima que satisfaga ambas condiciones. Por tanto se ha decidido introducir una restricción que asegure que el área de corta cosechada en cada período sea superior o igual a 5 ha.

Hipótesis 10: En esta hipótesis se ha introducido una serie de restricciones que aseguran que el VAN obtenido en cada uno de los cuatro períodos en los que se realizarán las cortas, sea superior a 25.000€.

Hipótesis 11: En esta hipótesis se ha estimado oportuno imponer una restricción de tipo pai-

sajístico para evitar superficies de corta continuas superiores de 4,5 ha.

Hipótesis 12: En esta última hipótesis se pretende conseguir una mayor continuidad en las áreas de corta cosechadas en cada período. Dicho de otro modo, lo que se pretende es que los futuros estratos, una vez realizada la planificación, estén formados por superficies contiguas de un tamaño acorde a la realidad forestal. Para llevar a cabo esta hipótesis es necesario introducir una serie de restricciones, que por una parte garanticen cortar un estrato en un período concreto, y por otra parte, otras que aseguren cortar una serie de estratos en el mismo período de tiempo. El objetivo propuesto en esta hipótesis que era conseguir que los estratos que caracterizarán la estructura de la UXFOR en el futuro tuvieran una superficie amplia y continua no se cumple de manera satisfactoria. Esto es debido, por una parte, a que los estratos formados por la especie *Eucalyptus globulus* obligatoriamente han de ser cortados en el período uno por estar próximos a la edad del turno, y por otra parte, existen estratos jóvenes de la especie *Pinus radiata* que deben ser cortados en el cuarto período por razones tanto silvícolas como económicas. Por tanto, estos dos condicionantes dotan a la función objetivo de una mayor rigidez a la hora de encontrar la solución óptima propuesta en esta hipótesis.

Inventario Datos LiDAR y modelos de crecimiento

Las variables dasométricas obtenidas, a partir de LiDAR, son la altura media del arbolado (m), la altura dominante (m) y el área basimétrica (m²·ha⁻¹). Los valores de las variables dasométricas de las masas forestales presentes en la UXFOR se han obtenido a partir de los datos LiDAR disponibles en el grupo de investigación de la USC 1934-TTB-Laboratorio de Territorio. Esta información ha sido proporcionada, para cada variable dasométrica, por medio de diferentes capas de información. Cada capa de información está formada por una matriz regular de celdas de diferente tamaño, en las que a cada celda se le asigna un único valor. El tamaño de celda empleado para la variable altura media del arbolado es

de 1x1 m, y para la altura dominante y el área basimétrica se asignó un tamaño de celda 8x8 m.

Para la obtención de dichas variables, se utilizaron modelos de regresión lineal, alométrica y exponencial, con el propósito de crear relaciones empíricas entre las mediciones obtenidas en campo y las mediciones LiDAR.

Además de los datos LiDAR, también se recurrirá al uso de diferentes modelos de dinámica de las masas estudiadas, en este caso pino radiata, con el fin de completar la caracterización de cada estrato. Para estimar la densidad (pies·ha⁻¹) de cada estrato, en primer lugar se midió en campo el marco de plantación para calcular la densidad inicial de plantación, y posteriormente se utilizó la ecuación de mortalidad natural propuesta por CASTEDO-DORADO et al. (2004).

Alternativas silvícolas

Una vez definidos los diferentes estratos forestales incluidos en la zona objeto de estudio, el siguiente paso consiste en la generación de diferentes esquemas silvícolas a realizar en cada uno de los diferentes estratos. En primer lugar se estableció el turno de los diferentes estratos. Para establecer el turno óptimo se ha utilizado la ecuación propuesta por PASALODOS-TATO et al. (2009), para la gestión óptima desde el punto de vista económico de masas de *Pinus radiata* en Galicia, obteniendo un turno óptimo medio para cada estrato de 48 años. Hay que destacar que finalmente no se ha tomó una edad de corta fija, si no que se eligió un amplio abanico de edades de corta, desde los 20 a los 50 años. La razón por la que se ha decidido describir un amplio abanico de edades de corta, es para dotar de una mayor flexibilidad la función objetivo, para que en el supuesto de que los propietarios

quisieran obtener un VAN constante en cada uno de los cuatro períodos (Hipótesis 3), se obtenga una solución factible acorde a sus intereses. Asimismo la elección de un amplio rango de edades de corta, es necesaria para asegurar la corta de todos los estratos de *Pinus radiata* existentes dentro de los límites de la UXFOR durante el horizonte de planificación fijado en este trabajo. En cuanto a la realización de claras, se estableció que estas tendría lugar dos o tres períodos de corta anteriores a la corta final. De esta manera, se establecieron hasta 7 posibles alternativas silvícolas para cada uno de los estratos. Además, debido a las diferencias en las edades de plantación de los distintos estratos, no se estimó oportuna la corta de estratos de edades inferiores a veinte años, y por otra parte, tampoco se justifican desde el punto de vista silvícola la realización de claras a edades inferiores a los cinco años. Por tanto, el número de alternativas silvícolas aplicadas es diferente en cada estrato.

Una vez realizada la división inventarial distinguiendo distintas tipologías de masas o estratos (Figura 2), se utilizará el simulador de crecimiento y producción GesMO 2009 para predecir el comportamiento de cada estrato en función de las diferentes alternativas silvícolas desarrolladas a lo largo del horizonte de planificación propuesto en este trabajo (Tabla 1). La notación pertinente asociada a cada variable de decisión es, en este caso la superficie de una unidad de gestión (S1, S2,..., S17) en un determinado período (P1, P2,..., P4) bajo una determinada alternativa silvícola (A1, A2,..., A7). Por ejemplo, S1P1A1.

Formulación del modelo matemático

El siguiente paso consiste en desarrollar un modelo matemático para obtener la planificación

Posibles Cortas (C) y claras (c) durante el horizonte de planificación				
Alternativas silvícolas	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4
A1	C			
A2		C		
A3			C	
A4				C
A5	c			C
A6	c		C	
A7		c		C

Tabla 1. Alternativas silvícolas propuestas para los estratos constituidos por la especie *Pinus radiata*

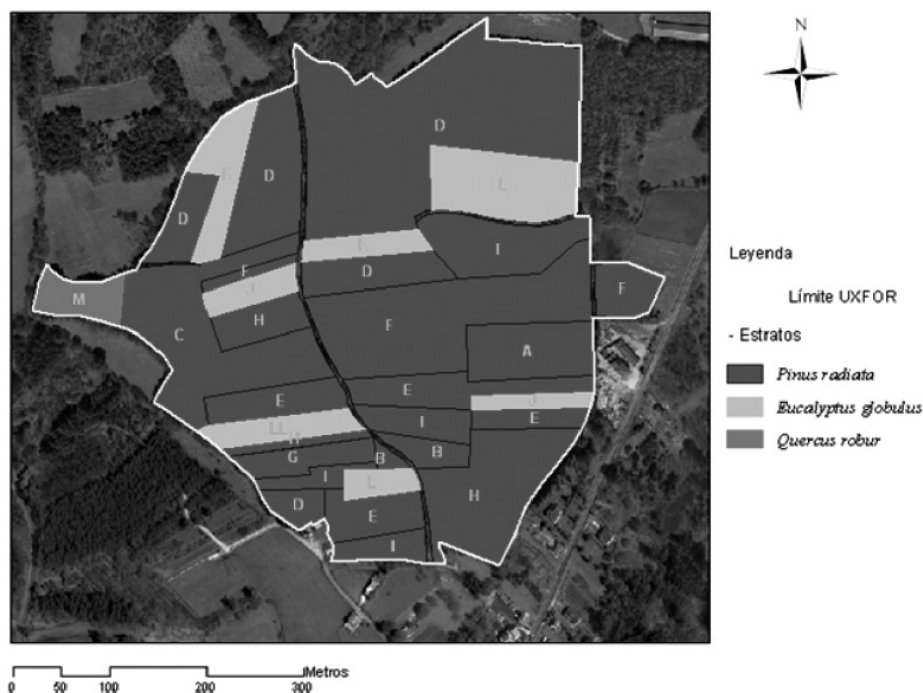


Figura 2. Estratos forestales presentes en la UXFOR

forestal más adecuada de la zona objeto de estudio. De los dos modelos de planificación definidos tradicionalmente en la literatura forestal (JOHNSON & SCHEURMAN, 1977) se ha elegido el Modelo II. La diferencia más importante que existe entre el Modelo I y el II consiste en el modo de agrupar las distintas unidades de gestión (en el caso que nos ocupa, serán estratos). El Modelo I obliga a definir en el momento inicial las variables de decisión, que deberán abarcar todos los posibles regímenes de gestión a considerar (DÍAZ-BALTEIRO Y PRIETO, 1999). Una vez definidos, permanecerán inalterables a lo largo del turno de transformación. Este modelo es comúnmente empleado en montes ordenados. En cambio, en el Modelo II, cada estrato definido en el instante inicial no forma una unidad selvícola de cortas que mantiene su individualidad a lo largo del horizonte de planificación (DÍAZ-BALTEIRO *et al.*, 2008). Dicho de otro modo, en el momento de la regeneración, la historia inicial de cada estrato se pierde y todos los estratos regenerados en el mismo período se unen formando una nueva unidad de gestión. Por tanto, el Modelo II, es el más adecuado cuando se pretenden realizar cambios en la estructura de la masa forestal.

Una vez el modelo ha sido formulado, se integran en él mediante una serie de restricciones las

hipótesis que reflejan las posibles preferencias de propietarios. Para proceder a la resolución de dicho modelo, se utilizaron métodos basados en herramientas analíticas, como la programación lineal, con el propósito de obtener soluciones óptimas en función de los posibles intereses que los propietarios quieran llevar a cabo en la UXFOR. La resolución del modelo se llevó a cabo utilizando el software LINDO (CANIZO Y LUCERO, 2002)

Para el cálculo del precio del m^3 según clase diamétrica por destinos comerciales, para las especies de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*, se utilizaron los precios publicados en la Asociación Forestal de Galicia en febrero del 2010. Los precios propuestos para la especie *Pinus radiata* son: $68\text{€}\cdot m^{-3}$ para madera destinada al desarrollo ($d_{min} \geq 35$ cm), $35\text{€}\cdot m^{-3}$ para madera destinada a sierra ($35 > d_{min} \geq 18$ cm) y $25\text{€}\cdot m^{-3}$ para madera destinada a trituración ($18 > d_{min} \geq 7$ cm). Para la especie *Eucalyptus globulus*, se estimó que el destino comercial de la madera cortada sería para la elaboración de tableros de partículas y se le asignó un precio de $35\text{€}\cdot m^{-3}$, semejante a los propuestos por la Asociación Forestal de Galicia.

Sistemas de información geográfica

Los Sistemas de Información geográfica (SIG) son herramientas basadas en la tecnolo-

gía informática que permiten manejar información de carácter espacial. Mediante el empleo de esta tecnología se realizará la cartografía temática necesaria para la realización de este trabajo.

RESULTADOS

A continuación se describe de manera detallada como varía el VAN, procedente de las cuatro cortas de madera que se realizarán durante

los próximos veinte años, en función de las distintas políticas de gestión que los propietarios quieran llevar a cabo en la UXFOR.

Como se puede observar en la Tabla 2, la hipótesis que adquiere un mayor VAN es aquella en la que únicamente se ha introducido aquella restricción, de carácter endógeno, que asegura cortar toda la superficie de la UXFOR en los próximos 20 años (Hipótesis 1). Sin embargo, a la hora de evaluar la mejor alternativa, es necesario valorar, además de los aspectos económicos, el estado que presentan las masas forestales una

Hipótesis	VAN (€)	Volumen cosechado (m ³)	Área Cosechada (ha)
Hipótesis 1	136.675,79		
Periodo 1		599,33	2,88
Periodo 2		429,33	-
Periodo 3		-	-
Periodo 4		5.601,59	17,36
Hipótesis 2: AC = cte	112.146,14		
Periodo 1		1.003,21	5,06
Periodo 2		1.216,62	5,06
Periodo 3		1.486,69	5,06
Periodo 4		1.579,71	5,06
Hipótesis 3: VAN = cte	112.400,17		
Periodo 1		957,40	4,74
Periodo 2		1.355,37	5,52
Periodo 3		1.425,72	4,82
Periodo 4		1.598,17	5,17
Hipótesis 4: VC = cte	107.948,62		
Periodo 1		1.264,21	5,63
Periodo 2		1.264,21	5,08
Periodo 3		1.264,21	5,07
Periodo 4		1.264,21	4,45
Hipótesis 5: VC ≥ 900 m ³	123.459,37		
Periodo 1		900,00	3,69
Periodo 2		900,00	2,24
Periodo 3		900,00	3,55
Periodo 4		3.195,23	10,75
Hipótesis 6: VMA = cte	109.298,02		
Periodo 1		838,67	3,92
Periodo 2		1.958,32	8,32
Periodo 3		1.054,36	3,80
Periodo 4		1.279,50	4,18

Tabla 2. Comparación de los resultados obtenidos para cada hipótesis (variables continuas)

vez realizada la planificación. Por ejemplo, para la Hipótesis 2, el VAN obtenido en comparación con la Hipótesis 1, es significativamente menor, pero en cambio si nos fijamos en la estructura que presentarán las masas forestales una vez concluido el horizonte de planificación, podría esta hipótesis ser más interesante para el propietario forestal. Dicho de otro modo, una vez finalizado el horizonte de planificación propuesto en este trabajo, la estructura de las masas forestales, para la Hipótesis 2, estará caracterizada por cua-

tro estratos pertenecientes a cuatro clases de edad, en el que cada estrato ocupa una superficie de 5,06 ha. En cambio, para la Hipótesis 1, la estructura final está caracterizada por dos estratos, de 2,88 ha y 17,36 ha, pertenecientes a dos clases de edad diferenciadas en 15 años.

En cuanto a los resultados obtenidos para cada hipótesis formulada en este trabajo utilizando variables binarias (Figura 3), como se puede observar en la Tabla 3, la hipótesis que garantiza un mayor VAN, Hipótesis 7, es aquella en la que

Hipótesis	VAN (€)	Volumen cosechado (m ³)	Área Cosechada (ha)
Hipótesis 7	136.600,42		
Periodo 1		599,69	2,88
Periodo 2		429,33	-
Periodo 3		-	-
Periodo 4		5.601,59	17,36
Hipótesis 8: VC ≥ 1000 m ³	119.691,03		
Periodo 1		1.006,15	3,92
Periodo 2		1.017,61	3,21
Periodo 3		1.016,21	4,07
Periodo 4		2.702,79	9,03
Hipótesis 9: AC ≥ 5 ha	112.241,72		
Periodo 1		997,36	5,03
Periodo 2		1.255,59	5,04
Periodo 3		1.476,47	5,02
Periodo 4		1.604,96	5,14
Hipótesis 10: VAN > 25.000 €	116.798,23		
Periodo 1		885,54	3,82
Periodo 2		1.256,72	5,04
Periodo 3		1.173,14	4,23
Periodo 4		2.310,39	7,04
Hipótesis 11: Paisaje	111.729,92		
Periodo 1		1.004,74	5,03
Periodo 2		1.223,37	5,03
Periodo 3		1.495,35	5,17
Periodo 4		1.564,12	5,01
Hipótesis 12: Área cosechada continua	110.552,51		
Periodo 1		1.025,84	5,81
Periodo 2		1.052,17	4,07
Periodo 3		1.316,34	4,48
Periodo 4		1.731,01	5,88

Tabla 3. Comparación de los resultados obtenidos para cada hipótesis (variables binarias)

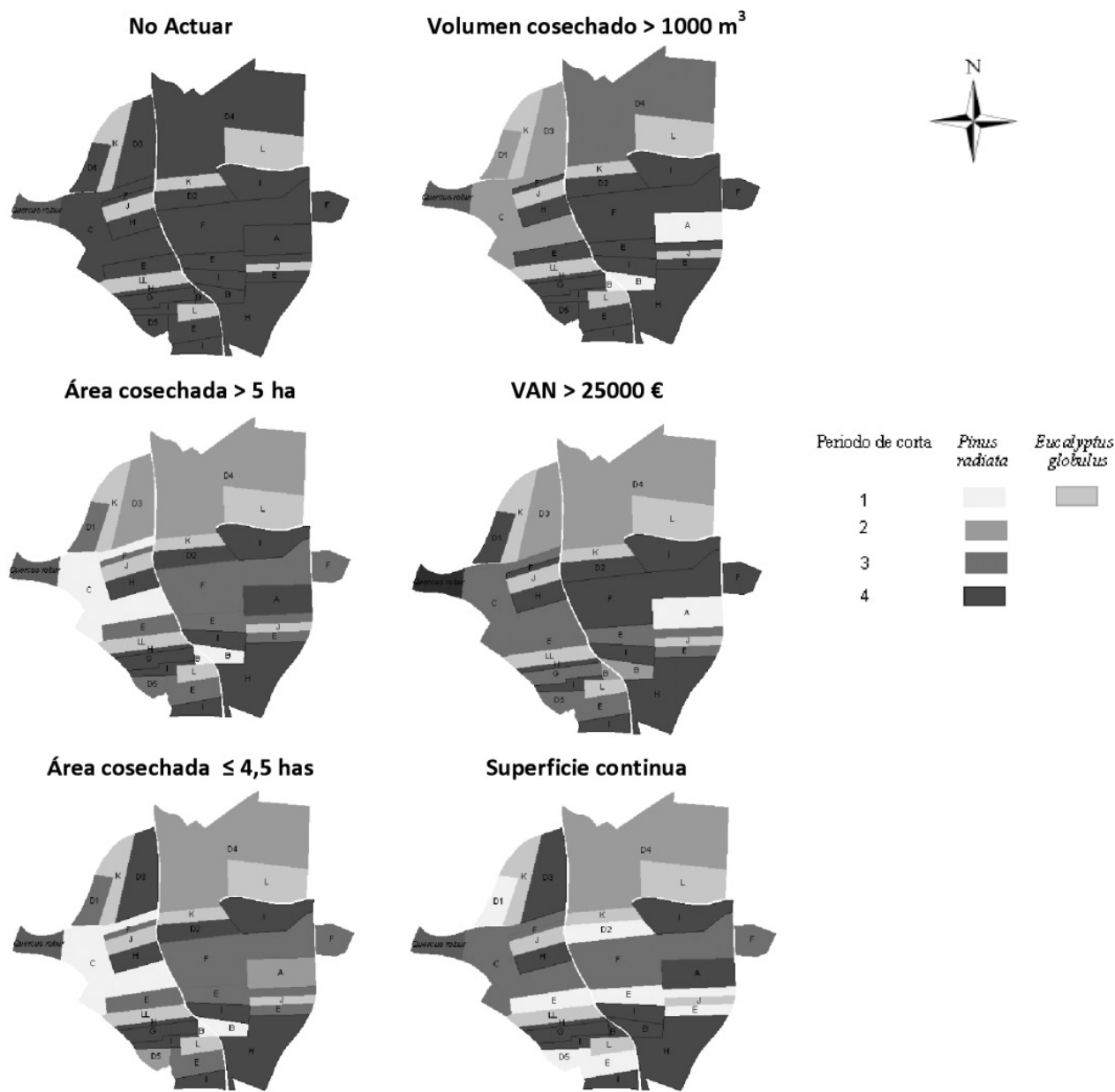


Figura 3. Representación espacial de los aprovechamientos forestales para cada hipótesis (variables binarias)

únicamente se ha introducido restricciones de carácter endógeno. En cambio, para el resto de las hipótesis no se producen diferencias significativas en lo relativo al VAN obtenido por las cortas de madera una vez realizada la planificación. Por tanto, cada una de las hipótesis formuladas en este trabajo pudiese tomarse como la elegida, siendo el propietario y/o gestor forestal el encargado de tomar la última decisión.

Por último, mediante una buena interpretación de los resultados obtenidos en este Apartado, se puede afirmar que el empleo de

técnicas analíticas como la programación lineal, dan como resultado una herramienta clave en la medida en que facilita la toma de decisiones a los propietarios o gestores forestales.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Como se ha podido observar en este trabajo, la aplicación de técnicas analíticas, como la programación lineal, a la ordenación de montes es perfectamente asumible. Mediante el empleo de esta

técnica se obtienen una serie de soluciones óptimas que satisfacen las posibles actuaciones que los propietarios quieran realizar en la UXFOR. En principio, cada una de las hipótesis aquí presentadas pudiera tomarse como la elegida.

Una vez construido el modelo matemático se pueden definir una gran variedad de restricciones en función de los posibles intereses de los propietarios. Asimismo los modelos de planificación forestal se caracterizan por su gran flexibilidad a la hora de generar soluciones óptimas, es decir, si los propietarios modificarán sus preferencias a lo largo del horizonte de planificación, únicamente sería necesario introducir aquella restricción acorde a los nuevos objetivos para obtener de nuevo una solución satisfactoria.

Hoy en día, gracias a los simuladores de crecimiento y producción, es factible estimar la evolución de una masa forestal a lo largo del tiempo. Por tanto, mediante el empleo de esta tecnología, se puede predecir cómo evolucionará una masa en función de la alternativa selvícola aplicada.

En el presente trabajo, para formular las seis primeras hipótesis, se han utilizado variables continuas, es decir, cada variable decisoria podía tomar cualquier valor positivo incluyendo el cero. Por tanto, las soluciones óptimas generadas, implicaban en algunas ocasiones, la corta de un mismo estrato en diferentes períodos de tiempo. Estas soluciones, desde punto de vista técnico como económico, son muy difíciles de llevar a cabo en la realidad.

En cambio mediante el empleo de variables binarias se asegura la corta íntegra de cada estrato en un período determinado. Además mediante el empleo de variables binarias se pueden representar en el espacio los estratos que se cortarán en cada periodo. Esta ventaja es clave, en la medida en que permite visualizar cómo evolucionará la estructura de las masas forestales en función de las distintas preferencias que los propietarios o gestores forestales quieran realizar. Por el contrario el inconveniente de la utilización de estas variables radica en la mayor rigidez que presenta el modelo a la hora de generar soluciones óptimas.

Asimismo se puede afirmar que las técnicas matemáticas como la programación lineal son una herramienta útil en la medida en que pueden facilitar la toma de decisiones a los propietarios o gestores forestales.

BIBLIOGRAFÍA

- BERTOMEU, M.; DÍAZ-BALTEIRO, L. & GIMÉNEZ, J.C.; 2009. Forest management optimization in Eucalyptus plantations: a goal programming approach. *Can. J. For. Res.* 39(2): 356-366.
- BRAVO, F.; RAMOS, M.T.; RAMÍREZ, A. Y SÁEZ, J.; 1996. Comparación del método del tramo móvil en regeneración con técnicas de programación lineal. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.* 1: 179-184.
- BUONGIORNO, J. & GILLES, J.K.; 2003. *Decision methods for forest resource management*: 419-439. Academic Press. San Diego.
- CANIZO, E. Y LUCERO, P.; 2002. *Investigación operativa. Software para Programación Lineal*. LINDO. http://www2.udec.cl/~rope-na/dsp/seccion_2/archivos/lingo_lindo.pdf.
- CASTEDO-DORADO, F.; 2004. *Modelo dinámico de crecimiento para las masas de Pinus radiata D. Don en Galicia. Simulación de alternativas selvícolas con inclusión del riesgo de incendio*. Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela. Lugo.
- CHUNG, W.; 2003. *Optimization of Cable Logging Layout Using a Heuristic Algorithm for Network Programming*. Ph.D. Thesis. Oregon State University, College of Forestry, Department of Forest Engineering. Corvallis.
- DAVIS, L.S.; FORTSON, J.C.; BETTINGER, P.S. & HOWARD, T.E.; 2001. *Forest Management: to sustain ecological, economic and social values*. McGraw-Hill Series in Forest Resources. New York.
- DÍAZ-BALTEIRO, L. Y PRIETO RODRÍGUEZ, A.; 1999. Modelos de planificación forestal basados en la programación lineal. Aplicación al monte "Pinar de Navafría" (Segovia), *Inv. Agraria; Sist. Rec. For.* 3(1): 43-56.
- DÍAZ-BALTEIRO, L.; BERTOMEU, M. Y GIMÉNEZ, J.C.; 2008. *Gestión óptima de Eucalyptus globulus en Galicia*. Grupo de Investigación "Economía y Sostenibilidad del medio Natural". ETS Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica. Madrid.
- DIÉGUEZ-ARANDA, U.; BARRIO-ANTA, M.; CASTEDO-DORADO, F.; RUIZ GONZÁLEZ, A.D.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G. Y ROJO, A.; 2003. *Dendrometría*. Fundación Conde del Valle de Salazar. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.

- JOHNSON, K.N. & SCHEURMAN, H.L.; 1977. Techniques for prescribing optimal timber Harvest and investment under different objectives. Discussion and síntesis. *For. Sci.* (Monog.) 18: 1-31.
- PASALODOS-TATO, M.; 2010. *Optimising forest stand management in Galicia, north-western Spain*. Dissertationes Forestales 102. University of Eastern Finland.
- PASALODOS-TATO, M.; PUKKALA, T. & CASTEDO-DORADO, F.; 2009. Models for the optimal Management of *Pinus radiata* D. Don in Galicia (north-western Spain) under risk of fire. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* 180(11/12): 238-249.
- PUKKALA, T.; 2002. *Multi-objective Forest Planning*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.
- ROMERO, C.; 1989. Modelos de planificación forestal: Una aproximación desde el análisis multicriterio. *Revista de Estudios Agro-Sociales* 147: 71-92.
- RIANO, D.; MEIER, E.; ALLGOWER, B.; CHUVIECO, E. & USTIN, S.L.; 2003. Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behaviour modeling. *Remote Sens. Environment* 86: 177-186.
- VAUHKONEN, J.; TOKOLA, T.; MALTAMO, M. & PACKALEN, P.; 2008. Effects of pulse density on predicting characteristics for Scandinavian commercial species of individual trees with Alpha Shape metrics of ALS data. *Can. J. Remote Sens.* 34(Suppl. 2): 441-459.