

6. ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA FIJACIÓN DE CO₂ EN LOS SISTEMAS FORESTALES

Luis Díaz Balteiro

Carlos Romero López

En este trabajo se pretende abordar el problema de la integración del carbono capturado en la gestión forestal. Esta cuestión se ha planteado bajo diversos enfoques, incorporándose como objetivo el carbono capturado dentro de dos tipos diferentes de manejo bien distintos, pero ambos válidos desde la óptica del Protocolo de Kyoto: las forestaciones y la gestión forestal asociada a las masas permanentes. Se han estudiado varios casos de forestaciones, y se ha construido un modelo basado en técnicas de optimización multicriterio para un caso real de una masa permanente. Los resultados muestran, en el caso de las forestaciones, las diferencias entre el óptimo privado y ambiental, y en el caso de las masas permanentes, el conflicto existente entre los diversos objetivos considerados.

Palabras clave: Ordenación de Montes, Fijación de Carbono, Gestión Forestal Sostenible, Optimización Multicriterio, Plantaciones.

Introducción

Desde hace muy pocos años se está produciendo una tendencia mundial que aboga por considerar a los ecosistemas forestales como posibles sumideros del CO₂ atmosférico, principal gas causante del calentamiento global. Dentro de la creciente importancia que hoy en día representan los bienes ambientales dentro de los ecosistemas forestales, este trabajo ha pretendido centrarse en este objetivo, el CO₂ capturado por los bosques, que últimamente está recibiendo una gran interés, y que presenta unas características que le convierten en un subrogado de los bienes ambientales dentro de los sistemas forestales. De hecho, también se admite unánimemente que la captura de CO₂ es uno de los criterios que es preciso medir si se quiere evaluar la sostenibilidad de un ecosistema forestal. Así, en todas las definiciones que se dan de una gestión forestal sostenible, la captura de CO₂ siempre se incluye en estas baterías de criterios e indicadores, como los desarrollados a partir de la 2ª Conferencia Ministerial para la protección de los bosques europeos, celebrada en Helsinki en 1993.

Ante este cambio en relación a los objetivos tradicionalmente considerados en el manejo forestal, se impone una adaptación de los métodos empleados al nuevo contexto que ya no se puede calificar de monocriterio. Así, los métodos clásicos para determinar el turno óptimo no son directamente aplicados cuando se considera, además de la madera, el carbono capturado. Es preciso, como han hecho diversos autores (de una manera pionera Englin y Callaway, 1993, y posteriormente Hoen, 1994; van Kooten et al., 1995; Romero et al., 1998) desarrollar modelos capaces de incorporar la captura de CO₂ al clásico modelo de Faustmann.

Otra dirección que la nueva situación requiere explorar consiste en la consideración explícita de la fijación de CO₂ como un objetivo más dentro de una planificación forestal de tipo estratégico. Así, se requieren modelos distintos a los habitualmente empleados en España, y que se basan en herramientas optimizadoras (Hoen y Solberg, 1994). En este caso se propone utilizar la programación por metas para integrar, además de la captura de CO₂, diversos objetivos tanto de naturaleza económica como selvícola.

Los objetivos que se pretenden lograr en este trabajo se pueden resumir en tres ideas bien diferentes. En primer lugar se intenta estudiar cómo influye la consideración de este objetivo en las

plantaciones y, más genéricamente, en el cambio de uso de la tierra. A continuación, se pretende investigar cómo introducir el carbono capturado como un objetivo más dentro de un sistema de planificación forestal estratégica. Finalmente se insistirá sobre el impacto que causan en las soluciones obtenidas cambios en distintos parámetros como pueden ser el precio de la tonelada capturada de carbono y la tasa de descuento

Comentario [LD1]: Poner un párrafo con lo que pueda pasar a partir del 2012 y su influencia en las masas forestales

Aspectos económicos de la captura de carbono

En este apartado se pretende realizar unas breves consideraciones acerca de algunos aspectos económicos y empresariales relacionados con la fijación de carbono. En primer lugar, es preciso tener en cuenta que, a priori, nos encontramos ante un caso de lo que en economía se llama producción conjunta, es decir, con los mismos factores de producción obtenemos simultáneamente varios outputs. El caso más sencillo puede ser, por ejemplo, la obtención de madera, y a la vez, el carbono capturado. Sin embargo, al hacer esta hipótesis estamos admitiendo que el propietario está empleando la misma cantidad de uno de los factores de producción (esfuerzo de gestión) para ambos outputs. Hoy en día puede ser así, pero es necesario apuntar que si se forma un mercado global de créditos de carbono, es probable que haya que modificar esta hipótesis. También la existencia de posibles cambios en el precio del otro output considerado (madera) pueden modificar sensiblemente la gestión con respecto al carbono, y viceversa.

En esta línea, es factible augurar la existencia de un mercado de este tipo a nivel global. Este tipo de mercados ya comienza a consolidarse en la UE después de haber experimentado mercados nacionales con resultados muy prometedores (Dinamarca, Reino Unido), sobre todo en el caso británico. En otros países (Estados Unidos, Costa Rica, Australia, etc.) existen iniciativas parecidas. Incluso, algunos autores auguran (Foroohar, 2001) que la captura de carbono se convierta a nivel global en uno de los mayores mercados de materias primas ("commodities"). Algunos estudios (Carle et al., 2002) citando informaciones de la FAO, apuntan a que a nivel global las plantaciones forestales que tienen como principal objetivo la captura de carbono suman 4 millones de hectáreas, apoyadas fundamentalmente por inversores internacionales y bancos internacionales de desarrollo. Es preciso apuntar que también existen evidencias a nivel empresarial. Así, resulta evidente comprobar cómo algunas multinacionales están promoviendo cambios en sus tecnologías para reducir las emisiones de este gas, o bien agrupándose para apoyar la firma del Protocolo de Kyoto.

Comentario [LD2]: Ampliar. Poner gráfico evolución precio y las cantidades intercambiadas. Explicar que no se corresponden a proyectos forestales

Si se consume esta hipótesis, es fácil pensar que se producirán cambios dentro de los usos del suelo, dentro del sector forestal y también en la agricultura, promoviéndose por ejemplo ciertas prácticas más conservadoras en relación a la fijación de CO₂. El precio que tendrá cada tonelada de carbono capturado será un elemento clave para la realización de estos cambios. En efecto, cuanto mayor sea el precio, mayor incentivo existirá para reducir las emisiones, aunque factores como la negativa americana a firmar el protocolo de Kyoto pueden condicionar un mercado caracterizado por unas cantidades demandas menores de las previstas, y un precio también reducido (Jotzo y Michaelowa, 2002).

Desde el lado de la oferta se puede observar que los factores que más directamente influirán en la fijación del precio serán el coste de reducción de las emisiones y el coste de actuaciones competitivas con estas reducciones (forestaciones). Algunos trabajos han intentado estimar el coste de fijar el carbono atmosférico utilizando forestaciones, y la mayoría de ellos (Gago y Lavandeira, 1999) probablemente no reflejen todos los costes, en especial el coste de oportunidad de iniciar esa forestación, por lo que estos costes son probablemente muy bajos.

Por el lado de la demanda habría que tener en cuenta los incentivos promovidos por diferentes políticas (nacionales, supranacionales, etc.) y por otros agentes (ONGs) para incentivar la captura de carbono. Finalmente, es preciso apuntar que este mercado se prevé muy diferente al de la madera en cuanto a aspectos como su transparencia y su vinculación a distintos estamentos de la sociedad,

ya que se trata de un mercado mucho más dinámico y con grandes posibilidades de extensión (mercados de futuros, de opciones, etc.).

También es preciso señalar el hecho de que se pueden alentar desde los poderes públicos otros mecanismos para intentar el cumplimiento de estos objetivos ambientales. Uno de ellos podría ser el establecimiento de un impuesto por cada t de carbono emitida a la atmósfera. Con esta medida se intentaría gravar al sector más contaminante (sector energético), pero desde un punto de vista de equidad también debiera abarcar a los sectores agrícolas y de transporte, responsables de una parte significativa de las emisiones. A diferencia del caso eléctrico, la aplicación de esta medida conllevaría unos costes de transacción elevados. En todo caso, es preciso señalar que en nuestro país en general no se aplican este tipo de tasas que gravan la emisión de gases contaminantes. Solamente a nivel autonómico existen algunos ejemplos (por ejemplo, SO₂ en Galicia). Sin embargo, en la Unión Europea se aplica expresamente para el carbono en países como Dinamarca, Finlandia, Italia, Holanda y Suecia (Gago y Lavandeira, 1999). Es preciso enfatizar que son impuestos que se basan en el contenido de carbono de cada fuente energética, y no se deben confundir con los impuestos con que se gravan, por ejemplo, los productos derivados del petróleo. En definitiva, este instrumento útil y que muchos autores vinculan a estrategias de desarrollo sostenible en nuestro país no se ha desarrollado (incluso la industria del carbón continúa estando fuertemente subvencionada), por lo que la comparación con la otra opción de política ambiental contemplada en este trabajo (establecimiento de mercados de carbono) no es posible.

Integración de la captura de carbono en la gestión forestal

La gestión que incluya como objetivo la captura de carbono debería conducir a un incremento en el carbono capturado por las masas forestales, sobre el que debería existir en ausencia de este tipo de manejo. El incremento en el carbono bruto acumulado se deberá o bien a un aumento en la biomasa, o bien a un incremento en el carbono existente en el suelo. Por otro lado, si se contabiliza el carbono neto, el incremento también puede deberse a un aumento en el stock de productos derivados de la madera con una vida útil dilatada. Como se describirá a continuación, la gestión forestal posee herramientas que conducen al incremento en el carbono acumulado bajo cualquiera de las formas citadas.

Dejando a un lado opciones a nivel agregado (disminuir la deforestación en los trópicos, aumentar el ritmo de las forestaciones, etc.), a nivel de monte es factible arbitrar ciertas medidas que pueden mejorar el balance de carbono. Como se ha comentado en un apartado precedente, este tipo de medidas están incluidas en el artículo 3.4 del protocolo de Kyoto, aunque recientemente se ha limitado su alcance en la cumbre de Bonn. De una manera sencilla, y sin entrar en posibles interrelaciones entre ellas, un conjunto de medidas consistiría en aumentar el carbono a través de actuaciones en cuanto la densidad de la masa: evitar rasos, cortas de árboles enfermos, etc. y optimizar el conjunto de operaciones selvícolas para obtener un balance de carbono superior. En efecto, salvo en algunas plantaciones con especies de crecimiento muy rápido, lo habitual es que el número de plantas al inicio de la plantación o de la regeneración natural de la masa sea mucho mayor que el número existente en el momento de la corta. Eso es debido a que el gestor a través de una programación de cortas intermedias va eligiendo los árboles de mayor porvenir y estimulando el crecimiento de la masa. Pues bien, si se optimizan estas operaciones para que el carbono acumulado en el momento de la corta sea máximo se estará cumpliendo el objetivo previsto.

Otro conjunto de pautas lo compondrían aquellas que implicaran un incremento en el crecimiento de la masa. Así, aspectos como la correcta elección de especies, la mejora genética, la fertilización o el riego en manejos más intensivos o la reducción de los posibles retrasos en la regeneración natural pueden conducir en principio a un incremento del stock de carbono. Finalmente, otras acciones que pueden llevarse a cabo serían la protección de la masa frente al fuego y agentes patógenos, dejar los árboles muertos en pie sin cortar o gestionar los residuos asociados a las cortas con el fin de que puedan tener un aprovechamiento energético.

Lógicamente, todas estas medidas hay que situarlas dentro de un contexto económico. Es decir, habría que comparar el coste de fijar una tonelada adicional de carbono con el precio que tendría ésta en el mercado. Las incertidumbres existentes hoy en día sobre este tipo de fijación de carbono no estimulan la realización de este tipo de análisis, por lo que la única acción que se contempla es el cambio en el turno de la masa. Se ha considerado oportuno estudiar esta medida aislada de las anteriores ya que es la más habitualmente empleada. Aunque en el próximo apartado se formulará metodológicamente la obtención del turno óptimo cuando se consideran dos objetivos (madera y carbono bruto) en el caso de una plantación, es preciso avanzar que alargando o acortando el turno de la masa se puede aumentar el carbono acumulado, tanto en la parte aérea como en el suelo, dependiendo de la situación de partida y el tipo de carbono que se mida. En el caso de masas permanentes como regla general se puede afirmar que alargando el turno se aumenta la fijación de carbono (Binkley et al., 1997), aunque también hay que tener presente el plazo considerado en el análisis. Por último, es necesario insistir que si se considera el carbono neto, es decir el carbono contabilizado incluyendo la permanencia en los productos derivados de la madera, cambios en el turno (que no tienen que ser muy significativos) pueden provocar un cambio de uso notable en los productos derivados de la madera, lo que incrementará esta forma de carbono, aunque actualmente no se contabilice en los acuerdos internacionales.

Por otro lado, es preciso apuntar el hecho de que aunque la captura de carbono sea vista como un subrogado de los bienes ambientales de los montes, máxime si en un futuro cercano presenta un precio de mercado, esta circunstancia no debe ocultar en la toma de decisiones la existencia de otras externalidades positivas generadas por los sistemas forestales. Aunque muchas veces las acciones que se puedan plantear para optimizar la captura de carbono pueden favorecer a otras externalidades positivas que se producen en los bosques, en general no se debiera reducir el problema a un caso de dos producciones, ya que esto podría perjudicar las características de los demás bienes y servicios de los ecosistemas forestales, y por tanto amenazaría el principio que desde el inicio de la ordenación de montes ha estado siempre presente: la persistencia de las masas forestales. Hoy en día no se concibe la gestión forestal sin que se integre dentro de un uso múltiple del bosque. En esta línea es preciso apuntar que no existen incompatibilidades entre el objetivo captura de carbono y el objetivo biodiversidad cuando se habla de masas permanentes, pero como acertadamente apuntan diversos autores (Caparrós et al., 2001), (Noss, 2001), la sustitución de bosques maduros por plantaciones o los incentivos para realizar forestaciones con ciertas especies invasoras pueden afectar negativamente a la biodiversidad.

Material y Métodos

En este apartado se pretende describir la metodología empleada para los diversos casos considerados. Antes de precisar estos aspectos, es preciso recalcar que el ámbito de este trabajo es determinista, es decir, no se han tenido en cuenta las incertidumbres asociadas a este problema, cuando en algunos apartados anteriores se han explicitado algunas de ellas. Las razones que explican esta circunstancia son fundamentalmente dos, y no se refieren a la imposibilidad de adaptar los modelos que se van a exponer a entornos estocásticos. El primer motivo se refiere a la complejidad del problema que provoca incertidumbres tanto en aspectos políticos, como técnicos e incluso los relativos al cambio en las preferencias sociales. La otra razón deriva de que todavía existen lagunas en cuanto a la información disponible sobre ciertos aspectos técnicos que intervienen en los modelos aquí planteados. Por otro lado, repasando la literatura se puede comprobar cómo las aproximaciones a este tipo de planteamientos que incorporan la incertidumbre a estos problemas de gestión forestal asociada con el cambio climático presentan resultados sesgados por las carencias anteriormente expuestas (Krcmar et al., 2001). No obstante, en un trabajo reciente (Díaz-Balteiro & Rodríguez, 2006) se muestra como combinaciones de entornos no deterministas y precios elevados de la t del carbono capturado llevan a soluciones óptimas diferentes de las que se habían propuesto en un entorno determinista.

Esta hipótesis incluida en el análisis implica que no se han tenido en cuenta ni la existencia de variaciones en las condiciones iniciales (precio de la madera, existencia de perturbaciones de cualquier tipo que puedan afectar los rendimientos madereros de las plantaciones, etc.), ni posibles cambios en la gestión (motivados por avances tecnológicos, cambio en el precio de los outputs, etc.) a lo largo de los sucesivos turnos incluidos en el análisis.

A continuación, se van a desarrollar los aspectos metodológicos necesarios para profundizar en las interrelaciones de entre varios objetivos dentro de la gestión forestal. Uno de ellos es el cálculo del turno forestal óptimo cuando se considera más de un output forestal. Seguidamente, se abordará un enfoque no específicamente forestal, pero que se adapta perfectamente a este ámbito gracias a su versatilidad. En concreto, se trata de la teoría de la decisión multicriterio. Dentro de este enfoque se encuadran numerosas herramientas metodológicas entre las que se ha elegido la programación por metas ("goal programming"), cuyos fundamentos aplicados al caso que nos ocupa se van a desarrollar en un apartado posterior. Finalmente, se hará una breve mención de la forma de calcular tanto el carbono fijado por los sistemas forestales estudiados como el precio asignado a cada unidad de carbono fijada.

Turno forestal económicamente óptimo

Para realizar este análisis se ha considerado la metodología habitualmente empleada para el cálculo del turno económicamente óptimo. Aunque en la literatura se citan diversas formas de establecer el turno óptimo de una masa forestal, según se consideren criterios biológicos, forestales o económicos, bajo una perspectiva financiera está admitido que la solución correcta es la propuesta por Faustmann (Faustmann, 1849). Esta metodología asocia la vida óptima de una masa a aquella edad en la cual el valor actual neto (VAN) asociado a la inversión subyacente es máximo, pero teniendo en cuenta el coste de oportunidad de tener el suelo ocupado por el vuelo. En diversos textos (Romero, 1997) se puede encontrar una amplia y clara exposición de los turnos más utilizados en el ámbito forestal, así como del análisis y extensiones de la solución propuesta por Faustmann. Por ejemplo, en Caparrós et al. (2003a) se parte de esta metodología para analizar un problema que incluye como objetivos la madera, la captura de carbono y la biodiversidad.

Para introducir en la fórmula de Faustmann los diversos cobros y pagos asociados a la vida de la forestación, se ha seguido un procedimiento similar al mostrado en (Díaz y Romero, 1995) y Mutke et al., (2000). Para ello, se asimila el producto $P \cdot f(t)$ con una función de ingreso temporal $I(t)$ que representa el ingreso obtenido por la venta de madera (producto del precio P por la producción $f(t)$) a los t años. Además del coste de forestación (K), existen otros cobros y pagos que es necesario introducir en el análisis. Así, G representa los pagos anuales de explotación; Y_s serían los pagos debido a labores culturales (labores de mantenimiento, clareos, etc.) y C_l serían los cobros derivados de las posibles claras efectuadas. Las ayudas comunitarias se han introducido del siguiente modo: P_m representa la prima de mantenimiento que se percibe durante los primeros cinco años; P_c se corresponde a la prima compensatoria percibida durante veinte años por cambio de uso del suelo y K_l sería la subvención para los gastos de forestación. Este sería el caso más general, donde se supone que la forestación cumple los requisitos incluidos para participarse de los tres tipos de ayudas y que estas primas se cobran de forma escalonada en el año correspondiente.

Para el cálculo del turno óptimo cuando se incorpora el carbono al análisis no son aplicables ni la metodología de Faustmann, al no incorporar otros bienes y servicios no madereros, ni el turno habitualmente aplicada cuando se integran otros objetivos no madereros, conocido como turno de Hartman (Hartman, 1976), al requerir este enfoque la estimación de un flujo de servicios medidos en unidades monetarias. En este trabajo se ha seguido una metodología similar a la propuesta en (Romero et al., 1998) a la hora de integrar el carbono capturado. Así, se introducirá una subvención ($A \text{ €}$) por cada t m de carbono capturado por la masa. De igual forma, se aplicará un impuesto (también de $A \text{ €}$) por cada t de carbono que se emite a la atmósfera a partir de los productos obtenidos de la citada plantación. Introduciendo todas estas componentes, y considerando que las

subvenciones sólo se reciben en la primera forestación, el VAN asociado a la inversión sería el siguiente:

$$VAN = \frac{I(t) \cdot e^{-i \cdot t} - K - G \cdot \alpha - \sum \frac{Y_s}{\forall s} \cdot e^{-i \cdot s} + \sum \frac{C_l}{\forall l} \cdot e^{-i \cdot l} + A \sum \frac{C_a}{\forall r} \cdot e^{-ir} - A \sum \frac{C_e}{\forall v} \cdot e^{-iv}}{1 - e^{-i \cdot t}}$$

$$+ K_1 + P_m \cdot \beta + P_c \cdot \gamma$$

con:

$$\alpha = \frac{e^{(-i \cdot 1)} \cdot (e^{(-i \cdot t)} - 1)}{(e^{(-i \cdot 1)} - 1)} \quad [1]$$

$$\beta = \frac{e^{(-i \cdot 1)} \cdot (e^{(-i \cdot 5)} - 1)}{(e^{(-i \cdot 1)} - 1)}$$

$$\gamma = \frac{e^{(-i \cdot 1)} \cdot (e^{(-i \cdot 20)} - 1)}{(e^{(-i \cdot 1)} - 1)}$$

En donde C_a representaría el carbono capturado a la edad r que corresponde a una clara o a la corta final, mientras que C_e sería el carbono emitido en el momento v . En principio únicamente se ha estimado el carbono almacenado obtenido a lo largo de la vida de la plantación a través de la madera comercializable, tanto de la corta final como de las claras efectuadas. No se ha considerado el carbono capturado en otro tipo de biomasa, ni la variación del carbono del suelo. Esta exclusión se justifica en la dificultad de obtener datos fiables sobre el carbono capturado tanto en otras facciones de la biomasa como en el suelo. Así, en España no abundan los trabajos en esta línea, a excepción de algún trabajo reciente como el de Montero et al. (2005). En principio se va a aplicar una tasa de descuento del 7%, y no se va a considerar ningún pago de impuestos. La tasa de descuento elegida parece la adecuada en el caso de unas plantaciones de chopo de propiedad privada en el contexto económico actual (Díaz, 1998). Tanto el turno óptimo como la rentabilidad de las distintas plantaciones quedarían definidos maximizando la ecuación anterior.

La metodología aquí introducida supone que el propietario sólo recibirá cobros por el carbono secuestrado en el momento en que se produzca una corta, bien sea una corta final o intermedia. Es decir, se supone que al igual que la madera, el ingreso lo recibe cuando se aprovecha la masa. Sin embargo, en la literatura abunda un enfoque similar, pero considerando un cobro anual por el carbono secuestrado (Hoen, 1994; van Kooten et al., 1995; Eizinger y Jeffs, 2000; Feng et al., 2002; Stainback y Alavalapati, 2002). Este camino, que supone seguir el postulado de Hartman a la hora de incorporar en el cálculo del turno óptimo otros bienes y servicios no se ha elegido por diversas razones. Por ejemplo, desde un punto de vista metodológico, supone admitir que la captura de carbono es monótonamente creciente. Esto es así, si se considera el carbono bruto, pero si se considera el carbono neto pueden existir años en los cuales las emisiones superen a la fijación anual. Por otro lado, asumir una captura anual supone conocer de antemano el carbono capturado por cada masa forestal en cada año de su vida. Esta condición es muy difícil de trasladar a la realidad, y de hecho todavía no se han resuelto los problemas de qué carbono considerar y cómo se mide. Todavía es prematuro para aventurar cómo se va a solucionar este tipo de problema.

Por último, y como se comprueba en la ecuación [1], se han considerado únicamente las ayudas comunitarias referidas a la forestación de tierras agrarias, sin tener en cuenta ningún otro tipo de subvención, ni tampoco de pagos como puedan ser los impuestos.

Programación por metas

Conforme se han ido modificando las demandas que la sociedad plantea a los ecosistemas forestales, las herramientas tradicionalmente utilizadas en la ordenación de montes y en la planificación forestal se han mostrado insuficientes. En efecto, en este nuevo contexto el centro

decisor maneja varios objetivos a la vez, en lugar del caso tradicional donde existía un único objetivo. En general, este objetivo tradicional ha consistido en la producción de madera de una manera sostenida, unida a la consecución de la regeneración natural. Por este motivo en nuestro contexto de producción conjunta se ha acudido a las herramientas propias de la investigación operativa, que dispone de enfoques como la teoría de la decisión multicriterio especialmente adaptados para casos que abarcan más de un objetivo, como es la situación que nos ocupa.

Dentro de este amplio conjunto de enfoques se ha elegido la programación por metas (“goal programming”) por tratarse del método más flexible y con una mayor capacidad de adaptación al contexto decisional que planteamos. Aunque existen trabajos introductorios (Ignizio, 1976; Romero, 1993) y avanzados (Ignizio y Romero, 2003; Romero, 1991) donde se explican las principales características de esta metodología, no ha sido una técnica excesivamente aplicada en el ámbito forestal, tanto en España como en otros países.

El punto de partida de la programación por metas consiste en definir las diferentes metas consideradas en el problema. En el caso que nos ocupa éstas serán: una de tipo económico: lograr un VAN asociado a la madera máximo; tres de tipo forestal: conseguir un inventario a final del horizonte de actuación satisfactorio, una igualdad de volumen en cada uno de los períodos considerados y un monte regulado (entendiendo como tal al bosque en el que al final del horizonte de actuación, cada clase de edad ocupa la misma superficie. Esta circunstancia promueve un aprovechamiento sostenible de la madera); y una de tipo ambiental: maximizar el carbono capturado. Las tres metas forestales encierran los principios de la gestión forestal tradicional, y aseguran un aprovechamiento sostenido de la masa. El horizonte de planificación, es decir el lapso temporal sobre el cual va a tener lugar esta planificación, se sitúa en 100 años, dividido en 10 períodos de 10 años. Este horizonte temporal es el usual en problemas de planificación estratégica. A la hora de formular este modelo, en vez de maximizar los objetivos lo que se hace es minimizar las desviaciones con respecto a los óptimos de cada objetivo. Una variable de desviación negativa mide el incumplimiento por lo bajo de una determinada meta, mientras que una variable de desviación positiva muestra el logro por exceso de una determinada meta. Para ello es necesario optimizar cada uno de los 5 objetivos por separado, obteniéndose lo que se conoce como matriz de pagos.

Una vez que se han definido las metas, se construye la función logro que agrupa a las desviaciones no deseadas con respecto a los valores óptimos que pueden alcanzar cada uno de los objetivos. De las distintas posibilidades que existen, se han construido dos modelos basados en la programación por metas lexicográfica. Básicamente, se trata de agrupar las metas en distintos niveles e ir intentando alcanzar todas las metas según los distintos niveles de prioridad definidos. En este caso, la primera prioridad consiste en alcanzar un inventario a final del horizonte de actuación igual al actualmente existente, la segunda prioridad alcanzar un flujo de cortas igual en cada uno de los períodos, y la tercera prioridad incluiría las otras tres metas: cumplir la condición de regulación, maximizar el VAN y maximizar el carbono capturado. Obviamente, esta ordenación de las prioridades dependerá del centro decisor, permitiendo el modelo cambiar fácilmente este orden. Lógicamente, conforme se descienda en el orden de prioridades, será más complicado cumplir a la vez todas las metas. Es interesante apuntar que las metas ubicadas en el tercer nivel de prioridad (regulación, VAN y captura de carbono) se han optimizado de dos maneras alternativas. En primer lugar, se ha procedido a minimizar la suma ponderada y normalizada de las variables de desviación no deseadas correspondientes a dichas metas. De esta manera, se consigue la solución o estrategia de cortas que proporcionará un máximo logro agregado para el conjunto de las metas (solución de máxima eficiencia). En segundo lugar, se ha procedido a minimizar la máxima desviación ponderada y normalizada. De esta manera, se minimiza el grado de discrepancia que corresponde a la meta más desplazada, obteniéndose así la solución más equilibrada. En Díaz-Balteiro y Romero (2003, 2004) se pueden encontrar los detalles de estos modelos.

El carbono capturado

Para estimar el carbono contenido en el monte, se ha seguido el procedimiento descrito en Díaz (1999). Mediante una serie de cálculos se evalúa el carbono futuro que se capturará en cada año, incluyendo no sólo el relativo al crecimiento de la masa, sino también el carbono retenido en productos obtenidos a partir de la madera de las cortas de regeneración. En este modelo, y atendiendo a los usos más habituales para las dos especies consideradas, se van a considerar tres tipos de destinos para la madera: chapa, sierra y tableros, descartándose otros posibles usos. El cálculo del carbono según cada posible destino se realiza asumiendo diversas hipótesis expuestas en la literatura (Row y Phelps, 1996), y se asume que todo el carbono retorna a la atmósfera pasados 150 años. Cabe señalar el hecho de que en este análisis no se ha considerado la existencia de un posible reciclaje de los productos, debido a la falta de datos fiables sobre la situación actual y la posible evolución en las próximas décadas. Por último, no se van a tener en cuenta las emisiones procedentes de aquellos productos construidos con madera cortada en el monte con anterioridad al comienzo de este análisis.

Comentario [LD3]: ¿incluir las otras estimaciones del carbono, además del tronco?

En (Row y Phelps, 1996) se asumen unas determinadas vidas útiles medias para cada producto derivado de la madera, así como unos períodos de descomposición específicos para cada uno de los outputs. Otros trabajos (Bateman y Lovett, 2000; Eizinger y Jeffs, 2000; Liski et al., 2001) describen procedimientos muy similares para obtener el carbono neto, el primero de ellos incorporando además las variaciones de carbono producidas en el suelo.

Como se ha comentado anteriormente, existen marcadas diferencias entre los bienes incorporados al análisis. Mientras que la madera es un bien privado, con un mercado perfectamente definido, el CO₂ capturado hoy en día es un bien público por lo que en principio no existe un mercado para el mismo y por tanto no se le puede asignar un precio. Desde un punto de vista económico, la presencia de este bien público genera un fallo de mercado provocando una divergencia entre el óptimo privado y el óptimo social, lo que implica una asignación ineficiente de recursos. Para subsanar este problema se han propuesto diversas metodologías que básicamente pasan por conocer cuánto estaría dispuesto a pagar la sociedad por cada tm de C atmosférico que pasa a forma terrestre. Básicamente, en la literatura se citan con profusión cuatro tipos de medidas:

- Tomar como subvención el impuesto que grava las emisiones de CO₂ procedentes de los combustibles fósiles. A pesar de que esta solución ha sido apuntada reiteradamente por diversos expertos, este impuesto ya se encuentra actualmente en vigor en seis países europeos (Gago y Lavandeira, 1999; Stavins, 1999) y se espera que pronto alguno más se adhiera a esta medida. Dado que esta tasa difiere de un país a otro, el precio medio de una tonelada de carbono no es homogéneo (Baranzini et al., 2000).
- Otros autores, en base a sus investigaciones han propuesto un valor fijo, que suele oscilar entre 25 -200\$/tm C. Existen numerosos ejemplos al respecto (van Kooten et al., 1995; Sedjo, 1999; Eizinger y Jeffs, 2000). En España, algunos autores (Campos y Caparrós, 1999) adoptan un valor de 25€/Tm C.
- Igualar el óptimo privado y social a través de una subvención al precio de la madera. En Romero et al. (1998) se citan valores, que oscilan entre 19-37 \$/m³ para el haya en Navarra.
- Se propone el establecimiento de mercados de permisos de carbono, estructuras todavía embrionarias y aplicadas en muy pocos países, pero con un enorme desarrollo potencial. Estos mercados están alentados directamente por el protocolo de Kyoto, pero su difusión se ve complicada por diversos aspectos, como puede ser el precio bajo en que hasta ahora se ha valorado cada tonelada de carbono y las dificultades en realizar una contabilidad real del carbono capturado. Quizá el ejemplo más claro y reciente es el mercado de permisos de carbono recientemente instaurado en Gran Bretaña y que actualmente ronda los 10€/tm C, esperándose que cuando estos mercados se amplíen, este precio suba.

De todas las metodologías descritas, en este trabajo se ha optado por igualar el óptimo privado y social a través de una subvención al precio de la madera. Por último, es necesario apuntar que se ha considerado la misma tasa de descuento para ambos productos. Esta circunstancia se justifica por la cercana posibilidad de que el carbono capturado se convierta en un bien privado.

Finalmente, es preciso resaltar el hecho de que la metodología empleada nos va permitir responder a una serie de preguntas. La primera sería como podemos integrar la captura de carbono en el proceso de decisión. Es decir, si podemos calcular una rentabilidad a la plantación incluyendo la cantidad de carbono como output, y cómo varía el turno óptimo al considerar ambos outputs. Otra cuestión directamente relacionada consistiría en analizar las situaciones para las que se justificaría pasar de un cultivo agrícola a una plantación forestal. Por último, se considera importante ver, desde un punto de vista tanto privado como social, el efecto de las vigentes ayudas de forestación de tierras agrarias. En el apartado dedicado a resultados se ofrecerán respuestas a estas cuestiones. A continuación se van a describir los casos estudiados.

Casos estudiados

Para estudiar la optimización de la producción conjunta madera-captura de carbono en diversas formas de gestión forestal aplicadas en España, se han barajado diversas posibilidades y al final se han tomado en consideración varios casos, tanto aquellos ejemplos de manejo intensivo, como las plantaciones y otros, asociados a un tipo de gestión más extensiva, y caracterizados por presentar un turno dilatado.

Plantaciones

El primer caso que se va a analizar se corresponde a uno de los ejemplos de gestión forestal más intensiva, como pueden ser las plantaciones. Dado que, como se ha apuntado anteriormente, los bosques son sumideros netos de carbono, parece sensato suponer que si se establece un mercado para los créditos asociados al carbono, esta circunstancia puede fomentar el cambio de usos agrícolas de la tierra hacia usos forestales. A la hora de plantearse este cambio de uso, un propietario se enfrenta a un proceso de decisión complejo y que muchas veces no es monocriterio (por ejemplo, maximizar el VAN asociado a la inversión), sino que influyen otros objetivos (precisamente los aspectos ambientales). A continuación se va a analizar la provisión de este bien bajo una perspectiva dual: por un lado, y desde un punto de vista privado, cómo influiría en el propietario la consideración de la captura de carbono, y por otro lado, desde el punto de vista social, cómo afectan a la provisión óptima de este bien la existencia del sistema actual de ayudas a la forestación. Para simplificar los cálculos, se obviará la cantidad de carbono fijada en los terrenos anteriormente agrícolas.

Aunque, como se ha comentado con anterioridad, en el proceso de decisión de iniciar una forestación se pueden o han podido tomar opciones pensando sólo en un tipo de producción (madera), esta circunstancia no excluye que se pueda contabilizar este otro output de tipo ambiental. Así, bajo la óptica de un propietario privado o un posible inversor en esta clase de activos forestales, estas circunstancias sitúan al centro decisor ante un problema de producción conjunta, prácticamente homotética, frente al único objetivo que existía hasta hace poco tiempo. Admitiendo este hecho, en primer lugar es preciso señalar las marcadas diferencias entre ambos bienes. Mientras que la madera es un bien privado, con un mercado perfectamente definido, el CO₂ capturado todavía es preciso catalogarlo como un bien público, por lo que en principio no existe un mercado para el mismo y por tanto no se le puede asignar un precio, aunque es probable que en un plazo de tiempo breve cambie esta circunstancia. Desde un punto de vista económico, la presencia de este bien público genera un fallo de mercado provocando una divergencia entre el óptimo privado y el óptimo social, desconocido en principio. Aunque no está clara la forma en que el propietario puede beneficiarse de esta circunstancia, si se contabiliza el carbono capturado parece que puede aumentar sus ingresos sin alterar ninguno de los inputs, además de obtener otros efectos positivos como puede

ser el posible incremento del precio de la tierra. En esta tesitura, el propietario pensará en cómo ajustar sus factores de producción para obtener el máximo rendimiento a ambas producciones; en definitiva, se planteará la optimización de un proceso de optimización conjunta (carbono capturado versus madera).

Una hipótesis habitualmente empleada en este tipo de análisis sería la de suponer que el propietario maximiza el ingreso derivado de la corta final. Sin embargo, hay que tener presente que en la decisión de cortar una masa forestal intervienen, en muchas ocasiones, otras variables además de las puramente financieras. En España no abundan estudios precisos sobre el comportamiento de los propietarios forestales, pero investigaciones similares realizadas en otros países (Kuuluvainen et al., 1997; Karpinnen, 1998; Kline et al., 2000) confirman la idea de que intervienen otros factores (ambientales, estéticos, edad y renta del propietario, utilización de los diversos beneficios proporcionados por la masa, etc.) en esta decisión. Incluso algunos otros autores (Stavins, 1999) apuntan otra serie de razones (restricciones debidas a la falta de liquidez, incertidumbre, otros costes y beneficios marginales de usos alternativos de la tierra) que podrían explicar las preferencias de los propietarios ante cambios del uso agrícola al forestal.

Con el fin de cubrir un amplio intervalo en cuanto al turno de las especies y el tipo de subvención percibida, se han considerado tres tipos de plantaciones, en función de la longevidad del turno habitualmente empleado. En primer lugar se ha considerado una plantación de chopos (*Populus* sp.), cultivo forestal abundante en regiones como Castilla y León, donde presenta un turno medio alrededor de los 15 años. Para el cálculo de su función de producción se ha partido de las tablas de producción existentes para uno de los clones utilizados en la Meseta Central, el clon *Populus x euroamericana* "Campeador", (González, 1986) correspondiente a una calidad de estación media (calidad III), aunque es necesario precisar que según las tablas de producción más recientes para esta especie en la Cuenca del Duero (Bravo et al., 1995; Bravo et al., 1996), los volúmenes predichos por esta relación equivalen a la producción correspondiente a la mejor calidad de estación. En cuanto al espaciamiento y tratamientos culturales, se ha seguido la selvicultura propuesta en Fernández (1998). Básicamente, se trata de una plantación a raíz profunda, con 278 pies/ha, en la que se realizan 3 podas y diversos gradeos. Con el fin de no desviar la atención del lector con un conjunto de informaciones técnicas, en la Tabla 1 se recogen diversas características técnicas y económicas de las especies estudiadas.

Un segundo tipo de plantaciones sería el de pino insigne (*Pinus radiata* D. Don), abundante en diversas zonas del norte de España, especialmente en el País Vasco. Siguiendo los datos de aportados en Chauchard (2000), se ha estimado una función de producción hasta los 40 años. A diferencia del caso anterior, se exige la realización de claras cada 5 años a partir de los 10 años. Se van a considerar las repercusiones tanto económicas como en cuanto al balance del carbono asociadas a dichas claras, que además influyen en el destino principal de la madera. Debido al cambio de manejo que parece se está introduciendo actualmente, dirigido a la consecución de maderas con destino a sierra con productos intermedios que se destinan a trituración, se ha alargado la posibilidad de ejecutar cortas finales hasta los 40 años. Otras informaciones relativas a cobros y pagos asociados a este tipo de forestación se recogen en la Tabla 1.

El último ejemplo de forestación que se ha estudiado se corresponde a una especie de crecimiento lento, el pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.), muy abundante en la mayoría de las zonas montañosas de la mitad norte de España, y que es una de las especies más emblemáticas en el ámbito forestal español. Aunque desde un punto de vista privado, y a pesar de presentar unas ayudas muy elevadas, parece complicado que únicamente contemplando los ingresos correspondientes a la madera algún particular pueda acometer de una manera rentable este tipo de forestaciones, se ha creído conveniente su inclusión por diversos motivos. En primer lugar, serían las plantaciones más afines con otros objetivos (biodiversidad, paisaje, etc.); por otro lado, se pueden obtener una diversidad mayor de productos que en los otros ejemplos considerados y, finalmente, resulta interesante ver la relación entre ambas producciones (madera y carbono) en horizontes temporales tan dilatados. Para representar la evolución de la plantación se ha utilizado el software "Silves 1.0" (del Río, 1999; del

Río y Montero, 2001). Este simulador permite modelizar diversos tipos de alternativas selvícolas, proporcionando los volúmenes correspondientes a cada clara, así como el volumen final. Se ha optado por una selvicultura con 3 claras. Como en el resto de las forestaciones propuestas, en la Tabla 1 se incorporan datos técnicos y económicos. Así, la tasa de descuento elegida es del 4%, es decir, 3 puntos por debajo de la que se eligió para las plantaciones de chopos, lo cual parece lógico dada la diferencia de horizontes temporales entre ambos tipos de plantaciones.

Tabla 1. Datos económicos y selvícolas correspondientes a los tres tipos de plantaciones considerados

	Populus sp.	Pinus radiata	Pinus Sylvestris
Coste de plantación	1.272 €/ha	1.563 €/ha	1.803 €/ha
Costes anuales	30 €/ha*año	12 €/ha*año	24 €/ha*año
Costes operaciones selvícolas*	1.190 €/ha	1.966 €/ha	1.194 €/ha
Ayudas a la forestación de tierras agrarias	K ₁	1.272 €/ha	1.266 €/ha
	P _m	150 €/ha	180 €/ha
	P _c	0 €/ha	166 €/ha
Volumen obtenido en el óptimo privado	356 m ³	377 m ³	237,9 m ³
Claros	no	sí	sí
Tasa de descuento	7%	7%	4%
Precio de la madera a la edad de corta	60-68 €/m ³	51 €/m ³	71,4-97,4 €/m ³

*descontados al año cero

Masas permanentes

El segundo caso analizado corresponde a las masas permanentes, es decir, aquellas masas forestales que no provienen de repoblaciones. Como ejemplos se han tomado dos sistemas forestales bien diferentes. Por un lado, un monte en concreto (“Pinar de Navafría”), monte paradigmático dentro de la gestión forestal en España en el que la especie principal es el pino albar y, por otro lado, un ejemplo de sistemas forestales abundantes en el centro de España, como son las masas de pino negral.

Con respecto al monte “Pinar de Navafría”, es preciso apuntar que comenzó a ser ordenado en 1895 por el método de tramos periódicos permanentes, revisándose hasta la fecha aproximadamente una vez por decenio. El objetivo principal de la ordenación ha sido la ejecución de la posibilidad, y la obtención de una regeneración natural viable. El turno de transformación finaliza próximamente, en el año 2008. Este tipo de gestión, tradicionalmente empleada en nuestro país, se caracteriza por no emplear explícitamente ninguna herramienta optimizadora y por estar muy centrado en aspectos relacionados con la selvicultura, prestando poca atención a la naturaleza económica del problema. No obstante, es preciso señalar el hecho que el manejo practicado ha asegurado hasta el momento un aprovechamiento de madera creciente en cada revisión, asegurando siempre la regeneración natural. Esta circunstancia lo convierte en un ejemplo de cómo la intervención humana puede lograr un aprovechamiento sostenible del recurso, sin poner en peligro las existencias de la masa en el futuro. En Montero et al. (2001) se describen las actuaciones selvícolas habitualmente utilizadas para esta especie en el Sistema Central.

Como punto de partida para este análisis se han tomado los datos correspondientes a la 9ª revisión de la ordenación de este monte (Prieto et al., 1991). Se ha optado por introducir un modelo de gestión basado en técnicas de optimización matemática, siguiendo el anteriormente citado como Modelo I (Díaz y Prieto, 1999). Se ha tomado un horizonte de planificación de 100 años, dividido

en 10 períodos (la mitad del período de regeneración utilizado en el proyecto de ordenación), y las posibles cortas se referirán al punto medio de cada período (5 años). Para establecer el turno no se ha tomado una edad de corta fija, sino que se ha elegido un amplio abanico que va desde los 80 a los 140 años. En esta decisión han primado razones productivas y tecnológicas. Aunque para conseguir incrementar el carbono capturado en las masas, se podría dilatar el turno máximo permitido, no se ha considerado esta posibilidad, debido a la mayor probabilidad de que a estas edades la masa comience a presentar síntomas de decrepitud y se desestabilice. A la hora de predecir el volumen de la masa, se han ajustado unas funciones que correlacionan la edad y el volumen, a partir de los datos proporcionados por el inventario del monte y las tablas de producción del pino silvestre en la Sierra de Guadarrama (Rojo y Montero, 1996). Asimismo, se ha optado por tomar una tasa de descuento real del 2%, tasa que se puede asimilar a una tasa social de descuento, proceder lógico, dado el carácter público de estos montes. En cuanto al cálculo de los precios, se ha tomado un precio base que se multiplica por un precio índice, en función del porcentaje de madera de chapa esperado que se han calculado en Montero et al. (1992). Con todos estos datos de partida, se han definido las prescripciones correspondientes (300 en total) y se han calculado para cada una de ellas la rentabilidad privada asociada al aprovechamiento de la madera y la cantidad de carbono capturado

FALTA POR PONER LO DE PINUS PINASTER

Resultados

Siguiendo el orden anteriormente mostrado, y con el fin de mejorar la claridad en la exposición, los resultados se van a dividir atendiendo a los dos casos considerados, las plantaciones y las masas permanentes

Plantaciones

En primer lugar conviene resaltar la importancia del plazo considerado en el análisis, sobre todo para el caso del carbono capturado. A pesar de las múltiples incertidumbres que todavía rodean a este output, y teniendo en cuenta la duración media de este tipo de inversiones, es necesario fijar un plazo en el análisis para poder realizar ciertas comparaciones. Es decir, la pregunta sería, ¿para contabilizar el carbono capturado consideramos un solo turno, un plazo de 100 años, un plazo de 200 años...? Dado que no se tiene respuesta a esta pregunta, ya que implicaría conocer la evolución del avance tecnológico, en el análisis se han considerado 2 horizontes a largo plazo, 100 y 200 años. Al considerar más de un ciclo, el máximo carbono capturado se obtendrá en el óptimo técnico, o turno de máxima renta en especie, que por tanto fijará el óptimo ambiental de nuestro análisis. Para el caso de las choperas, se demuestra que el óptimo técnico se produce a los 17 años.

En los distintos casos estudiados se ofrecerán resultados (VAN, turno óptimo y cantidad de carbono capturado) considerando diversos óptimos. Así, por un lado se mostrará el óptimo privado, definido por aquel turno para el cual el VAN es máximo. Contrapuesto a este punto tendremos el óptimo ambiental, que como se ha visto se corresponde al turno para el cual la captura de carbono es máxima, correspondiendo este turno al de máxima renta en especie. Entre ambos óptimos se situaría el óptimo social, u óptimo que refleja las preferencias de la sociedad por ambos bienes.

En el caso de la forestación con el pino radiata, se obtiene el óptimo ambiental a los 33 años, y con unos niveles de captura de carbono bastante similares. Para el pino silvestre, el óptimo ambiental se sitúa alrededor de los 80 años. Para este turno el carbono capturado bruto asciende a 115 t C/ha.

Si ahora analizamos la rentabilidad de las plantaciones, nos encontramos que para el caso de los chopos el turno óptimo se produce a los 14 años, en ausencia de subvenciones a la forestación de tierras agrarias, y 15 si se consideran estas subvenciones. Este turno implica el óptimo privado, y supone una rentabilidad de 16.968 €/ha. Esta cantidad equivale, asumiendo las hipótesis anteriormente consideradas, a una renta perpetua de 1.200 €/ha *año. Comparando el resultado

financiero de situarse en el óptimo ambiental frente al privado se observa que alargar el turno hasta los 17 años supone una pérdida de rentabilidad cifrada en un 16% del VAN en el caso en que no exista subvención, y un 12% si la hubiera.

En el caso del pino radiata, se observa (Tablas 2 y 3) que con las hipótesis admitidas, este tipo de forestaciones no es rentable con las hipótesis aquí planteadas en ausencia de subvenciones. Así, se obtiene un VAN de -881,2 €/ha con un turno de 30 años, edad en la que se sitúa el óptimo privado. La inclusión de las subvenciones no influye en el turno óptimo, pero permite alcanzar un VAN positivo que se estima en 2.965 €/ha. Esta cantidad equivale a una renta perpetua anual superior a los 207 €/ha. A diferencia del caso anterior, conviene subrayar la importancia que tienen los cobros procedentes de las claras, sobre todo en el caso no subvencionado. Incluso cuando se introducen las ayudas comunitarias estos cobros suponen el 16% del VAN, con el evidente atractivo de que constituyen flujos de caja que se obtienen mucho antes de la corta final.

Para el pino silvestre el óptimo privado se sitúa, si no hay subvenciones a una edad de 60 años (ver Tablas 2 y 3), obteniéndose un VAN de -1,275 €/ha, más favorable que el obtenido cuando el turno se iguala al óptimo ambiental (-1,504 €/ha), pero todavía dista mucho de reflejar una rentabilidad positiva a la inversión asociada. A esta edad de 60 años el carbono bruto supera ligeramente las 84 t C/ha. Por lo tanto, renunciar al 15% del VAN provocaría un aumento en el carbono capturado bruto de un 37%. Este coste de oportunidad se cifra, en términos de carbono neto en 22,5 t C/ha, es decir, un 32% más del carbono neto con respecto al que se obtiene en el óptimo privado.

Como sucedía para la otra conífera analizada, la existencia de subvenciones no altera el turno óptimo, pero provoca un incremento importante en la rentabilidad de la inversión, sobrepasando los 3.220 €/ha, con un 26% de este VAN motivado por los ingresos obtenidos con las cortas intermedias. Como se puede apreciar en las Tablas 2 y 3, estos resultados son altamente inelásticos cuando se introduce un subsidio por cada tonelada de carbono capturada. De hecho el turno solamente se modifica muy ligeramente cuando este incentivo alcanza cifras muy elevadas (200€/t C). Lo que sí provoca este subsidio al carbono capturado es la viabilidad financiera de este tipo de plantaciones cuando no se dispone de las subvenciones comunitarias. Cifras superiores a los 100€/t C cambian el sentido de la decisión. En definitiva, sólo cuando nos encontramos ante umbrales muy elevados en cuanto al carbono capturado se justifica financieramente una plantación de estas características (turno largo, crecimiento lento). En definitiva, la inclusión de este tipo de políticas ambientales no aproxima los óptimos privado y ambiental, con independencia de que el carbono capturado se mida en términos brutos o netos.

Llegados a este punto, nos podríamos preguntar si a través de un mecanismo de compensación a los propietarios por cada t de carbono capturada se podría lograr un óptimo social que acercara los óptimos anteriormente descritos. Para ambos casos considerados se ha parametrizado un precio (A) entre 20 y 200 €/por cada tonelada de carbono capturado, suponiendo que el propietario maximiza el ingreso de ambas producciones utilizando la misma tasa de descuento. Los resultados muestran que el turno óptimo no varía, independientemente de que se considere el carbono bruto o el neto. Este abanico de precios no consigue elevar la captura de carbono pero a cambio proporciona importantes ingresos adicionales a los propietarios, que ven cómo el VAN se eleva hasta en un 30% si se considera el carbono bruto para el caso de las choperas, mientras que en el caso del pino el incremento es mucho mayor. Este resultado, con indudable interés desde el punto de vista del diseño de políticas de subvenciones por captura de CO₂, debe de tomarse con ciertas precauciones. En efecto, su validez se circunscribe tanto a las especies estudiadas como a los valores de las variables y de los parámetros considerados (e.g., precios de la madera, tasa de descuento, cuantía de las subvenciones, etc).

Para el pino radiata, si se parametriza una subvención para intentar acercar ambos óptimos a través de un óptimo social, se aprecia que el turno óptimo no se modifica, tanto en el escenario no subvencionado como en el subvencionado. Esta nueva prima puede provocar, si supera un cierto

umbral, que la inversión se vuelva rentable cuando se considere únicamente el carbono bruto y la ausencia de ayudas comunitarias a la forestación. En el caso del carbono bruto este punto de equilibrio se obtiene a partir de una prima de 80€/tm C. Por el contrario, si se considera el carbono neto en vez del bruto, es preciso que dicha ayuda supere los 100€/tm C. Los resultados correspondientes a cada especie y para cada prima por tonelada de carbono capturado se recogen en las **Tablas 2 y 3**.

Si se efectuara un análisis de sensibilidad para ciertos parámetros utilizados en el modelo, se puede apreciar que los resultados varían de forma muy ligera. Por ejemplo, en el caso de la tasa de descuento utilizada se puede comprobar cómo en el caso del chopo los resultados son bastante inelásticos ante variaciones de dicha tasa. Así, para tasas de descuento entre el 4 y el 8%, el turno no se modifica y únicamente cuando alcanza un 9%, el VAN sin subvención máximo se alcanza a los 13 años, con lo que aumenta la distancia con respecto al óptimo ambiental. Resultados similares se obtienen para el pino radiata. En cambio, para el pino silvestre se comprueba cómo existe una mayor elasticidad con respecto a variaciones en este parámetro. Así, pequeñas reducciones en la tasa de descuento (hasta que se sitúe en el 3%) provocan que el turno correspondiente al óptimo privado se sitúe en los 75 años, cifra esta mucho más cercana al óptimo ambiental.

Tablas 2 y 3 aquí

Masas permanentes

En primer lugar, se van a mostrar los resultados sobre el modelo de programación por metas asociado a la gestión del monte “Pinar de Navafría”. Para ello se comienza mostrando lo que se denomina matriz de pagos (Tabla 4). Esta estructura matemática consiste en una matriz cuadrada con una dimensión igual al número de metas considerada. Las filas de la matriz muestran los resultados obtenidos cuando cada meta se optimiza por separado. El principal interés de esta tabla consiste en la información que proporciona sobre el grado de conflicto entre las diferentes metas incluidas en el análisis. Así, de la Tabla 4 es fácil deducir que existe un importante grado de conflicto entre la captura de carbono y los otros objetivos considerados. Así, la captura de carbono se reduce a una tercera parte cuando se cumple el objetivo de la igualdad de volumen en cada uno de los períodos considerados, y resultados similares cuando se compara la solución que proporciona la captura máxima de carbono con las metas relativas al inventario final y a la condición de regulación. Por último, con el fin de incrementar el carácter informativo de esta matriz se han añadido dos filas: una que muestra el volumen relativo a las cortas finales obtenido cuando se optimiza una meta en el horizonte de planificación considerado, y otra que muestra el turno promedio al que se corta la masa cuando se optimiza cada meta.

Las diferentes soluciones proporcionadas por esta matriz de pagos no parecen suficientemente interesantes desde un punto de vista de la gestión forestal. En efecto, por ejemplo si maximizamos la rentabilidad financiera asociada a la madera obtenida en los próximos 100 años obtenemos una estructura de la masa muy descompensada, y una captura de carbono bastante reducida. En cambio, si se elige la solución que proporciona la máxima fijación de carbono, tanto el VAN como el volumen se reducen notablemente. Esto es debido a que en este caso en la solución existe un número notable de prescripciones que no incorporan cortas a lo largo del horizonte de actuación. Por otro lado, se puede comprobar cómo ninguno de los objetivos considerados resulta redundante. Estas circunstancias justifican que se acuda a un modelo multicriterio como la programación por metas para calcular una solución compromiso que resulte aceptable por parte del centro decisor.

Tabla 4: Matriz de pagos

	VAN [10^6 €]	Igualdad flujo volumen (m^3)	Regulación (ha)	Inventario Final (m^3)	Carbono neto Capturado (tm C)
	n_{Npv}	n_{iH+piH}	n_{if+piF}	n_{kI+pkI}	n_{CB}
VAN ($*10^6$ €)	35,08	26,98	25,02	28,22	25,36
n_{Npv}	0	8,10	10,06	6,86	9,72
n_{iH+piH}	1.051.803	0	0	43.359	589.471
n_{if+piF}	2.133	442	0	293	3.08
n_{kI+pkI}	286.833	35.305	6.048	0	413.824
Carbono neto Capturado (tm C)	49.887	55.365	60.761	58.585	101.470
n_{CB}	51.583	46.105	40.709	42.885	0
Volumen (m^3)	1.298.536	1.018.108	966.115	1.008.948	609.812
Turno promedio	99.4	113.8	113.4	107.5	103.6

Los modelos de programación por metas sucintamente descritos anteriormente se han aplicado al caso estudiado. En la Tabla 5 se muestran las soluciones obtenidas cuando se aplican ambos modelos, el más equilibrado (“weighted”), y el más eficiente (“minmax”). En primer lugar, es preciso confirmar que todas las soluciones cumplen plenamente las metas ubicadas en los dos primeros niveles de prioridad (es decir, el inventario final y la igualdad de flujos de volumen). En cambio, para las otras tres metas las soluciones óptimas presentan desviaciones con respecto a los niveles de aspiración iniciales (las filas 4,5 y 9 de la Tabla 5 presentan valores distintos a 0). Por otro lado, es interesante apuntar que se ha realizado un análisis de sensibilidad con los pesos preferenciales aplicados: dada la titularidad pública del monte, en vez de interactuar con el propietario, se han simulado unos pesos preferenciales. Así, en la segunda y tercera columna de la Tabla 5 se muestra la solución cuando se le ha otorgado el mismo peso a cada uno de objetivos incluidos en el último nivel de prioridad ($w_1 = w_2 = w_3 = 1$). Las siguientes columnas muestran las soluciones cuando se varía estos pesos iniciales hasta que el peso asociado a cada objetivo alcanza 2 unidades. Se puede comprobar cómo, a excepción de la igualdad de volumen en cada período cuando se duplica el peso otorgado al carbono, los resultados son muy similares. Aumentos en este sistema de pesos no han conducido a soluciones significativamente diferentes de las que se presentan en la citada Tabla 5.

El otro caso analizado en cuanto a las masas permanentes sería el de las masas de *Pinus pinaster* en la meseta castellana.

FALTA LO DE PINUS PINASTER

Análisis sensibilidad precio y tasa de descuento

Tabla 5: Resultados obtenidos para distintos pesos preferenciales

	$w_1=w_2=w_3=1$		$w_2=w_3=1; w_1=2$		$w_1=w_3=1; w_2=2$		$w_1=w_2=1; w_3=2$	
	weighted	minmax	weighted	minmax	weighted	minmax	weighted	minmax
VAN (*10 ⁶ €)	31,11	28,93	31,20	31,57	31,05	28,85	31,00	25,99
n_{Npv}	3,97	6,15	3,88	3,51	4,03	6,23	4,09	9,09
n_{IH+piH}	55.308	646.476	67.151	696.153	50.066	327.573	107.417	1.147.643
n_{If+piF}	0	0	0	0	0	0	0	0
n_{kI+pkI}	0	0	0	0	0	0	0	0
Carbono neto Capturado (tm C)	61.700	69.146	61.682	64.842	61.625	68.712	64.180	70.157
n_{CB}	39.770	32.324	39.788	36.628	39.845	32.758	37.290	31.313
Volumen (m ³)	1.046.223	1.033.637	1.046.258	1.042.516	1.046.305	1.035.385	1.050.647	1.010.222
Turno promedio	109.9	109.8	108.1	107.2	108.2	111.0	108.1	116.0

Discusión

Siguiendo el orden anteriormente mostrado, y con el fin de mejorar la claridad en la exposición, los resultados se van a dividir atendiendo a los dos casos considerados, las plantaciones y las masas permanentes

Plantaciones

Analizando los resultados presentados en las Tablas 2 y 3, lo primero que llama la atención es la elevadísima rentabilidad de las plantaciones de chopos, con independencia de la existencia de subvenciones o del valor que se le quiera dar a cada tonelada fijada de carbono. Esta circunstancia se explica por la conjunción de dos factores: uno sería el aumento medio durante los últimos años y en términos reales del precio de la madera de chopo, y el otro vendrían dados por los costes utilizados en el análisis, que proceden de datos de la Confederación Hidrográfica del Duero, organismo que gestiona varios miles de ha en régimen de consorcios y convenios y que, lógicamente, dispone de unas economías de escala fuera del alcance de los propietarios privados. Este hecho no se debe tomar como una posible debilidad del trabajo, ya que se ha realizado un análisis de sensibilidad en relación a este parámetro, y los resultados en cuanto al turno óptimo apenas se modifican. Además, estudios recientes (Aunós et al., 2002) muestran ejemplos de choperas con rentabilidades superiores a los 10.000 €/ha para turnos de 12 años en la provincia de Huesca, considerando unos costes más elevados que en el caso aquí contemplado.

Se puede apreciar cómo las subvenciones proporcionadas a través de los programas de forestación de tierras agrarias provocan un ligero acercamiento entre el óptimo privado y el óptimo ambiental en el caso del chopo, motivado por la posibilidad de cobrar la prima de mantenimiento, mientras que en el caso de los pinos no se modifica la distancia existente entre ambos óptimos. En cuanto a la prima por cada tonelada de carbono capturada, con independencia de la especie estudiada y de la forma de carbono analizada, no se observa ningún acercamiento entre ambos óptimos, sino solamente un incremento en la rentabilidad que reciben los propietarios. Lógicamente, este incremento será más importante en el caso de las coníferas, debido entre otras razones al creciente efecto del descuento cuando nos encontramos ante turnos más largos.

También conviene precisar que con las hipótesis consideradas, una forestación sin posibilidad de ayudas comunitarias para el caso de ambos pinos sólo tendría sentido con valores por cada tonelada de carbono capturada bastante elevados (en torno a los 100€/t C). Desde un punto de vista empírico estos umbrales son hoy en día muy elevados, ya que los incipientes mercados de carbono existentes

en la actualidad en algunos países aportan valores que como mucho alcanzan los 10€t C. En la **Figura 1** se adjunta la composición del VAN para cada forestación, suponiendo un precio del carbono capturado de 200€t C. Se aprecia la importancia de los ingresos motivados por la venta de la madera en el caso del chopo, y la necesidad de las subvenciones en el caso de las coníferas.

Es preciso señalar que pueden existir otras formas de incentivar la captura de carbono con el fin de que cada forestación sea lo más eficiente posible en términos de captura. Un ejemplo posible pudiera ser el establecimiento de ayudas más diferenciadas, como por ejemplo al precio de la madera. Es decir, primar el alargamiento del turno con un sobreprecio de la madera vendida. Sin entrar en cómo se debería aplicar esta medida, en los ejemplos mostrados no supone unas cantidades elevadas, dada la cercanía entre ambos óptimos. Así, en el caso de la forestación con *Pinus radiata*, y en un contexto subvencionado, únicamente supondría una subvención en torno a los 3€m³.

Si se comparan los resultados obtenidos por las tres especies, la que captura menos carbono (bruto) es el pino silvestre si tomamos un horizonte de 100 años. De hecho esta captura es menor que la mitad de la que capturan las otras dos especies en el óptimo ambiental de cada una. No obstante, si la variable a medir es el carbono neto, la tendencia es opuesta. Así, aunque para el chopo y el pino radiata el carbono es muy similar, en el caso del pino silvestre el carbono capturado es mayor. En este caso es importante advertir de la circunstancia que el horizonte de planificación elegido no cubre el mínimo número de turnos consecutivos necesarios para que el carbono neto alcance el equilibrio entre capturas y emisiones. Como afirman algunos autores (Harmon, 2001), la escala temporal elegida en este caso es de vital importancia.

Si ahora procedemos a comparar los resultados obtenidos en los distintos casos, se podría analizar cuál sería la influencia en la elección de la especie a reforestar a la hora de maximizar la captura de carbono. Si fijamos horizontes temporales amplios, la captura de carbono es bastante similar con independencia de la especie utilizada, aunque el carbono capturado bruto es ligeramente superior en el caso del pino radiata. Una razón inmediata que puede justificar el hecho que el chopo, a pesar de tener una frecuencia en cuanto a la corta muy superior al pino, presente este balance inferior radica en la densidad de las maderas (0.30 kg/m³ del chopo frente a 0.385 kg/m³ del pino radiata). Por el contrario, si se analiza el carbono neto, se observa en primer lugar cómo se mantiene relativamente constante este tipo de captura a partir de los 100 años. Comparando los valores obtenidos, el chopo es el que presenta una mayor proporción de carbono neto, aunque las diferencias se sitúan entre un 10-15%.

En cuanto a las claras, se ha podido comprobar que provocan un incremento en el carbono neto al permitir la obtención de escaudrías con usos que presentan una vida media más dilatada. Sin embargo, este hecho es compensado por la mayor cantidad de carbono emitida en el corto plazo. De todas formas, en general, para maximizar el carbono fijado por un cierto tipo de plantación algunos autores propugnan que se supriman las claras (Bateman y Lovett, 2000), aunque este tipo de decisiones son muchas veces inviables desde un punto de vista privado.

Figura 1 aquí

En resumen, los resultados muestran como las plantaciones son siempre rentables siempre que existan las ayudas comunitarias, pero éstas no acortan la distancia existente entre el óptimo privado y el óptimo social cuando se considera como objetivo la fijación de carbono. Por otro lado, y con las hipótesis anteriormente introducidas, el que cada tonelada de carbono fijada tenga un determinado valor monetario no modifica las decisiones de los propietarios en cuanto a un posible cambio en el uso de la tierra, salvo que el caso analizado no se corresponda especies de crecimiento rápido (choperas) y esta ayuda supere los 100€t C. Excepto en estos casos puntuales la consideración de este tipo de ayudas solamente provoca un aumento de la rentabilidad asociada a esta inversión.

Masas permanentes

Actualmente, se puede afirmar que cada día resulta más complejo tomar decisiones en cuanto al manejo de los montes, debido, entre otras razones, a la demanda de usos múltiples que se está incrementando en muchas masas forestales. Este incremento en los objetivos a considerar obliga a utilizar herramientas específicas como la que ha descrito con anterioridad. Para el caso del carbono, salvo escasas excepciones (Romero et al., 1998; Campos y Caparrós, 1999; Cancelo y Díaz, 2000; Díaz-Balteiro y Romero, 2003a, Díaz-Balteiro y Romero, 2003b), se puede afirmar que todavía no se ha integrado dentro de los modelos de gestión y valoración forestal.

Los resultados recogidos en la Tabla 5 proporcionan soluciones atractivas, que integran los objetivos tradicionalmente recogidos dentro de la ordenación de montes, junto con otro de carácter financiero (VAN), y el carbono capturado. Analizando estas soluciones se aprecia que son más atractivas que las recogidas en la matriz de pagos (Tabla 4), ya que a costa de obtener unos flujos de volumen en cada período más irregulares o una reducción mínima en el VAN se obtienen mejores resultados para los demás objetivos, especialmente el carbono capturado. Así, si comparamos la columna 2 de la Tabla 6 (solución de la matriz de pagos que maximiza el VAN) con la columna 2 de la Tabla 5, se aprecia cómo con un coste de oportunidad en cuanto a la rentabilidad financiera pequeño (11%) se presenta una solución mejor en términos de igualdad de los flujos de volumen en cada período, regulación e inventario final, y con un incremento en el carbono capturado del 24%. La bondad de esta solución se acentúa si tenemos en cuenta que es muy raro encontrar un indicador de la rentabilidad económica de una inversión forestal dentro de los proyectos de ordenación vigentes en España, por lo que la ordenación del monte Navafría no presenta consecuentemente este tipo de resultados (Díaz y Prieto, 1999), lo que impide la comparación del VAN aquí obtenido con el hipotéticamente propuesto en el citado proyecto de ordenación.

Las diferencias existentes entre las soluciones de tipo equilibrado (“weighted”) frente a las de tipo minmax (“minmax”) se pueden explicar afirmando que la solución minmax minimiza la desviación del objetivo más sesgado (en este caso el carbono capturado), lo que permite obtener mejores registros para esta meta, a costa de empeorar el registro de los demás.

Por otro lado, desde el punto de vista de la gestión forestal es muy interesante el conflicto existente entre la consecución de unos niveles altos en cuanto al carbono capturado y lograr unas cortas homogéneas en cada uno de los períodos considerados. Partiendo de la base de que ni las disposiciones actualmente seguidas en la ordenación de masas forestales ni los textos usualmente empleados (Madrigal, 1994) muestran cómo integrar el carbono fijado dentro del manejo forestal, la idea tradicionalmente perseguida de “monte normal” (básicamente: conseguir una regeneración natural viable, una constancia en las rentas y una estructura adecuada de las masas) choca con el objetivo de maximizar la fijación de carbono. Esta conclusión deriva únicamente del caso estudiado, pero parece que se puede dar en otras masas siempre y cuando la ordenación presente una trayectoria dilatada. Aspectos como la edad inicial de la masa pueden mitigar o acentuar este hecho. Por otro lado, si comparamos los turnos obtenidos con estas soluciones en comparación a los indicados en la matriz de pagos, se puede comprobar cómo son bastante parejos, si exceptuamos el que se obtiene cuando se maximiza el valor actual neto. En la realidad, el turno actualmente empleado es de 100 años, con lo que apenas hay variaciones en este sentido.

Es importante destacar que este tipo de modelos ofrece al gestor una gran cantidad de información, no sólo por las soluciones proporcionadas, sino porque fácilmente puede modificar parámetros (tasa de descuento, carbono capturado, precio de la madera, subvenciones, etc.) y demás datos del problema (pesos, orden en las preferencias, etc.) obteniéndose rápidamente una solución ajustada a esos cambios. Por ejemplo, en estos modelos el carbono se ha medido en unidades físicas. Nada impide darle un precio a cada tonelada capturada, utilizar para este objetivo una tasa de descuento diferente, etc. Esta versatilidad también se puede trasladar al espacio de los objetivos, es decir, se pueden integrar otras metas que requiera el centro decisor, lo que hace de esta herramienta no

específicamente forestal un instrumento muy útil para abordar aspectos asociados a la gestión forestal sostenible, caracterizada por incorporar a la vez numerosos criterios.

Además, al añadir una meta asociada a un objetivo financiero, desde un punto de vista de la gestión se puede fácilmente calcular el coste de oportunidad de adoptar una determinada alternativa. Incluir el VAN en los modelos no supone que la gestión en masas permanentes, generalmente pobladas con especies de crecimiento lento y con numerosos atributos paisajísticos, de biodiversidad, etc. hay que realizarla bajo un prisma financiero. Simplemente es una herramienta que le permite al gestor comparar diferentes alternativas en base a una unidad común de medida: la monetaria.

Finalmente, se van a abordar, aunque sea con brevedad, posibles líneas futuras de este trabajo. En primer lugar habría que integrar los múltiples desafíos que actualmente presenta el objetivo de la fijación de carbono. Baste con recordar aspectos como el funcionamiento de los mercados de carbono, el entorno institucional tan cambiante y la posible modificación del esfuerzo de gestión al nuevo producto. La incertidumbre asociada al largo plazo de la inversión ante estos condicionantes y los propios de una inversión forestal (daños físicos, fluctuaciones en el precio de los outpus, etc.), así como un mejor conocimiento tanto de la función de utilidad de un propietario ante un cambio en el uso de la tierra, como del carbono almacenado en otras partes vivas de las plantas pueden ser introducidos en el análisis, con lo que éste ganaría en realismo. En definitiva, todas estas posibles extensiones de los modelos aquí expuestos deberían ayudar a comprender mejor las implicaciones de añadir este objetivo a la gestión forestal.

FALTA LO DE PINUS PINASTER

Conclusiones

Bibliografía