
CAPITULO 7

SELVICULTURA Y CAMBIO CLIMÁTICO

Felipe Bravo Oviedo

*Unidad Mixta de Modelización y Gestión Forestal Sostenible UVa-INIA
Departamento de Producción Vegetal y Silvopascicultura, E.T.S. de Ingenierías Agrarias, Universidad de
Valladolid, Avda. de Madrid 44 E-34004 PALENCIA. fbravo@pvs.uva.es*

Andrés Bravo Oviedo

*Unidad Mixta de Modelización y Gestión Forestal Sostenible UVa-INIA
Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA).
Carretera de La Coruña Km7, E-28040 MADRID. bravo@inia.es*

Ricardo Ruiz-Peinado Gertrudix

*Unidad Mixta de Modelización y Gestión Forestal Sostenible UVa-INIA
Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA).
Carretera de La Coruña Km7, E-28040 MADRID. ruizpe@inia.es*

Gregorio Montero González

*Unidad Mixta de Modelización y Gestión Forestal Sostenible UVa-INIA
Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA).
Carretera de La Coruña Km7, E-28040 MADRID. montero@inia.es*

0. INTRODUCCIÓN**I. EL CICLO DEL CARBONO Y LA DINÁMICA DE LOS SISTEMAS FORESTALES****II. PROBLEMAS INDUCIDOS POR EL CAMBIO CLIMÁTICO PARA EL DESARROLLO DE LOS SISTEMAS FORESTALES****III. EL SEGUIMIENTO DE LA CANTIDAD DE CARBONO ALMACENADA EN LOS SISTEMAS FORESTALES**

III.1. CUANTIFICACIÓN DE CARBONO A PARTIR DE INVENTARIOS FORESTALES.

III.2. CUANTIFICACIÓN DE CARBONO A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE.

III.3. MODELOS DE CRECIMIENTO Y PRODUCCIÓN.

III.4. MODELOS ESPECÍFICOS Y MODELOS EDDY-COVARIABLES.

IV. ADAPTACIONES SELVÍCOLAS PARA FAVORECER EL DESARROLLO DE SISTEMAS FORESTALES

IV.1. SITUACIONES CRÍTICAS

IV.2. ESTRATEGIAS SELVÍCOLAS PARA LA ADAPTACIÓN

IV.3. TRATAMIENTOS DE REGENERACIÓN

IV.4. RESALVEOS EN MONTES BAJOS.

IV. 5. GESTIÓN ADAPTATIVA

V. LA SELVICULTURA Y LOS BOSQUES COMO INSTRUMENTO PARA MITIGAR EL CAMBIO CLIMÁTICO

V.1. COMPOSICIÓN ESPECÍFICA.

V.2. MODIFICACIÓN DEL TURNO

V.3. CLARAS.

V.4. ORDENACIÓN DE MONTES.

V.5. INCREMENTO DE LA SUPERFICIE FORESTAL

VI. CONCLUSIONES

0. INTRODUCCIÓN

El cambio del clima es actualmente una preocupación generalizada con relevantes repercusiones sociales, económicas y ambientales. Sin embargo, hasta hace poco tiempo la humanidad tan sólo se ha preocupado del cambio climático pero no se ha ocupado con firmeza de resolver este problema. De acuerdo con Arsuaga y Martínez (1998) existen cinco factores fundamentales que originan los cambios en el clima de nuestro planeta: (1) sucesos catastróficos como, por ejemplo, impactos de meteoritos, (2) evolución geodinámica del planeta, (3) comportamiento del sistema atmósfera-hidrosfera, (4) fluctuaciones naturales de la órbita de la Tierra alrededor del Sol y (5) efectos de la biosfera (incluyendo la actividad humana). Con la aparición del género *Homo* (hace unos dos millones de años) surgió el elemento más perturbador de la vida en nuestro planeta hasta ahora conocido. El dominio del fuego (hace entre 350 y 450 mil de años), la aparición de la agricultura (hace unos 10000 años) y la revolución industrial (hace unos 250 años) son hitos clave del proceso que se ha dado en llamar cambio global y que incluye el cambio del clima y de los usos de la tierra. Por tanto, si el clima cambia continuamente (sabemos de periodos glaciares e interglaciares) por qué el cambio climático inducido por las actividades humanas se ha convertido en una de las preocupaciones fundamentales de las sociedades desarrolladas. La velocidad del cambio y la conciencia temporal de nuestra especie que nos hace considerar inmutable el paisaje en el que vivimos son las claves que explican nuestra preocupación actual.

El clima es, esencialmente, cambiante y, por tanto, oscilaciones, tanto de las temperaturas como de las precipitaciones, ha habido en el pasado y las habrá en el futuro independientemente de la actividad humana (Ciesla, 1996). El último periodo glacial (ocurrido hace entre unos 16 y 24 mil años) hizo que el sur de Europa (Península Ibérica, Balcanes y Ucrania) se convirtieran en los reservorios de vida que después sirvieron para recolonizar las zonas norteñas de nuestro continente. Ya en épocas históricas, ha habido oscilaciones climáticas de importancia (Ciesla, 1996) Así en Europa, al periodo entre los siglos X y XIII, en los cuales se produjo el llamado óptimo medieval que permitió la colonización de zonas nórdicas como Islandia, le siguió otro de enfriamiento entre el siglo XV y XIX, conocida como Pequeña Edad de Hielo (Cuadrat y Pita, 1997; IPCC, 2001). Desde el siglo XIX, coincidiendo con la segunda revolución industrial (aprox. 1875) la temperatura media mundial se ha elevado entre 0,3 y 0,6 °C (IPCC 2001), y se ha observado que, desde hace 1000 años no se registra un incremento tan elevado de la temperatura como el que se dio en la centuria pasada. Hay pocas dudas de que este calentamiento está asociado principalmente con el uso de combustibles fósiles (carbón mineral, gas y petróleo) Así desde el año 1750 (inicio de la primera Revolución Industrial) la concentración de los principales gases causantes del cambio climático (CO₂, CH₄ y N₂O) han aumentado en un 31, 150 y 17 por ciento respectivamente (IPCC 1995). Además, la deforestación de zonas boscosas para su transformación en sistemas agrícolas y ganaderos también ha contribuido de manera significativa al incremento de la concentración de CO₂ en la atmósfera.

A partir de simulaciones con diversos modelos el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático concluyó que para estabilizar las concentraciones de CO₂ (el compuesto más influyente sobre el cambio climático) en niveles de 450, 650 o 1000 ppmv (partes por millón en volumen) sólo será posible si las emisiones de CO₂ a la atmósfera bajan a los niveles del año 1990 en 40, 140 o 240 años y posteriormente disminuyen sustancialmente. Los países de la Unión Europea como firmantes del Protocolo de Kioto se han comprometido a rebajar sus emisiones globales en un 8 % antes del año 2012; dentro de este compromiso, España puede aumentar sus emisiones en un 15 %.

Houghton et al. (1996) predicen que el mantenimiento de los niveles de emisión de CO₂ de 1990 implican un incremento de la temperatura de 2 °C y de 50 cm del nivel del mar en el año 2100. Por tanto, estos niveles de emisiones no solucionan el problema sino que, simplemente, lo estabilizan.

Los bosques son actores principales en todo el proceso de cambio climático ya que: (1) su desaparición contribuye al desarrollo del mismo, (2) su dinámica, estructura y composición pueden verse afectados por el mismo y (3) pueden colaborar a mitigar los efectos del cambio climático. El carbono almacenado en los diferentes ecosistemas terrestres depende fuertemente de su localización y de su estructura (tabla #.1). Se ha demostrado que existe una relación positiva entre la productividad neta de los ecosistemas forestales y la latitud (Valentine et al., 2000) A pesar de que en los últimos decenios la cantidad de carbono fijado en los bosques templados y boreales se ha incrementado aún no ha alcanzado los niveles previos a la revolución industrial (Fujimori, 2001).

Tabla 0.1 Carbono almacenado en la vegetación y el suelo de los ecosistemas terrestres (adaptado de Fujimori, 2001)

Ecosistema	Superficie (10 ⁶ ha)	Carbono almacenado por ha (toneladas)	% de cada fracción sobre el total del ecosistema		% total Carbono terrestre
			Vegetación	Suelo	
Bosques tropicales	1760	243	49.38	50.62	17.2
Bosques templados	1040	153	37.25	62.75	6.4
Bosques boreales	1370	408	15.69	84.31	22.6
Sabanas tropicales	2250	146	19.86	80.14	13.2
Pastizales templados	1250	243	2.88	97.12	12.2
Desiertos y semidesiertos	4550	44	4.55	95.45	8.1
Tundra	950	133	4.51	95.49	5.1
Zonas húmedas	350	686	6.27	93.73	9.8
Tierras de cultivo	1600	82	2.44	97.56	5.3
TOTAL	15120	164	18.90	81.10	100

Uno de los primeros indicadores del proceso de cambio climático a escala global es la modificación del patrón fenológico de los ecosistemas. En los últimos decenios se ha detectado un adelanto fenológico (unos 3 o 4 días por década) en los ecosistemas ibéricos (Peñuelas et al., 2004) y ya es clásico el oír en las zonas vitivinícolas que la vendimia se adelanta cada año un poco porque la uva madura antes. Estos indicadores nos alertan de un cambio climático que en nuestras latitudes representará previsiblemente una disminución de las precipitaciones, un aumento de la temperatura

y una marcada irregularidad climática (periodos de extrema sequía seguidos de lluvias o nevadas abundantes,...) Los efectos de estos cambios sobre los procesos fisiológicos serán (Peñuelas *et al.*, 2004): (1) el incremento de las temperaturas implica una mayor tasa de respiración, un incremento moderado de la fotosíntesis (modulado por la disponibilidad hídrica) y una mayor tasa de renovación de hojas y raíces finas, y (2) la disminución de las precipitaciones llevará a una disminución de la tasa de fotosíntesis. Así en los ecosistemas donde el mayor limitante a la productividad forestal es el frío (p.ej, zonas montanas de pino silvestre o hayedos) seguramente habrá un aumento de la calidad de estación pues aunque disminuyan las precipitaciones seguramente no llegará a ser limitante la disponibilidad hídrica. Sin embargo, en bosques donde la disponibilidad de agua es el limitante a la productividad (p.ej., encinares, pinares de llanura,...) la calidad de estación disminuirá y en algunos sitios pondrá en peligro la supervivencia de estos bosques por una mayor sensibilidad a las perturbaciones (incendios, ataques de plagas,...) ya que la recuperación mediante rebrote, germinación o renovación foliar se verá gravemente comprometida. Aunque la reducción de productividad sea muy pequeña a escala local (por ejemplo, menos del 5% en volumen) el impacto sobre la industria forestal y sobre la capacidad de los bosques para almacenar carbono puede ser grande cuanto estas cifras se contemplan a gran escala. En un estudio basado en simulaciones realizadas con el programa GOTILWA+ (Gracia *et al.*, 1999) sobre masas de *Quercus ilex*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris* y *Fagus sylvatica* sometidas a diferentes escenarios climáticos se encontró (Sabaté *et al.*, 2002) que cuando el limitante al crecimiento es la temperatura un incremento de esta produce un aumento de la producción forestal (caso de *Fagus sylvatica*) mientras que en el caso de que el limitante sea la disponibilidad hídrica se reduce la misma porque los árboles deben emplear una mayor cantidad de fotosintatos en el mantenimiento y generación de hojas además de tener una más alta tasa de respiración (caso de *Quercus* y *Pinus*). En el caso de un aumento de las precipitaciones o de una mejor distribución de éstas se debe esperar un incremento de la productividad forestal en estas cuatro especies.

Por otro lado, es importante considerar que el cambio climático se ha interrelacionado con alteraciones en los regímenes de perturbaciones y en el nivel de explotación de los bosques (Valladares *et al.*, 2004). Así, la reducción de la presión ganadera en los bosques que acompañó a las fuertes migraciones del campo a las ciudades ocurridas en España en los años 60 y 70 del pasado siglo, ha supuesto que las densidades de los bosques sean muy altas y se favorezca la aparición de procesos de autoaclarado, una mayor susceptibilidad a las perturbaciones y una menor resiliencia frente a ellas.

I. EL CICLO DE CARBONO Y LA DINÁMICA DE LOS SISTEMAS FORESTALES

El carbono se encuentra almacenado en los sistemas forestales en diversas fracciones así podemos distinguir entre: materia viva (árboles y matorrales fundamentalmente) tanto subterránea como aérea, materia muerta y suelo. La cantidad de carbono fijado en los ecosistemas terrestres es más de una vez y media del que se encuentra en la atmósfera (FAO, 2006). Por otro lado, la vegetación tan sólo representa un quinto del carbono fijado en los ecosistemas terrestres. A partir de la tabla #.1 podemos observar que el 76.4% del carbono fijado en la vegetación corresponde a bosques (45.1% en los bosques tropicales, 12,6% en los bosques templados y un 18,7% en los bosques boreales). Sin embargo los suelos forestales tan solo almacenan el 39,2 % del carbono total fijado en el suelo. Por consiguiente, los bosques almacenan, tanto en el suelo como en la vegetación un 46,2% del carbono presente en los ecosistemas terrestres. En el ciclo global del carbono, se mezclan procesos muy rápidos, generalmente ligados con la emisión (p.ej., incendios forestales) y procesos muy lentos como la fijación. Un aspecto importante es conocer el tiempo durante el cual se mantiene el carbono fijado en cada uno de las fracciones citadas. Además, debemos conocer la vida útil de las manufacturas (muebles, ventanas, puertas, tapones,...) generadas a partir de los productos forestales. Si utilizamos la clasificación propuesta por Oliver y Larson (1990) para la

dinámica de los sistemas forestales y la ponemos en relación con el carbono almacenado en los sistemas forestales encontramos que tras una reducción inicial durante la fase de instalación del rodal se produce un constante aumento del carbono acumulado hasta la fase de madurez en que hay una pequeña disminución, asociada a la aparición de árboles muertos y su progresiva descomposición así como a que la fijación fotosintética apenas compensa las pérdidas por respiración.

II. PROBLEMAS, INDUCIDOS POR EL CAMBIO CLIMÁTICO, PARA EL DESARROLLO DE LOS SISTEMAS FORESTALES

El incremento de las temperaturas asociado al cambio climático aumentará la evapotranspiración en los ecosistemas forestales. Así, el agua disponible para el desarrollo de la vegetación será menor. Aunque la eficiencia del uso del agua será mayor al aumentar las concentraciones CO_2 , todo parece indicar que la competencia inter e intraespecífica será más aguda especialmente durante la regeneración de los bosques. Sin embargo, debe considerarse que este aumento del crecimiento de las plantas debido a mayores concentraciones de CO_2 se basa en estudios fisiológicos sobre plantas en ambiente controlado y que es difícil extrapolar los resultados de este tipo experimentos a rodales forestales en la naturaleza. La distribución de la energía captada por las plantas entre diferentes destinos como incremento del tronco, floración, fructificación, formación de ramas y hojas, puede verse alterada bajo condiciones climáticas erráticas como las que puede generar el cambio climático. Por otro lado, la interrelación ecofisiológica entre la concentración de CO_2 y otros compuestos como NO_2 , la temperatura, la disponibilidad de agua y las condiciones edáficas hace muy difícil poder predecir el impacto del cambio climático sobre los ecosistemas forestales (Fujimori, 2001)

Dado que las especies forestales tienen un rango de temperaturas óptimo para su desarrollo, un incremento generalizado de la temperatura terrestre hará cambiar el equilibrio competitivo entre especies incluyendo su patrón de distribución. Es poco probable, aunque no descartable en condiciones extremas, que los árboles adultos sufran de forma generalizada problemas de muerte súbita análogos a la seca de la encina. Sin embargo, puede ocurrir con facilidad que existan problemas para la instalación y desarrollo inicial de especies forestales en ciertas áreas o que existan cambios en la composición específica de los bosques. Fujimori (2001) apunta que estos efectos serán especialmente agudos en zonas marginales de la distribución (p.ej., pinares de *Pinus sylvestris* en Sierra Nevada o hayedos en el Sistema Central) donde los fenómenos de competencia antes citados serán muy agudos. Además los problemas de plagas y enfermedades pueden llegar a ser muy severos (Melillo *et al.*, 1996) por lo que la conservación, o incluso el aumento, de la biodiversidad, tanto a nivel de especies como de genotipos dentro de cada especie, debe ser una prioridad de gestión para poder limitar los efectos del cambio climático.

III. EL SEGUIMIENTO DE LA CANTIDAD DE CARBONO ALMACENADA EN LOS SISTEMAS FORESTALES

III.1 CUANTIFICACIÓN DE CARBONO A PARTIR DE INVENTARIOS FORESTALES

Los inventarios forestales continuos (IFC) evalúan el cambio de variables de interés a lo largo de un determinado lapso de tiempo. Tradicionalmente, las variables dendrométricas de interés que se han medido en los IFC han sido el diámetro normal y la altura del árbol, bien hasta una determinada sección o bien la total. Con estas variables y mediante la aplicación de valores modulares, tarifas o tablas de cubicación se obtiene el volumen de la parte aérea de la masa forestal, cuya transformación en biomasa es inmediata mediante la aplicación de la densidad de la madera. Sin embargo, el conocimiento del carbono almacenado por la vegetación en los sistemas forestales se realiza a partir de la cuantificación de la biomasa forestal total, incluyendo la parte aérea y la radical, y su distribución dentro de los diferentes compartimentos (fuste, ramas gruesas, ramas

delgadas, ramillas y hojas o acículas). Es obvio que el estudio del carbono almacenado no es económicamente rentable mediante métodos directos para cada monte o rodal, por lo que la utilización de metodologías que incluyan los datos obtenidos en los IFC, como el Inventario Forestal Nacional, serán de aplicación mayor.

Existen dos formas ampliamente usadas para estimar la biomasa forestal a partir de los datos de inventario (Brown, 2002):

- Factores de expansión de biomasa (BEFs: *biomass expansions factors*)
- Ecuaciones de estimación de biomasa

Los factores de expansión de biomasa son factores de conversión que permiten transformar el volumen de madera (habitualmente expresado en m³) de un árbol o de una masa forestal en su conjunto en el peso de materia seca del árbol o de la masa (habitualmente expresado en toneladas).

Por otro lado, las ecuaciones de estimación de biomasa son relaciones entre el peso seco de biomasa y alguna variable medida sobre árbol o que representa las condiciones del sitio donde dicho árbol vive (densidad, productividad,...).

Aunque existen varias formas para la construcción de ecuaciones de estimación de la biomasa como el método del árbol medio, el método de corta, el análisis dimensional y alométrico o el método múltiple de muestreo (Pardé, 1980), el método más generalizado es el de corta, troceado y pesado por separado de todas las fracciones de una serie de árboles muestra, que serán utilizados para construir valores modulares en función de la clase diamétrica. Esta metodología es la utilizada por Montero *et al.* (2005) para la cuantificación de la biomasa y el CO₂ fijado por las especies forestales en España. Dicho estudio abarca 32 de las principales especies forestales, y su metodología se explica a continuación.

Se selecciona una muestra de pies, por especie, de las clases diamétricas que establece el Inventario Forestal Nacional (desde la 5 –pies menores-, 10, 15, ... hasta la 70) para cada especie, eligiendo árboles en masas de calidad de estación media para la especie, sanos, representativos, equilibrados, que hayan crecido en condiciones de espesura y que no estén mal conformados ni debilitados, ni afectados por efecto borde. Se miden, se apean, se trocean y se realiza una separación por fracciones. Se realiza un pesaje de cada división por separado para obtener los pesos frescos de cada fracción de biomasa. Si no es posible realizar alguna pesada (en el caso de fuste), se debe realizar una cubicación para su posterior paso a peso seco utilizando la densidad básica de la madera.

Se recogen varias muestras representativas de cada fracción y se llevan a laboratorio para obtener el porcentaje de humedad. Este porcentaje se obtiene tras someter la muestra a un secado a 102 °C en cámara hasta que presente peso constante. Aplicando el porcentaje de humedad a los pesos frescos se obtiene el peso seco de cada fracción de biomasa.

Utilizando los pesos secos se ajustan funciones de regresión para el peso de la biomasa total y para cada fracción de biomasa. Como variable independiente fue elegido el diámetro normal, para una mejor aplicación de estas funciones a los datos que ofrece el IFN. Después de probarse distintos modelos fue elegida la ecuación alométrica, linealizada como modelo logarítmico.

$$y = a \cdot d^b \quad [\text{ec.1}]$$

↓

$$\ln y = \alpha + b \cdot \ln d \quad [\text{ec. 2}]$$

Bravo *et al.*

donde y es la biomasa, d es el diámetro normal a y b son parámetros a estimar, α es el logaritmo de a .

Pero la transformación logarítmica introduce un sesgo (subestimación) en los cálculos (Baskerville, 1972). Para la eliminación de este sesgo, el resultado final en unidades aritméticas ha de ser multiplicado por un factor de corrección (CF), calculado a partir del error estándar de la estimación (SEE), según la siguiente expresión (Sprugel, 1983):

$$CF = e^{SEE^2/2} \text{ [ec. 3]}$$

Al peso seco de biomasa por clase diamétrica y fracciones se les aplica la cantidad de carbono presente en la madera. Según Kollmann (1959) la composición de la madera es muy similar en las diferentes especies leñosas, al igual que dentro del mismo árbol y en sus diferentes partes (tronco y ramas). Este autor indica que, aproximadamente, existe un 50% de carbono contenido en la madera. Asimismo, el IPCC (2006) recomienda la utilización de los valores de carbono en peso de 48% para frondosas y de 51% para coníferas, en el caso de no existir valores específicos. El CREAM (Ibáñez *et al.*, 2002) ofrece el contenido en carbono de la madera para algunas especies forestales, que unido a los valores del IPCC, nos permite calcular la cantidad de carbono presente en cada una de las especies forestales por clase diamétrica y fracción de biomasa.

Utilizando las relaciones alométricas, el contenido de carbono en la madera y los datos de número de pies y de diámetros medios procedentes de inventarios forestales podemos estimar la cantidad de carbono fijado en los sistemas forestales. Además, utilizando los crecimientos en diámetro y las cortas de aprovechamiento obtenemos los incrementos netos anuales y se pueden realizar estimaciones en el futuro. También es posible obtener ese incremento neto anual por comparación de inventarios.

Según Montero *et al.* (2005) la cantidad de carbono fijado por la vegetación (parte aérea y radical) en el año 1990 (año medio de realización del IFN2) es de 492.616 miles de toneladas de carbono y el incremento neto anual de carbono es de 20.494 miles de toneladas de carbono. Pudiéndose realizar con esos datos una aproximación para el año 2004 en el cual la vegetación arbórea en España tiene fijada 779.532 miles de toneladas de carbono.

III.2 CUANTIFICACIÓN DE CARBONO A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE

Los cambios en la cubierta vegetal debidos al incremento o detrimento de la misma pueden ser evaluados mediante la variación en la reflectividad de las masas. En este sentido la observación de los sistemas forestales y del comportamiento de la respuesta espectral de la vegetación evaluada mediante imágenes de satélites también es, junto a los inventarios tradicionales, un buen sistema para evaluar el comportamiento de la biomasa forestal, su incremento o detrimento y por lo tanto del carbono neto fijado.

La vegetación absorbe y refleja un porcentaje determinado de la energía que recibe del sol en una longitud de onda determinada, que, en el caso de vegetación sana, suele estar en el infrarrojo cercano. Los satélites reciben el porcentaje que la vegetación refleja, llamado reflectancia, y lo convierte en un nivel digital y de ahí a valores de radiancia o de energía.

La relación entre biomasa producida y la radiación fotosintéticamente activa absorbida (APAR) puede ser evaluada mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), ya que presentan buena correlación lineal, y como se sabe que la producción primaria neta de biomasa está relacionada con el APAR podemos simplificar el cálculo de la biomasa mediante la expresión siguiente (Bravo-Oviedo y Delgado, 2002)

$$NDVI = \frac{IR_{pr\acute{o}ximo} - Rojo}{IR_{pr\acute{o}ximo} + Rojo} \quad [\text{Ec. 4}]$$

$$NPP = \int_{t_1}^{t_2} \varepsilon(t) \cdot APAR(t) dt \quad [\text{Ec. 5}]$$

$$NPP = a + b \sum_{t_1}^{t_2} NDVI \quad [\text{Ec. 6}]$$

Donde NDVI es el índice de vegetación de diferencia normalizada, IRpróximo es el valor de reflectividad en el Infrarrojo cercano, Rojo es el valor de reflectividad en el rojo, NPP es la producción primaria neta de biomasa, $\varepsilon(t)$ es la eficiencia de conversión de radiación absorbida en biomasa, que depende de la estación y de la especie; APAR es la radiación fotosintéticamente activa absorbida

Diversos trabajos confirman la validez de este índice para estimar la biomasa desde el punto de vista de la productividad primaria neta y del cambio climático (Gholz et al., 1997; Myneni et al., 1997). Además, la relación entre el NDVI y el índice de área foliar, que a su vez, está muy relacionado con la producción de biomasa, varía intra-anualmente y de forma estacional de acuerdo con variaciones fenológicas y la respuesta a variaciones temporales de las condiciones ambientales (Wang et al., 2004), lo que abre la posibilidad a la utilización de la teledetección como una buena herramienta a la hora de evaluar cambios en producción de biomasa. Aunque la, cada vez mayor, importancia de la respiración en el proceso de fijación de carbono hace que dicho índice por sí solo no sea suficiente (Valentini et al., 2000), debiendo completarse con otros modelos que incluyan los procesos biológicos asociados al ciclo del carbono.

III.3 MODELOS DE CRECIMIENTO Y PRODUCCIÓN

Los modelos son una abstracción o simplificación de fenómenos que se da en la naturaleza con el doble objetivo de predecir o explicar dicho fenómeno. En el caso de masas forestales el fenómeno puede ser, entre otros, el crecimiento en diámetro o altura y por lo tanto del volumen o de la biomasa, o bien la respuesta de dicho crecimiento ante cambios en las condiciones ambientales.

Los modelos pueden ser una ecuación o una sistema de ecuaciones, normalmente relacionadas que describen los fenómenos de forma determinística, en los que las estimaciones son fijas bajo unas mismas condiciones de partida, o de forma estocástica cuando las estimaciones llevan asociadas cierta probabilidad de ocurrencia. Dependiendo de la escala de trabajo los modelos se pueden clasificar la siguiente manera (de mayor a menor escala):

- Modelos a escala paisaje
- Modelos de masa
- Modelos de clases de tamaño, normalmente de diámetros
- Modelos de árbol individual.
- Modelos de procesos o fisiológicos

Los modelos de crecimiento y producción forestal más utilizados en la gestión forestal son de tipo empíricos. Estos modelos se basan en registros del crecimiento y la producción en el pasado, bien a partir de parcelas permanentes o mediante la medición de crecimientos, y por tanto son muy indicados para predecir la evolución de los sistemas forestales cuando el ambiente es estable o al menos el patrón de cambios es similar al que ha producido los crecimientos utilizados para generar

estos modelos. Por ello, algunos autores defienden que los modelos de procesos sirven mejor para predecir la dinámica forestal en ambientes cambiantes que los empíricos ya que extrapolan mejor (Landsberg, 1986). Sin embargo, Bravo *et al.* (2001) demostraron que la capacidad de extrapolación de un modelo empírico, desarrollado a partir de un conjunto de datos robusto, es alta siempre que las variables explicativas representen adecuadamente los procesos relevantes para el crecimiento y desarrollo del rodal. Así, la fracción de copa que aparece en muchos modelos es una forma de estimar el vigor del árbol mientras que el área basimétrica de los árboles más grandes que el considerado es un estimador de la competencia. La elección de la variable predictora es un compromiso entre el costo de la toma de datos y su capacidad para representar el proceso. Kimmins (1988) planteó la necesidad de desarrollar modelos híbridos que combinen las bondades de los modelos empíricos y de procesos.

Una estrategia de compromiso puede ser utilizar los modelos empíricos desarrollados hasta la fecha para la gestión forestal y calibrarlos mediante una red de parcelas permanentes de las que tengamos estimaciones climáticas adecuadas. Bravo y Montero (2003) han desarrollado un método de calibrado que puede ser utilizado para adaptar los modelos empíricos a situaciones cambiantes.

III.4 MODELOS ESPECÍFICOS Y MODELOS EDDY-COVARIABLES

El modelo CO2FIX (Masera *et al.*, 2003; Schelhass *et al.*, 2004) se utiliza para calcular, a nivel de rodal, el carbono almacenado en la biomasa, la materia orgánica y la cadena de productos forestales anualmente (fig. III.1). El modelo consta de seis módulos:

- Biomasa.
- Suelo
- Productos
- Bioenergía
- Financiero
- Almacenamiento de carbono.

El almacenamiento de carbono en la biomasa se calcula como el balance entre el aumento de la biomasa debido al crecimiento y las pérdidas debidas a mortalidad y aprovechamientos. En el caso del suelo se toman los valores de desfronde, incorporación de la materia muerta y restos de cortas. Para los productos el carbono se debe tener en cuenta la eficiencia industrial, el tipo de producto y su vida útil y el grado de reciclaje. Los productos que no intervienen en el módulo anterior se contabilizan como materia prima en la generación de bioenergía. El módulo financiero calcula el beneficio financiero de los diferentes escenarios y el último módulo considera todos los flujos hacia y de la atmósfera y determina el balance de carbono que existe ante distintos escenarios. Todas las simulaciones de almacenamiento, flujos, costes, ingresos y créditos de carbono están referidas a la hectárea y por un período de un año.

La salida del programa puede ser tanto gráfica como en tablas en las que se muestrea el ciclo del carbono en el módulo de biomasa, suelo, productos y el total. Los módulos financiero y de bioenergía se muestran sólo en formato tabla.

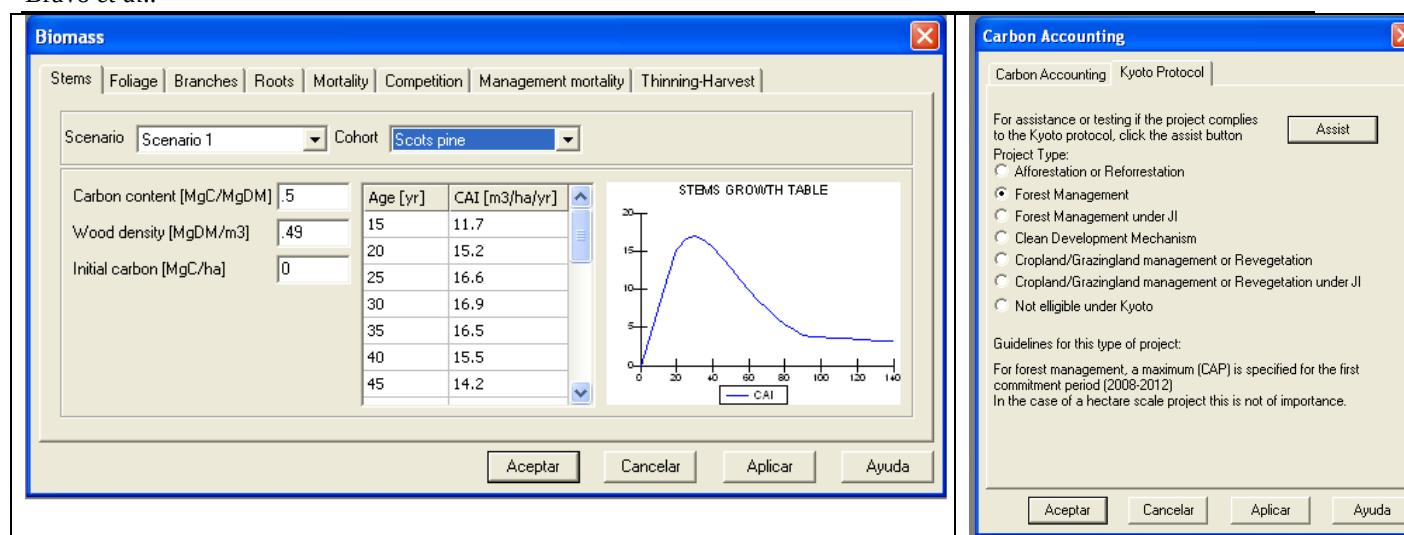


Fig. III.1. Aspecto del módulo de biomasa y la forma de contabilizar el carbono de acuerdo con el Protocolo de Kyoto en el modelo CO2FIX.

Las mediciones de eddy-covarianza (*eddy-covariance measurements*) evalúan directamente el intercambio de carbono entre el ecosistema forestal y la atmósfera (Shelhaas et al., 2004). Se trata de un sistema en torre que mide el intercambio (flujo) de todo el ecosistema entre el suelo y 10 ó 15 metros por encima del dosel de copas. Las mediciones tienen una gran resolución temporal (en algunos casos cada 30 minutos). La mayor desventaja que presentan es que no se puede separar el carbono que existen en las distintas partes del ecosistema: biomasa aérea, subterránea, suelo etc.. y la extracción de carbono debido a los aprovechamientos tampoco se tiene en cuenta. Además necesita instrumental delicado y caro como un anemómetro, higrómetro y analizador de gases.

Este tipo de sistema se suele utilizar en combinación con las ecuaciones de biomasa o con inventarios forestales para la evaluación conjunta del almacenaje de carbono y su flujo (Curtis et al., 2002) El proyecto Europeo EUROFLUX utiliza este tipo de metodología para evaluar el papel de los bosques como sumidero de carbono (<http://www.unitus.it/eflux/euro.html>).

IV. ADAPTACIONES SELVÍCOLAS PARA FAVORECER EL DESARROLLO DE SISTEMAS FORESTALES ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO.

IV.1 SITUACIONES CRÍTICAS

Diferentes situaciones selvícolas pueden considerarse como críticas respecto del cambio climático y, por tanto, merecedoras de especial atención. Así se pueden citar las siguientes: (1) selvicultura clonal, (2) áreas marginales de la distribución de las especies forestales, (3) zonas de transición climática y ecotonos y (4) masas fragmentadas, insulares y relícticas

La selvicultura clonal (p.ej., populicultura) es muy vulnerable al cambio climático. Una opción de manejo puede ser diversificar las plantaciones mediante la mezcla de clones. Esto puede dar lugar a problemas de competencia entre clones en las plantaciones. La experimentación constante de distintos clones y el desarrollo de material genético adaptado a las nuevas condiciones puede permitir mantener este tipo de selvicultura. En cualquier caso, se producirá un incremento de los costes en este tipo de selvicultura lo que en algunos casos puede llevar al límite del rendimiento económico a las mismas.

La vulnerabilidad de las especies vegetales al cambio climático es función de la sensibilidad al clima y de la capacidad de adaptarse. En aquellas zonas marginales de distribución, donde las especies encuentran en el límite de estación o donde son relictas el efecto del cambio climático será mayor. El Sureste de la Península Ibérica es uno de los ocho puntos calientes para la biodiversidad a nivel mundial. En esta zona se concentran una gran cantidad de endemismos que están muy ligados a condiciones ambientales determinadas. Por otro lado, muchas especies forestales o bien son endémicas (*Abies pinsapo*) o tienen en España uno de sus límites de distribución (*Pinus sylvestris*) o son especies con distribución muy fragmentada (*Pinus nigra*). Así, masas como las de pino silvestre en Sierra Nevada o en Hoyocasero (Ávila) podrán sufrir riesgo de pérdida de vitalidad o menor potencia germinativa, afectando gravemente a la regeneración, por lo que medidas de conservación “*ex situ*” serán necesarias.

IV.2 ESTRATEGIAS SELVÍCOLAS PARA LA ADAPTACIÓN

Manejo de recursos genéticos

Hasta ahora está extendida la idea de que la semilla de procedencia local está mejor adaptada a las condiciones predominantes en cada bosque. Esta hipótesis asume que el clima futuro será similar al que ha modelado diferentes generaciones de plantas forestales en el pasado en cada lugar. Como ya hemos visto antes hay una gran incertidumbre sobre la veracidad de esta hipótesis. Si se tuviese claro cual es el sentido del cambio que podemos esperar sería relativamente sencillo determinar que material de reproducción debemos utilizar. Por ejemplo, si el clima tiende a ser más seco pero con temperaturas similares bastaría con buscar semillas de zonas donde se los rodales se desarrollen bajo este escenario climático. Sin embargo, dado que el futuro clima parece que será muy variable e impredecible en este momento, Aitken (2003) ha propuesto utilizar en los programas de repoblación plantas y semillas procedentes de diversas áreas para asegurar que al menos parte de los nuevos árboles estarán adaptados al clima futuro.

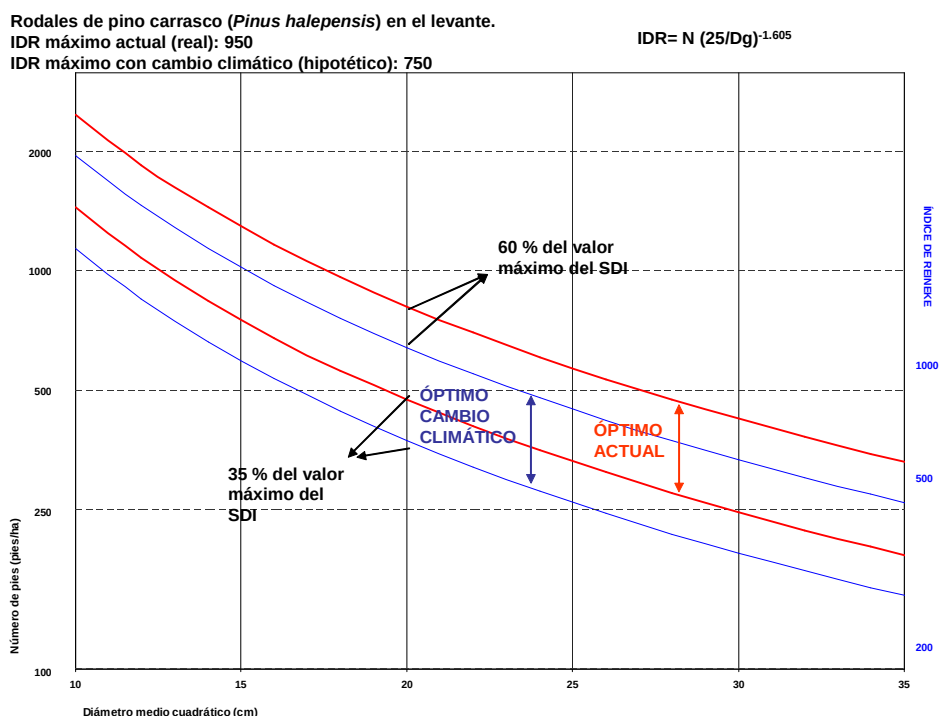
Los ensayos de material forestal de reproducción (MFR) deberían incluir datos termopluviométricos (p.ej., días-grado, precipitaciones,...) de periodos de tiempo (años) durante los que se han desarrollado. Aspectos ecofisiológicos como la eficiencia del uso del agua podrían tener especial relevancia. Con los resultados de este tipo de estudios y con unos escenarios generados por modelos más adecuados se podría adecuar el material de reproducción forestal a la previsible situación futura de las estaciones forestales.

Claras y clareos

Como se ha comentado antes, la gran incertidumbre sobre el rumbo futuro del clima condiciona gravemente la silvicultura incluso en momentos tempranos. Así, una estrategia puede ser buscar densidades altas tanto de plantación como de plántulas en regenerados naturales (Aitken, 2003) para tener mayores oportunidades de seleccionar mediante competencia intraespecífica y en los clareos y los árboles mejor adaptados.

En diferentes estudios se ha comprobado que una reducción de la densidad de los rodales permite que se adapten mejor a las situaciones previsibles de reducción de la disponibilidad hídrica y aumento de las temperaturas y de la irregularidad climática. Este hecho experimental puede llevar aparejado que los fenómenos de autoclareo aparezcan a densidades (expresadas por el índice de densidad del rodal) más bajas y que por tanto la banda de densidad óptima se desplace hacia abajo (figura IV.1.)

Figura IV.1.. Modificación hipotética de la densidad a mantener en los rodales por efecto del cambio climático. En el ejemplo mostrado la densidad de una masa con diámetro medio cuadrático igual a 20 cm oscila en la actualidad entre 815 y 475 árboles por ha mientras que en el escenario que representa la situación de cambio climático la densidad debe ajustarse para quedar entre 640 y 375 árboles por ha.



Cortas de regeneración

El previsible desacoplamiento entre los procesos de fructificación en los rodales forestales y las condiciones óptimas para la instalación y supervivencia de las plántulas hará muy incierto el éxito de las cortas de regeneración. Diferentes alternativas pueden plantearse para soslayar este problema. Entre otras (foto #.2), se pueden citar (1) alargamiento del periodo de regeneración como ya se hace en algunas masas de *Pinus nigra* en el Sistema Ibérico, (2) aprovechamiento de la regeneración avanzada presente en el rodal como ya se utiliza en rodales de *Pinus pinaster* en los arenales de la meseta castellana, (3) refuerzo de la regeneración natural mediante siembras y posteriores clareos para seleccionar los árboles mejor adaptados y asegurar una adecuada distribución del regenerado como ya se hace en las masas de *Pinus sylvestris* en Soria, (4) utilización de plantas nodrizas para la protección del regenerado forestal tal y como se está estudiando en rodales de *Pinus sylvestris* en Sierra Nevada, Granada (Zamora et al., 2001). La instalación de ensayos de regeneración forestal, tanto en el monte como en condiciones controladas, que permitan conocer y comprender los procesos que subyacen en la instalación del regenerado podrán servir de base para posteriores estrategias de gestión dentro del estrategias de manejo adaptativo (ver más adelante).

Resalveos en montes bajos

En los montes bajos mediterráneos, en los que la biomasa radical puede ser igual o incluso superior a la biomasa aérea (Canadell et al., 1999), cuando por efecto de la despoblación y de los cambios de hábitos (por ejemplo, la introducción de la calefacción mediante combustibles fósiles) en el mundo rural se abandonan los tratamientos de resalveos de los montes bajos se produce un estancamiento del crecimiento forestal (Rodà et al., 1999) que puede conducir a elevadas tasas de

mortalidad entre los resalvos. Tello et al. (1994) comprobaron que la reducción de la densidad de los montes bajos tiene implicaciones positivas sobre el balance del agua y del carbono de este tipo de montes reduciendo las tasas de mortalidad durante los años desfavorables. Por tanto, se deben adaptar las condiciones de los montes bajos para que la masa forestal haga un adecuado uso de las reservas hídricas especialmente en años muy secos. Así, las acciones conducentes a la reducción del número de chirpiales y a la transformación en monte alto debieran ser prioritarias en los montes bajos de las quercíneas mediterráneas.

Gestión adaptativa

La gestión adaptativa o manejo adaptativo es un proceso sistemático para la mejora continua de las prácticas y políticas de manejo mediante el aprendizaje a partir de los resultados de las actividades selvícolas (Nyberg, 1998) Las características fundamentales del manejo adaptativo son las siguientes (Nyberg, 1998):

1. el reconocimiento de la incertidumbre sobre cuál es la práctica de manejo ‘mejor’ para un situación y/o contexto particular.
2. meditada selección de las prácticas y métodos a ensayar.
3. cuidadosa implantación de un plan de acción para descubrir las partes críticas, por poco fundamentadas, del conocimiento actual.
4. seguimiento de la respuesta de los indicadores clave a las técnicas y prácticas desarrolladas.
5. el análisis de los resultados en relación con los objetivos originales.
6. incorporación de los resultados en las decisiones futuras.

Se trata, por tanto, de un proceso cíclico en el que cada actividad selvícola es parte de un experimento a escala real que debe ser planificado para obtener información útil para orientar la gestión forestal futura. Se trata, por tanto, de superar los conceptos clásicos de la investigación forestal (parcelas permanentes, ensayos de procedencias, sitios experimentales...) para complementarlos que no sustituirlos con estos ‘experimentos’ a escala real.

El fundamento del manejo adaptativo es que la gestión debe partir de ‘experimentos’ a escala real basados en nuestro conocimiento científico de modo que se puedan probar las hipótesis subyacentes y comprobar la validez de las predicciones para con los resultados obtenidos mejorar nuestra gestión. En el fondo se trata de que la gestión del medio natural debe ser técnica, pero con una base ecológica y antropológica, de forma que su desarrollo sea científicamente admisible, técnicamente posible, económicamente viable y socialmente aceptable (Bravo, 1989). Desde que el Servicio Forestal de los Estados Unidos de América adoptó, como instrumento básico de gestión forestal, el manejo adaptativo se ha acumulado una ingente cantidad de ejemplos prácticos de este tipo de estrategia de gestión. Un ejemplo clásico de aplicación de esta estrategia es el *Pacific Northwest Forest Plan* que tiene como área de actuación los estados de Oregon y Washington en los que el declive de las poblaciones de lechuza moteada (especie indicadora del buen estado ambiental de los bosques de esa zona de los Estados Unidos) generó una fuerte corriente de opinión para modificar los esquemas selvícolas tradicionales.

La principal razón para implementar un programa de manejo adaptativo es que al hacerlo estamos convirtiendo la experiencia local, con nulo valor para determinar procesos de causa-efecto, en información útil para analizar las causas de los resultados obtenidos y así elevar el nivel de los conocimientos técnicos aplicados a la gestión de los bosques. Para aplicar técnicas de gestión como las llamadas ‘rutinas’ pastorales no hace falta un fundamento técnico o científico, basta con una persona diestra en repetir lo que ya se hizo con anterioridad. Si las situaciones ambientales, sociales o económicas no cambian, la aplicación de unas buenas ‘rutinas’ son muy efectivas y, seguramente, la sociedad no demandará más de los gestores forestales. Sin embargo, en una situación altamente cambiante (cambio climático, cambios en las preferencias sociales respecto a los bosques, cambios

en los usos productivos,...) el conocimiento científico que podemos obtener mediante el manejo adaptativo es indispensable para dar respuesta a las necesidades de la sociedad.

Las principales dificultades para implementar un programa de manejo adaptativo son:

1. Dificultades para aplicar una gestión técnica por una carga burocrática excesiva de los gestores forestales de la administración pública y falta de medios y profesionalización de la gestión forestal en montes privados.
2. Falta de formación en técnicas estadísticas avanzadas (diseño experimental, técnicas bayesianas,...) y en métodos de tomas de decisión bajo incertidumbre.
3. Falta de conocimiento sobre métodos y técnicas de manejo adaptativo.
4. Falta de dudas sistematicas en la aplicación de los procedimientos de gestión y de tradición en el intercambio de experiencias entre sí y con la comunidad científica.

Las limitaciones presupuestaria no suelen ser un problema ya que si en el diseño de la gestión se introducen los criterios y procedimientos del manejo adaptativo los costes son limitados.

Todo programa de manejo adaptativo debe basarse en los siguientes instrumentos:

1. *Sitios experimentales a largo plazo con dispositivos experimentales sofisticados.* Estos dispositivos experimentales a largo plazo son muy caros de instalar y mantener y, además, conforme su antigüedad aumenta, se incrementa su valor pero también es muy probable que la cuestión científica que motivo su instalación haya perdido relevancia (Innes, 2005).
2. *Redes de parcelas de seguimiento.* Estas parcelas pueden ser temporales, de intervalo o permanentes en función del número de remediciones que se hayan realizado. Un adecuado equilibrio entre todos los tipos de parcelas distribuidas por todas las situaciones selvícolas de interés es fundamental para poder extender los resultados en sitios experimentales intensivos a largo plazo.
3. *Análisis regionales.* De poco valen los resultados aislados de los ‘ensayos’ que puedan hacer los gestores en cada lugar. Debe haber una planificación, al menos a escala comarcal, de las alternativas de manejo a ensayar para poder extraer conclusiones válidas. Si no se hace así, se estará tirando el dinero en ‘ensayos’ locales de nulo valor ya que no podremos discernir los resultados que muestran relaciones casuales de los que muestran relaciones causales.
4. *Modelización y simulación.* No todas las opciones pueden ser ensayadas pero modelos adecuados permiten simularlas y extraer conclusiones para, al menos, eliminar las que sean claramente indeseables.
5. *Integración de resultados a múltiples escalas.* Los bosques son sistemas holísticos en los que el todo es más que la suma de las partes. La aproximación a los problemas de abajo-arriba (*bottom-top approach*), del árbol al paisaje, debe complementarse con una aproximación de arriba-abajo (*top-bottom approach*), del paisaje al árbol, de manera que se pueda obtener una visión de conjunto ausente si sólo observamos una escala.
6. *Análisis de cortas* (Gadow y Kleinn, 2005) Se trata de seleccionar zonas donde se van a realizar cortas (claras o cortas de regeneración) y, una vez señalada la corta, medir todos los árboles. Una vez realizada la corta dispondremos de información del rodal antes y después de la corta y de la misma. El análisis, de una red de estos sitios, al cabo un periodo predeterminado podrá aportarnos información valiosa sobre las prácticas selvícolas a escala real.

Parece claro que la sistematización de los datos obtenidos de las respuestas de los tratamientos selvícolas y de ensayos cuidadosamente diseñados puede incrementar el éxito de nuestra respuesta a los desafíos que los bosques enfrentan con el cambio climático. Se trata en el

fondo, de incorporar estos datos a la gestión forestal de la misma forma en que las grandes cadenas de distribución comercial incorporan los datos de nuestras compras a su estrategia comercial y de desarrollo. Es decir, se trata de desarrollar técnicas de las denominadas en inglés *data mining* y ponerlas al servicio de la sostenibilidad forestal y de la mitigación del cambio climático.

V. LA SELVICULTURA Y LOS BOSQUES COMO INSTRUMENTO PARA MITIGAR EL CAMBIO CLIMÁTICO.

El almacenamiento de carbono en los bosques y en los productos forestales ha sido propuesto como una estrategia adecuada para mitigar los efectos del cambio climático. Hasta cierto punto, se trata de comprar tiempo mientras se consigue una solución definitiva al problema del cambio climático que tan sólo puede llegar de la mano de un cambio radical de nuestra dependencia de la energía proveniente de combustibles fósiles. Sin embargo, se ha planteado la hipótesis de que en un futuro próximo los bosques puedan convertirse en emisores de carbono en lugar de sumideros (Kurz y Apps, 1999, Gracia *et al.*, 2001, Reichstein *et al.*, 2002)

La gestión forestal puede colaborar en la mitigación del cambio climático mediante tres estrategias fundamentales: (1) la conservación o mantenimiento del carbono acumulado en los bosques, (2) el secuestro o incremento del carbono retenido en los bosques y (3) mediante la sustitución de materiales y combustibles procedentes de combustibles fósiles o que utilizan una gran cantidad de energía por otros que sean renovables.

La acumulación de biomasa y C en masas forestales se puede incrementar a través de diferentes opciones (Gracia *et al.* 2005). Como ejemplos se puede señalar, entre otras, la protección frente a los incendios, el control de enfermedades y plagas, el cambio de la amplitud del turno, la regulación de la densidad arbórea, la mejora del estado nutricional, la selección de especies y genotipos, el empleo de biotecnología o la adecuada gestión de los restos de corta. La mayor parte de estas actividades pueden incrementar la tasa de acumulación de C entre 0,3 y 0,7 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ (Gracia *et al.* 2005).

V.1. COMPOSICIÓN ESPECÍFICA

El almacenamiento del carbono depende de la composición específica del rodal (Bogino *et al.*, 2006, Bravo *et al.*, 2006) y de la calidad de la estación (Bravo *et al.*, 2006). Bogino *et al.* (2006) estudiando, en el monte de Valsaín (Sistema Central), rodales puros de *Pinus sylvestris* y de *Quercus pyrenaica* y rodales mixtos de ambas especies determinaron que en las masas pino silvestre se almacena más carbono que en la de rebollo, dándose una situación intermedia en las masas mixtas. Al estudiar rodales de pino silvestre y pino pinaster, Bravo *et al.* (2006) encontraron que los rodales de pino silvestre almacenan más cantidad de carbono que los rodales de pino pinaster. Estas diferencias encontradas pueden deberse a tres motivos principales: (1) diferente configuración del fuste y del resto de la parte aérea del árbol de cada una de las especies, (2) diferente estructura forestal (es decir, diferente distribución diamétrica) generada por los diferentes tratamientos selvícolas aplicados y (3) insuficiente conocimiento de la biomasa subterránea lo que hace que infraestime su importancia.

V.2. MODIFICACIÓN DEL TURNO

El turno tiene un impacto ambivalente sobre el almacenamiento de carbono en los bosques (tabla V.1.). Si bien turnos cortos permiten obtener un mayor crecimiento anual medio (Bravo *et al.*, 2006), los turnos largos facilitan que la proporción de carbono en la corta final en relación con lo obtenido en cortas intermedias sea mayor (Bravo *et al.*, 2006) y dado que los productos así obtenidos tienen como destino productos perdurables (muebles, construcción,...) el almacenamiento del carbono se produce por mucho más tiempo que en el caso de los turnos cortos.

En estaciones poco productivas se recomienda alargar los turnos para conseguir almacenar carbono ya que se obtienen resultados similares que cuando se aplican turnos cortos en estaciones muy productivas (Bravo *et al.*, 2006). Por otro lado, los turnos largos permiten obtener productos de mayor tamaño que se pueden destinar a usos que almacenarán el carbono por más tiempo.

Si el alargamiento del turno es elevado pueden aparecer árboles muertos (en pie o derribados) que conllevan un aumento de la biodiversidad (Franklin *et al.*, 1997). Este aumento de la presencia de madera muerta tiene un importante impacto sobre el almacenamiento de carbono en los sistemas forestales porque (1) la tasa de descomposición de la materia muerta varía con la especie, el tamaño del árbol, tipo de sustrato (corteza, albura y duramen) y las condiciones estacionales (temperatura, humedad,...) y (2) puede incrementar el riesgo frente a perturbaciones (por ejemplo, incendios) y por tanto de liberaciones bruscas de incendios (foto #.3).

Un aspecto importante es la distribución de la biomasa en diferentes fracciones que pueden permitir diferentes usos y por tanto un tiempo de almacenamiento de carbono diferente. Bravo *et al.* (2006) comprobaron que la proporción de la biomasa, y por tanto del carbono, almacenado en el fuste de *Pinus sylvestris* y *Pinus pinaster* aumenta con la edad mientras que en las ramas disminuye si se consideran todas las fracciones de ramas hasta una determinada edad, en la que aumenta ligeramente por el incremento de biomasa debido al engrosamiento de las ramas.

Desde el punto de vista del aprovechamiento de la biomasa forestal residual (derivados fundamentalmente del desramado), y considerando que las ramas de diámetro menor de 2 cm quedan en el monte; la biomasa energética disponible como sustitución a los combustibles fósiles representa un incremento del 15% del total de carbono fijado por el fuste, en el caso del pino silvestre y un 7% en el caso del pino negral. Es decir, la capacidad de los sistemas forestales, sometidos a aprovechamiento sostenible, como sumidero de carbono en sus dos vertientes (fijación y sustitución) se vería incrementada si el aprovechamiento de la biomasa residual fuera efectivo. Fig. V.1.

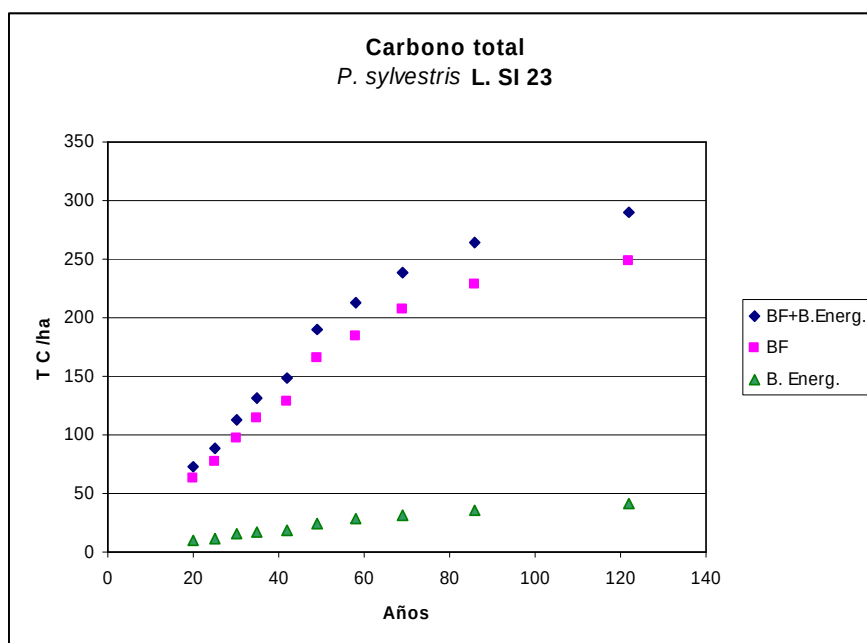


Figura V.1. Toneladas de carbono por hectárea fijado

Como ya hemos visto antes, existen diversos criterios para fijar el turno adecuado para conseguir simultáneamente la obtención de productos forestales y la regeneración del bosque. El

criterio más utilizado es el denominado de máxima renta en especie que coincide con la edad a la que el crecimiento medio es máximo. Este criterio es el más utilizado en España y ha mostrado que es posible obtener de forma simultánea maximizar la producción forestal y obtener otros bienes y servicios que la sociedad demanda (setas, caza, conservación de ecosistemas,...). El turno tiene un impacto ambivalente sobre el almacenamiento de carbono en los bosques (tabla#2). Si bien turnos cortos permiten obtener un mayor crecimiento anual medio (Bravo *et al.*, 2006), los turnos largos facilitan que la proporción de carbono en la corta final en relación con lo obtenido en cortas intermedias sea mayor (Bravo *et al.*, 2006) y dado que los productos así obtenidos tienen como destino productos perdurables (muebles, construcción,...) el almacenamiento del carbono se produce por mucho más tiempo que en el caso de los turnos cortos. En estaciones poco productivas se recomienda alargar los turnos para conseguir almacenar carbono ya que se obtienen resultados similares que cuando se aplican turnos cortos en estaciones muy productivas (Bravo *et al.*, 2006).

Si el alargamiento del turno es elevado pueden aparecer árboles muertos (en pie o derribados) que conllevan un aumento de la biodiversidad (Franklin *et al.*, 1997). Este aumento de la presencia de madera muerta tiene un importante impacto sobre el almacenamiento de carbono en los sistemas forestales que ha de ser evaluado porque (1) la tasa de descomposición de la materia muerta varía con la especie, el tamaño del árbol, tipo de sustrato (corteza, albura y duramen) y las condiciones estacionales (temperatura, humedad,...) y (2) puede incrementar el riesgo frente a perturbaciones (por ejemplo, incendios) y por tanto de liberaciones bruscas de CO₂.

Tabla V.1. Impacto de la composición específica, la calidad de la estación y el turno sobre el carbono secuestrado en masas de pino silvestre y de pino negral, (adaptado de Bravo *et al.*, 2006)

Especie	Calidad de Estación	Turno(años)	Crec.Medio (t año ⁻¹)
<i>Pinus sylvestris</i> L.	17	83	2.16
		137	1.47
	23	69	2.99
		122	2.42
<i>Pinus pinaster</i> Ait.	15	101	1.28
		149	1.06
	21	83	1.89
		128	1.57

Un aspecto importante es la distribución de la biomasa en diferentes fracciones que pueden permitir diferentes usos y por tanto un tiempo de almacenamiento de carbono diferente. Bravo *et al.* (2006) comprobaron que la proporción de la biomasa, y por tanto del carbono, almacenado en el fuste de *Pinus sylvestris* y *Pinus pinaster* aumenta con la edad mientras que en las ramas disminuye. Este hecho tiene un impacto considerable sobre el posible aprovechamiento de la biomasa residual de los tratamientos selvícolas para la generación de energía. En general, se ha comprobado que en el caso de los pinares el porcentaje de biomasa que corresponde a las ramas de entre 2 y 7cm, que es la que se puede utilizar para la obtención de energía, decrece con la edad (Bravo *et al.*, 2006) hasta una determinada edad, en la que aumenta ligeramente por el incremento de biomasa debido al engrosamiento de las ramas.

V.3. CLARAS

Las claras son unas de las intervenciones selvícolas más importantes en los bosques gestionados de manera sostenible. Entre sus objetivos económicos y selvícolas destacan (Río, 1999):

- Reducir la competencia para procurar estabilidad biológica y mejorar el estado sanitario.
- Regular o mantener la composición específica y preparar la masa para la regeneración natural.
- Anticipar la producción, de tal manera, que la producción al final del turno sea máxima.
- Incrementar el valor y dimensiones de los productos.

El régimen de claras queda definido, entre otros, por la edad de iniciación, el tipo, el peso, medido como porcentaje del número de pies o de área basimétrica extraída respecto al valor antes de la clara y el número de intervenciones. La resultante de biomasa que se consiga al final del turno es producto de las actuaciones intermedias como las claras.

Para ilustrar lo anteriormente expuesto se presenta, a continuación, un ejemplo de la incidencia de dos regímenes de claras en la fijación de carbono al final del turno, y se comparan con la alternativa de no realizar claras (Bravo-Oviedo y Río, 2006). Las características de los dos tipos de claras son:

Escenario 1. Tres intervenciones en las que se extrae siempre el mismo peso (35 % de área basimétrica). La primera a los 20 años.

Escenario 2. Tres intervenciones en las que se extrae un peso variable (20% en las dos primeras y un 35% en la última). La primera clara se realiza a los 30 años.

Escenario sin clara: En este caso se ha aplicado una mortalidad natural que oscila entre 0.11 y 0.5% para un diámetro medio cuadrático de 15 cm.

Las simulaciones se han llevado a cabo utilizando la aplicación *Negral*, basada en el modelo de crecimiento y producción para pino negral propuesto por Bravo-Oviedo *et al.*, (2004) y las ecuaciones de biomasa propuestas por Montero *et al.* (2005).

La intervención siempre genera una mayor fijación de carbono que las masas no intervenidas a la edad del turno, incluso sin incluir en los cálculos el carbono secuestrado por los productos generados en las claras o la sustitución de combustibles fósiles por la utilización de residuos de corta. Sin embargo, no todas las intervenciones fijan la misma cantidad. Así, en el escenario 1 se consigue un 12.47 % más de carbono fijado por la fracción correspondiente al tronco que con el escenario sin clara y un 8.69 % más que el escenario 2. Este último, sólo mejora al final del turno en un 3.48% al escenario sin claras. (Tabla V.2.)

La fijación de carbono es mayor en un escenario sin claras hasta los 45 años donde la respuesta positiva de la vegetación a una reducción de la densidad favorece el crecimiento de la misma. (Figura V.2.).

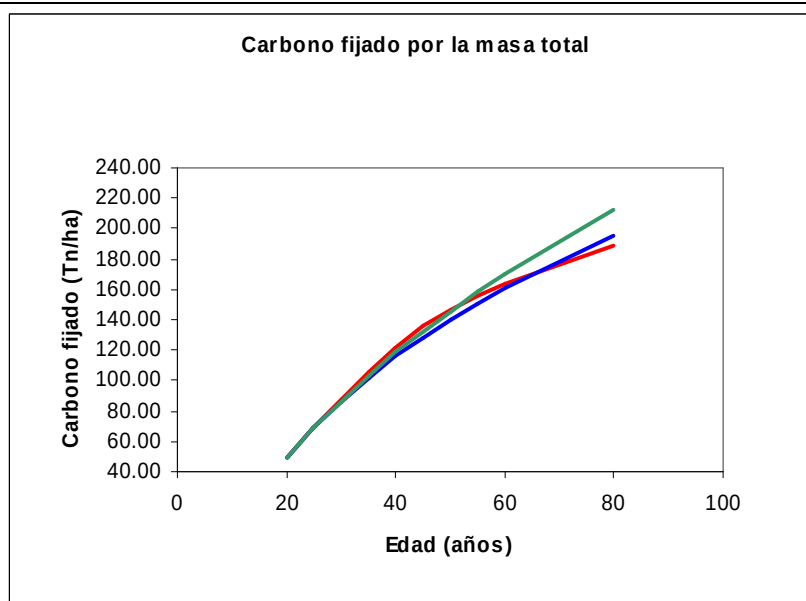


Figura V.2. Toneladas de carbono por hectárea fijado al aplicar distintas alternativas selvícolas en una masa de pino negral. En verde escenario 1 de claras, en azul escenario 2 de claras, y rojo escenario sin clara. Más información en el texto.

Lo mismo se puede decir para buenas calidades de pino silvestre, también en el Sistema Central, donde el incremento anual es mayor en regímenes de claras intensos como el Modelo E: claras fuertes con selección de árboles del porvenir y turno 100 años (Montero *et al.*, 2003). Sin embargo, la respuesta a la modificación del turno y del régimen de clara no tiene porqué ser el mismo para todas las especies o en todas las latitudes y depende de si la intensidad de la clara a sobrepasado el umbral de intensidad en el que se puede producir una pérdida de producción en volumen (Hamilton, 1981). En un modelo de producción conjunta de madera y carbono secuestrado, introduciendo una política de subvenciones a la fijación del carbono Pohjla y Valsta (2006) encontraron que tiene más importancia la modificación del régimen de claras que la modificación del turno en masas de pino silvestre de Finlandia, desde el punto de vista de coste-efectividad y que, por el contrario, en el caso de picea es más importante retrasar la corta final, ya que al estar esta especie en mejores calidades la tasa de crecimiento en volumen no se reduce tanto. Balboa-Murias *et al.* (2006) aconsejan alargar el turno y disminuir la intensidad de claras, medida como la relación entre la producción acumulada desde la clara y el volumen total producido para masas repobladas de pino radiata y pino gallego en Galicia.

Pero no sólo la producción principal de madera es responsable de una fijación elevada de carbono. Así para un esquema selvícola (Calama 2007, Calama *et al.*, 2007) orientado a la producción de piñón se encuentra que masas de pino piñonero con turno de 120 años se fija 1,11 Tn/ha y para un esquema selvícola de producción de madera la fijación es de 1,45 Tn/ha.

Tabla V.2. Carbono fijado en diferentes alternativas de claras en toneladas por hectárea referido por fracciones y alternativas

Escenario 1									Escenario 2								Escenario sin claras							
Edad	N	Dg	Tronco	B7	B2_7	B2	R	T	N	Dg	Tronco	B7	B2_7	B2	R	T	N	Dg	Tronco	B7	B2_7	B2	R	T
20	1500	15.9	29.7	0.0	1.9	5.9	11.5	48.9	1500	15.9	29.7	0.0	1.9	5.9	11.5	48.9	1500	15.9	29.67	0.00	1.87	5.87	11.46	48.87
25	726	22.0	42.1	0.0	2.7	7.9	15.8	68.6	1500	18.2	41.8	0.0	2.7	8.1	15.8	68.3	1500	18.2	41.8	0.00	2.67	8.06	15.82	68.30
30	726	24.8	53.6	0.0	3.5	9.9	19.7	86.7	1500	19.9	52.5	0.0	3.4	10.0	19.6	85.5	1315	21.2	54.16	0.00	3.49	10.15	20.06	87.78
35	374	31.2	64.5	0.1	4.2	11.6	23.3	103.7	1021	23.4	63.0	0.0	4.1	11.6	23.2	102.0	1183	23.8	65.38	0.06	4.25	11.98	23.83	105.40
40	374	34.1	74.4	0.2	4.9	13.2	26.6	119.2	1021	24.8	71.8	0.1	4.7	13.1	26.2	116.0	1081	26.1	75.53	0.10	4.95	13.61	27.17	121.23
45	243	37.4	82.9	0.3	5.5	14.5	29.4	132.5	816	26.3	79.9	0.1	5.2	14.5	29.0	128.7	1000	28.2	84.68	0.15	5.58	15.04	30.15	135.43
50	243	40.2	91.2	0.4	6.1	15.8	32.1	145.6	816	27.6	87.3	0.1	5.7	15.7	31.5	140.3	998	29.1	91.44	0.18	6.04	16.15	32.41	146.00
55	243	42.7	99.3	0.6	6.6	17.0	34.7	158.1	531	29.3	94.0	0.1	6.2	16.8	33.7	150.9	997	29.8	97.37	0.21	6.44	17.12	34.40	155.27
60	243	44.9	106.9	0.8	7.2	18.2	37.1	170.1	531	30.8	100.4	0.2	6.6	17.9	35.9	161.0	995	30.5	102.6	0.24	6.80	17.97	36.15	163.46
80	243	51.5	133.3	1.8	9.0	22.1	45.6	211.9	531	35.2	122.7	0.4	8.1	21.4	43.2	195.8	994	32.3	118.6	0.35	7.89	20.54	41.44	188.47

N: Número de pies/ha, Dg, Diámetro medio cuadrático en cm, BTron: fracción tronco, B7: fracción de ramas de más de 7 cm, B2_7:fracción de ramas entre 2 y 7 cm; B2: fracción de ramas de menos de 2 cm; R: fracción radical; T:Total

V.5. Ordenación de montes

El inicio, en el siglo XIX, de la organización de los aprovechamientos forestales en los montes españoles permitió registrar las decisiones tomadas y los resultados obtenidos. Así, hoy podemos analizar como ha evolucionado la fijación del dióxido de carbono en la biomasa forestal. El IPCC en su informe sobre mitigación (IPCC, 2001) alerta sobre la temporalidad de los reservorios de carbono en los bosques y del peligro que entrañan si no se controlan las emisiones derivadas de grandes incendios forestales. Además asegura que la cantidad de carbono almacenado o la cantidad de emisiones evitadas depende de las prácticas de ordenación que pueden orientarse a la acumulación a largo plazo o a la mayor absorción en el menor tiempo posible. Un compromiso entre ambas soluciones debería estar presente en los proyectos de ordenación que se aplican en los montes.

El papel de la ordenación de montes supone la aplicación de medidas selvícolas sostenibles que aumenten la cantidad de carbono fijado en los bosques, como por ejemplo en el monte “Matas de Valsaín” (Segovia) que en el período 1993 a 2003 la fijación neta de carbono se incrementó un 6,28 % (Montero et al., 2004). Otro ejemplo lo encontramos en el monte “Pinar Llano” de Valladolid que manteniendo la posibilidad calculada en la Revisión del proyecto de Ordenación (Martín, 2005) se incrementará en los próximos 10 años el carbono fijado en un 7,23 %.

Osorio et al. (2006) estudiaron la evolución del dióxido de carbono fijado en los pinares de pino negral (*Pinus pinaster* Ait.) de Almazán (Soria). En este estudio se ha revisado la ordenación de los montes de Almazán durante un siglo, desde el año 1899 hasta 1999. En los documentos de la ordenación original y en las sucesivas revisiones de la planificación se reflejan el número de árboles que de distintos tamaños existían en estos montes. Esta información junto con las ecuaciones de biomasa desarrolladas por Montero et al. (2005) ha permitido reconstruir la evolución del CO₂ fijado en los pinares de Almazán.

Durante el siglo estudiado (Fig. V.3.) se ha producido un incremento constante del CO₂ secuestrado que ha oscilado entre 0,78 y 3,11 Tn/ha y año con la única excepción del periodo inmediatamente posterior a la guerra civil.

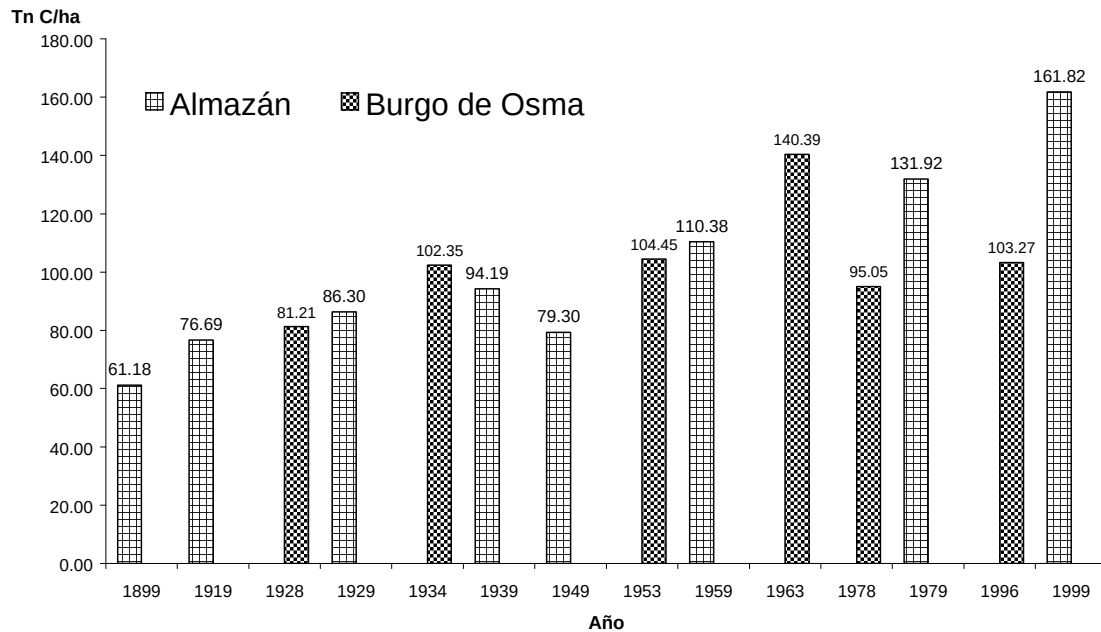


Fig. V.3. Evolución del CO₂ secuestrado en los pinares (*Pinus pinaster* Ait.) de Almazán y Burgo de Osma (Soria) durante el siglo XX (Basado en Osorio *et al.*, 2007)

V.5. Incremento de la superficie forestal

La superficie forestal española está aumentando debido tanto a la recuperación natural tras el abandono de extensos territorios marginales por otros usos agrarios (ganadería y agricultura) como a las labores de reforestación ligados a la política de abandono de tierras agrarias promovida por la Unión Europea. Esta tendencia que se observa en España también puede encontrarse en el resto de Europa y en China (FAO, 2006). Sin embargo, a nivel mundial la tasa de deforestación (FAO, 2006) ha pasado de 0,89 millones de ha por año (en el periodo 1990-2000) a 1,4 millones de ha por año (en el periodo 2000-2005). Esta pérdida de superficie forestal, junto con otros procesos como una disminución de la densidad, ha llevado a una disminución de 1,5 millones de toneladas de carbono (en el periodo 1990-2005). Si se disgrega este valor global por grandes regiones geográficas (FAO, 2006) se observa que la disminución de carbono almacenado en los bosques se ha concentrado en África, Asia y América del Sur mientras que el carbono almacenado en los bosques de Europa y América Central y del Norte ha aumentado. Los bosques de Oceanía han mantenido, en el mismo periodo, el carbono almacenado.

VII. CONCLUSIONES

La gestión forestal en un mundo cambiante desde le punto de vista ambiental, social y económico precisa de métodos de gestión que vayan más allá de las tradicionales ‘rutinas’ como antes se ha comentado. En este capítulo hemos presentando las tres principales iniciativas que se han desarrollado en los últimos años sobre

sostenibilidad forestal y adecuación al futuro incierto que nos plantea el cambio climático. La sociedad requiere decisiones técnicas basadas en el conocimiento y en constante adaptación a situaciones cambiantes. La ciencia y la gestión forestal deben aunar esfuerzos y utilizar todas las aproximaciones para que la práctica y la ciencia forestales ayuden a resolver problemas reales de gestores en situaciones reales.

VIII. BIBLIOGRAFIA

- Aitken, S. (2003) Adapting forest gene resource management to climate change TICtalk 14-16
- Balboa-Murias, M.A., Rodríguez-Soalleiro, R., Merino, A., Álvarez-González, J.G. (2006) Temporal variations and distribution of carbon stocks in aboveground biomass of radiata and maritime pine pure stands under different silvicultural alternatives. *Forest Ecology and Management* 237: 29-38
- Bogino, S., Bravo, F., Herrero, C. (2006) Carbon dioxide accumulation by pure and mixed woodlands of *Pinus sylvestris* L. and *Quercus pyrenaica* Willd. in Central Mountain Range (Spain) in Bravo F. (Ed.) *Managing Forest Ecosystems: The Challenges of Climate Change*. 98 pp. + Cd Ed. Cuatro Elementos.
- Bravo, F. (1989) Estudio silvopastoral de la dehesa boyal de Alía (Cáceres). *Ecología* 3:107-115
- Bravo, F., Bravo-Oviedo, A., Díaz-Balteiro, L. (2006) Carbon sequestration in Spanish Mediterranean forests under two management alternatives: A modeling approach. *European Journal of Forest Research* (en prensa)
- Bravo, F., Hann, D.W., Maguire, D.A. (2001) Impact of competitor species composition on predicting diameter growth and survival rates of Douglas-fir trees in southwestern Oregon *Canadian Journal of Forest Research* 31:2237-2247
- Bravo, F., Montero, G. (2003) High-grading effects on Scots pine volume and basal area in pure stands in northern Spain *Annals of Forest Sciences* 60:11-18
- Bravo-Oviedo, A., Delgado, J.A. (2002) La Teledetección y el Inventario Forestal Nacional. Fundamentos y aplicaciones en la Gestión Forestal Sostenible. 159-180, In: Bravo, F.; Río, M.; Peso, C. (Eds). El Inventario Forestal Nacional. Elemento clave para la gestión forestal sostenible. DGCN-FGUVA-UVA 191 p + CD.
- Bravo-Oviedo, A., Río, M. del (2006) *Thinning regimes related to carbon fixation in Mediterranean Pinus pinaster Ait. stands*. In Bravo, F. Ed. Proceedings of the IUFRO Meeting, Managing Forest Ecosystems: the Challenges of Climate Change, Palencia.
- Bravo-Oviedo, A., Río, M., Montero, G. (2004) Site index curves and growth model for Mediterranean maritime pine *Pinus pinaster* Ait. in Spain. *Forest Ecology and Management* 201: 187-197
- Bravo-Oviedo, A.; Delgado, J.A. 2002. La Teledetección y el Inventario Forestal Nacional. Fundamentos y aplicaciones en la Gestión Forestal Sostenible. (In: Bravo, F.; Río, M.; Peso, C. (Eds.) El Inventario Forestal Nacional. Elemento clave para la Gestión Forestal Sostenible. Fundación General de la Universidad de Valladolid 191 p.)
- Brown, S. (2002) Measuring carbon in forests: current status and future challenges. *Environmental Pollution* 116: 363-372.
- Calama, R. (2007) *Modelo Interregional de Silvicultura para Pinus pinea L. Aproximación mediante funciones con componentes aleatorios*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S.I.Montes. 307 p.

- Calama, R., Sánchez-González, M.; Montero G. 2007. *Integrated management models for Mediterranean multifunctional forests: the case of stone pine (Pinus pinea L.)*. EFI Proceedings. In press.
- Canadell, J., Djema, A., López, B., Lloret, F., Sabaté, S., Siscart, D., Gracia, C.A. (1999) Structure and dynamics of the root system. En Rodà, F., Retana, J., Gracia, C., Bellot, J. (eds) *Ecology of Mediterranean evergreen oak forests*. Springer, Berlín, pp 48-59
- Ciesla, W.M. (1996) *Cambio climático, bosques y ordenación forestal. Una visión de conjunto* FAO, Roma, 146 pp.
- Cuadrat, J.M. y Pita, M.F. 2004. *Climatología*. Ed. Cátedra. 769 pp.
- FAO (2006) Evaluación de los recursos forestales mundiales. <http://www.fao.org/docrep/008/a0400e/a0400e00.htm>
- Franklin J, Berg D, Thornburgh D, Tappeiner C (1997) Alternative silvicultural approaches to timber harvesting: variable retention. In: Kohm D, Franklin J (eds.) *Creating a Forestry for the 21st. Century*. Island Press, Washington, pp. 111-139.
- Fujimori T (2001) *Ecological and silvicultural strategies for sustainable forest management*. Elsevier, Amsterdam.
- Gholz, H.K., Nekane, K., Shimoda, H. (1997) *Forestry Sciences: The use of Remote Sensing in the Modeling of Forest productivity*. Ed. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (Netherlands), 323 p.
- Gracia, C., Sabaté, S., López, B., Sánchez, A. 2001. Presente y futuro del bosque mediterráneo: balance de carbono, gestión forestal y cambio global. En: Zamora, R. y Puignaire, F.I. (eds.) *Aspectos funcionales de los ecosistemas mediterráneos* CSIC-AEET, Granada pgs. 351-372
- Hamilton, G.J. (1981). The effects of high intensity thinning on yield. *Forestry*, Vol. 54. No. 1
- Gracia, C.A., Tello, E., Sabaté, S., Bellot, J. (1999) GOTILWA+: an integrate model of water dynamics and forest growth En Rodà, F., Retana, J., Gracia, C., Bellot, J. (eds) *Ecology of Mediterranean evergreen oak forests*. Springer, Berlín, pp 163-178
- Houghton, J.T., Meira, L.g., Callander, B.A., Harris, N., Kattenberg, A., Maskell, K. (eds) (1996) *Climate change 1995. The Science of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, 572 pp
- Ibáñez, J.J., Vayreda J., Gracia C. (2002) Metodología complementaria al Inventario Forestal Nacional en Catalunya. En: Bravo F., del Río M., del Peso C. (Eds.) *El Inventario Forestal Nacional. Elemento clave para la gestión forestal sostenible*: 67-77. Ed. Fund. General de la Uva 191 pp+ CD
- IPCC 1995. *Segundo Informe de Evaluación, Cambio climático 1995. Resumen para responsables de políticas*. Ed. OMM-PNUMA, 71 p.
- IPCC 2001. *Tercer Informe de Evaluación. Cambio climático 2001. Mitigación. Resumen para responsables de políticas y resumen técnico*. Ed. OMM-PNUMA, 85 p.
- Kimmins, J.P. (1988) Community organization: methods of study and prediction of productivity and yield forest ecosystems *Canadian Journal of Botany* 66:2654-2672
- Kollmann, F. (1959) *Tecnología de la madera y sus aplicaciones*. Tomo Primero. IFIE, Madrid.
- Kurz, W.A., Apps, M.J: (1999) A 70-year retrospective analysis of carbon fluxes in the Canadian forest sector *Ecological applications* 9:526-547
- Landsberg, J.J. (1986) *Physiological ecology of forest production* Academic Press, New York

- Masera, O., Garza-Caligaris, J.F., Kanninen, M., Karjalainen, T., Liski, J., Nabuurs, G.J., Pussinen, A., de Jong, B.J., (2003) Modelling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO2FIX V.2 approach. *Ecological Modelling* 164: 177-199.
- Melillo, J.M., Prentice, I.C., Farquhar, C.D., Schulze, E.D., Sala, O.E. (1996) Terrestrial biotic responses to environmental change and feedbacks to climate *In Houghton, J.T., Meira, L.g., Callander, B.A., Harris, N., Kattenberg, A., Maskell, K. (eds) Climate change 1995. The Science of Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, 445-481 pp*
- Montero, G., Río, M., Cañellas, I., Muñoz, M., Rojo, A. (2003) *Including CO₂-fixation in the evaluation of silvicultural alternatives in Scots pine stands in Spain*. In: Proceedings of Decision Support For Multiple Purpose Forestry. Vienna, April 23rd-25th.
- Montero, G., Muñoz, M., Donés, J., Rojo, A. (2004) Fijación de CO₂ por *Pinus sylvestris* L. y *Quercus pyrenaica* Willd. En los montes “Pinar de Valsaín” y “Matas de Valsaín”. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 13 (2) 399-416.
- Montero, G., Ruiz-Peinado, R., Muñoz, M. (2005) Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles. Monografías INIA: Serie Forestal nº 13, Madrid, 270 pp.
- Myneni, R.B., Hall, F.G., Sellers, P.J., Marshak, A.L. (1995) The interpretation of spectral vegetation indexes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33, 481-186.
- Oliver, C.D., Larson, B.C. (1990) *Forest Stand Dynamics*. Ed. McGraw-Hill Inc. 467 p.
- Osorio, L.F., Pando, V., del Peso, C., Bravo, F. 2007. Long term implications of traditional forest regulation methods applied on Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) forests in Central Spain: a century of management plans (manuscrito interno)
- Pardé, J. (1980) Forest biomass. *Forestry abstract (Review article)*, 41(8): 343-362.
- Pohjola, J., Valsta, L. 2006. Carbon credits and management of Scots pine and Norway spruce stands in Finland. *Forest Policy and Economics* 9 (7):789-798
- Reichstein, M., Tenhunen, J.D., Rouspard, O., Ourcival, J.M., Rambal, S., Miglietta, F., Peressotti, A., Pecchiari, M., Tirone, G., Valentini, R. (2002) Severe drought effects on ecosystem CO₂ and H₂O fluxes at three Mediterranean evergreen sites: revision of current hypothesis? *Global Change Biology* 8:999-1017
- Rodà, F., Mayor, X., Sabaté, S., Diego, V. (1999) Water and nutrient limitations to primary production En Rodà, F., Retana, J., Gracia, C., Bellot, J. (eds) *Ecology of Mediterranean evergreen oak forests*. Springer, Berlín, pp 183-194
- Sabaté, S., Gracia, C.A., Sánchez, A. (2002) Likely effects of climate change on growth of *Quercus ilex*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris* and *Fagus sylvatica* forest in the Mediterranean region *Forest Ecology and Management* 162:23-37
- Schelhaas, M.J., van Esch, P.W., Groen, T.A., de Jong, B.H.J., Kanninen, M., Liski, J., Masera, O., Mohren, G.M.J., Nabuurs, G.J., Palosuo, T., Pedroni, L., Vallejo, A., Vilén, T., (2004) CO2FIX V 3.1. – *Description of a model for quantifying carbon sequestration in forest ecosystems and Wood products*. ALTErrA Report 1068. Wageningen, The Netherlands, 49 p.
- Sprugel D.G. (1983) Correcting for bias in log-transformed allometric equations. *Ecology* 64(1): 209-210.
- Tello, E., Sabaté, S., Bellot, J., Gracia, C. (1994) Modelling the responses of Mediterranean forest to climate change: the role of canopy in water fluxes. *Noticiero de Biología*: 2(3):55

- Valentini R., Matteucci G., Dolman A.J., Schulze E.D., Rebmann C., Moors E.J., Granier A., Gross P., Jensen N.O., Pilegaard K., Lindroth A., Grelle A., Bernhofer C., Grunwald T., Aubinet M., Ceulemans R., Kowalski A.S., Vesala T., Rannik U., Berbigier P., Loustau D., Gudmundsson J., Thorgeirsson H., Ibrom A., Morgenstern K., Clement R. (2000) Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature* 404: 861-865.
- Wang, Q., Adiku, S., Tenhunen, J., Granier, A. (2004) On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. *Remote Sensing Environment* 94: 244-255.
- Zamora, R., Castro, J., Gómez, J. M., García, D., Hodar, J. A., Gómez, L., Baraza, E. (2001) El papel de los matorrales en la regeneración forestal. *Quercus*. 187:41-47.