

LA MADERA COMO FIJADORA DE

CO₂

FRANCISCO MARCOS MARTÍN,
JESÚS RUIZ CASTELLANO,
M. INÉS IZQUIERDO OSADO.

DPTO. DE INGENIERÍA FORESTAL,
ETSI DE MONTES. CDAD. UNIVERSITARIA S.N. 28040
MADRID Tfno: 91-3367120. Fax: 91-5439557.
CORREO-ELECTRÓNICO: FMARCOS@MONTES.UPM.ES

INTRODUCCIÓN

En los inicios del siglo XXI, desde el punto de vista ambiental, son varios los problemas que nos rodean, entre los que destacamos la necesidad de agua dulce y el preocupante desequilibrio de gases en la atmósfera, motivado por las abundantes emisiones de CO₂ procedente de las combustiones y de otros gases que producen el llamado efecto invernadero (metano, CFCs, HCFCs, tetracloruro de metilo, etc.). Deseamos mantener un alto nivel de vida, y para ello consumimos energía; pero también somos cada día más conscientes de que generamos residuos que pueden alterar de forma peligrosa nuestro ambiente.

Se plantea la necesidad de disponer procesos que retengan y fijen el CO₂. La fotosíntesis es uno de estos procesos y cada día gana más importancia su uso y el empleo de los productos obtenidos mediante el conjunto de reacciones químicas que la integran.

Hace mucho tiempo que el hombre observó el papel que los árboles juegan en el proceso de fijación de gases. Trataremos de calcular, de forma teórica, los factores que influyen en la fijación de CO₂, a sabiendas de que la fabricación de enseres y útiles de madera puede ser una importante forma de contribuir a esta fijación. En el fondo lo que hemos de buscar es el llamado ACV (Análisis del Ciclo de Vida) de la elaboración de la madera.

Existe la opinión, extendida en parte de la sociedad, que cree que la forma de conservar y proteger nuestros bosques es la de no consumir productos de madera. Esto no es del todo cierto, por que la mejor forma de proteger los bosques es la gestión sostenible de los mismos. Es lo que los antiguos forestales llamaban “la persistencia de la masa forestal”. En esta gestión, aprovechamos su producción para nuestro beneficio, conservando y mejorando las masas forestales.

Si miramos a nuestro entorno, podemos observar que la mayor parte de las cosas que usamos o tenemos

interviene en mayor o menor proporción la madera (papel, puertas, ventanas, muebles, elementos estructurales en edificios, combustibles, etc.). La producción de madera, aparte de ser útil para la sociedad, actúa como “almacén de C” purificando el aire, contribuyendo a la reducción del llamado efecto invernadero.

Los procesos de producción y transformación de la madera consumen menos energía que otros procesos que manejan otras materias primas; si a esto añadimos que mucha de la energía que consumen procede de sus propios residuos, el resultado final es que inciden positivamente en la reducción de la demanda de combustibles sólidos.

A continuación se van a analizar unos cuantos usos y aplicaciones de la madera y sus posibles ventajas en la fijación de CO₂. Además, la madera es un material renovable, reciclable, y que al final de su vida útil puede ser utilizado como biocombustible (C. Peraza, 1985), aprovechándose incluso las cenizas, devolviéndolas al campo como fertilizantes y consiguiendo así unos residuos prácticamente nulos.

LOS USOS Y APLICACIONES DE LA MADERA Y LA FIJACIÓN DE CO₂

Consideraremos los siguientes usos de la madera:

- 1) Muebles de madera maciza.
- 2) Fabricación de tableros.
- 3) Producción de pasta de papel.
- 4) Carpintería y construcción.
- 5) Producción de energía.

1) Para muebles de madera maciza.

El uso de la madera para la fabricación de muebles de madera maciza es el más noble debido a que en él se mantiene su estructura física y su composición química; únicamente se cambia su tamaño y su forma y, a veces, se le añaden sustancias para evitar que sea atacada por hongos y/o insectos xilófagos convirtiéndola así en menos vulnerable. Otras veces se añaden sustancias ignífugas para evitar el efecto devastador de las llamas. Pero siempre se trata de mantener toda su belleza de colorido, matices y dibujos; además sólo se emite el CO₂ correspondiente a la energía empleada en la corta, saca, transporte y elaboración de la madera.

La madera maciza presenta inconvenientes derivados de su estructura heterogénea. Sus características

físico-mecánicas varían con la dirección (tangencial, radial y transversal), con la parte del árbol, con la humedad y con la densidad. Además, para hacer un correcto uso de la madera ésta ha de estar bien seca y el secado (de cada madera en concreto y para cada uso particular) es un proceso que añade valor añadido y que supone un desembolso económico. Las tensiones que aparecen en el secado de la misma, si se realiza incorrectamente pueden incluso romperla, perjudicándola económicamente. En el secado artificial se consume energía y, por tanto, puede emitirse CO₂ a la atmósfera.

El balance de CO₂ será el siguiente:

$$BA_1 = FI_1 - EM_1$$

donde BA₁ = Balance de CO₂ para una tonelada de madera utilizada en muebles de madera maciza (en kg de CO₂ fijados/t de madera maciza)

FI₁ = CO₂ kg fijados por t de madera maciza empleada para muebles.

El valor de EM₁ es el CO₂ emitido en el ciclo vital e industrial de la madera y se compone de los siguientes sumandos:

$$EM_1 = EM_{spc} + EM_c + EM_s + EM_t + EM_e + EM_{tr}$$

donde EM_{spc} = CO₂ emitido en las operaciones de siembra o plantación y conservación del árbol y la masa arbórea a la que pertenece.

EM_c = CO₂ emitido en las operaciones de corta del árbol.

EM_s = CO₂ emitido en las operaciones de saca del árbol.

EM_t = CO₂ emitido en las operaciones de transporte del árbol desde el monte hasta el centro elaborador.

EM_e = CO₂ emitido en las operaciones de elaboración dimensional del árbol.

EM_{tr} = CO₂ emitido en las operaciones de tratamiento de la madera maciza.

Los valores de EM_{spc} + EM_c + EM_s + EM_t + EM_e + EM_{tr} son variables con cada tipo de aprovechamiento forestal y cada tipo de tratamiento industrial. Sin embargo, nuestras primeras estimaciones, realizadas con madera de chopo, indican que FI₁ es mayor que EM₁ por lo que BA₁ es positivo.

El factor inicial a considerar será el porcentaje de carbono, en masa, que tiene la madera. Los valores más utilizados, después de consultar a varios autores señalan que la composición media de las maderas es del orden de

Carbono 50 %; Oxígeno 41 %; Hidrógeno 6 % Nitrógeno 1 % y Cenizas 2 %, por lo que la cantidad de C por tonelada de materia seca se aproximará a 500 kg.

Desde este punto de vista los bosques productores de madera industrial, los de mayor posibilidad, serán los que necesiten almacenar más CO₂ para obtener el carbono necesario para producir madera.

Para calcular la fijación de CO₂, suponemos una producción por hectárea y año semejante al caso de chopo (se ha elegido la madera de chopo porque es la única de la que se poseen datos en cultivos energéticos). Así, supondremos que se producen en la chopera 18 t = 18.000 kg de materia seca, siguiendo publicaciones de San Miguel (1984) y estimaciones propias. En este caso se va a utilizar en la elaboración de muebles.

Por cada kg de madera, medido en materia seca, se fijan 44/12 = 3,67 kg de CO₂ (C = 12, = 16 y CO₂ = 44). Por otra parte, en el caso de chopo, la fijación de CO₂ será de 1,25 g, (J. Fernández, 1998) fijándose 1 g en la madera y el 0,25 restante es el fijado en forma de mineralización, humus del suelo y raíces que forman parte del tocón.

Así, la fijación de CO₂ se puede calcular de la siguiente forma: 18.000 kg x 0,5 (50% de la madera es C) x 3,67 x 1,25 = 41.250 kg = **41,250 t de CO₂ = FI**.

Para el cálculo de la emisión de CO₂ se utilizarán los valores obtenidos para la plantación de chopo, como en el caso de la producción por hectárea. Cálculos en España realizados por Fernández (1998), con plantaciones energéticas de cardo, han dado valores aproximados a las 0,77 t, en los procesos desde la plantación hasta el transporte a fábrica.

Denominamos E1 a este valor: **E1 = EM_{spc} + EM_c + EM_s + EM_t = 0,77 t de CO₂**.

Si queremos considerar, en general las emisiones de CO₂ podemos empezar consultando los datos de Mayo 1999 a Mayo 2000 que aparecen el número 10 de la revista Technoenergía, sobre producción de energía eléctrica en España. Si computamos la producción bruta de energía producida a través de las centrales termoeléctricas clásicas (carbón, fuel oil y gas), y las centrales térmicas que están acogidas al régimen especial, el 53 % de la producción de electricidad en España en este periodo fue a través de este tipo de centrales. Por lo tanto a la hora de determinar las emisiones de CO₂ sí es importante considerar el origen del kWh de electricidad que se consume.

Las emisiones son diferentes según el tipo de central termoeléctrica clásica considerada, según el prontuario de Energía '99 editado por el Foro de la Industria Nuclear Española:

Tipo de central	Emisiones de CO ₂ por MW	Emisiones de SO ₂ por MW	Emisiones de NO _x por MW
Carbón	7.800 t	39,8 t	9,45 t
Fuel-oil	4.700 t	91,0 t	2,54 t
Gas Natural	3.200 t	6,4 t	21,00 t

1 MW = 10³ kW = 10⁶ W

Así si consideramos el factor de carga del 75% (6.600 horas/año) las emisiones por kWh nos quedan:

Tipo de central	Emisiones de CO ₂ por kWh	Emisiones de SO ₂ por kWh	Emisiones de NO _x por kWh
Unidad	g	g	g
Carbón	1.181,80	6,03	1,43
Fuel-oil	712,12	13,79	0,38
Gas Natural	484,85	0,97	0,32
Térmica con biocombustibles	0	0	0

Se considera 0 g de emisión en las centrales térmicas con biocombustibles y que el ciclo del CO₂ es negativo y los porcentajes de N y S en la madera son despreciables.

De esta forma ya podemos estimar la cantidad de emisiones de CO₂, SO₂, NO_x, según el tipo de central que produzca el kWh.

Además, en la fabricación de muebles de madera

maciza se produce una serie de trabajos de elaboración primaria de la madera, en los que se producirá igualmente emisión de CO₂.

Según los datos publicados en la revista Montes por Fernández-Golfín Seco y otros (1994), las potencias demandadas y los consumos medios de las máquinas presentes en varios aserraderos son las que se exponen en la siguiente tabla.

Unidad del proceso	Potencia media demandada (kW)	Consumo específico (kWh/m ³)
Descortezadora	8,42	0,66
Sierra principal	11,17	1,66
Desdobladora	14,87	1,85
Canteadora	7,92	1,15
Retestadora	2,98	0,46
Aspiradora	15,54	2,12
Compresores	19,35	2,38
Transportes	9,93	1,83
Varios	7,45	1,16
TOTALES	97,63	13,27

De esta forma, utilizando estos datos, para hacer una primera transformación de la madera consumimos 13,27

kWh por metro cúbico. Además de la emisión producida en los procesos desde la plantación hasta el transporte de la materia, se puede calcular la emisión de CO₂ debida a la transformación de la madera en la industria de primera transformación. Para ello vamos a hacer una aproximación, en la que consideraremos diferentes sistemas energéticos que se pueden utilizar en este proceso como serán el carbón, el petróleo (sus derivados) y el gas natural.

En el parque eléctrico español se combinan una serie de energías primarias entre las que se encuentran las tres anteriores, con los siguientes porcentajes, para el año 1999: (IDAE, 2000).

ENERGÍA PRIMARIA	%
Lignito	7,3
Antracita	31,3
Petróleo	5,5
Gas natural	2,0
Total (*)	46,1

(*) El total no suma 100 ya que también se genera energía eléctrica con las centrales nucleares, las centrales hidroeléctricas, los parques eólicos, etc.

Se ha actualizado el porcentaje de gas natural a un 2%, para el año 2000, pues el uso de gas es cada vez mayor.

Por otro lado, aunque no se comportan igual, se van a considerar en conjunto el lignito y la antracita bajo la denominación de carbón, para simplificar los cálculos. Obtendremos tres coeficientes para el carbón, el petróleo y el gas, que se calcularán de la siguiente forma:

Carbón: X1 = (31,3+7,3)/46,1 = 0.8373

Petróleo: X2 = 5,5/46,1 = 0.1193

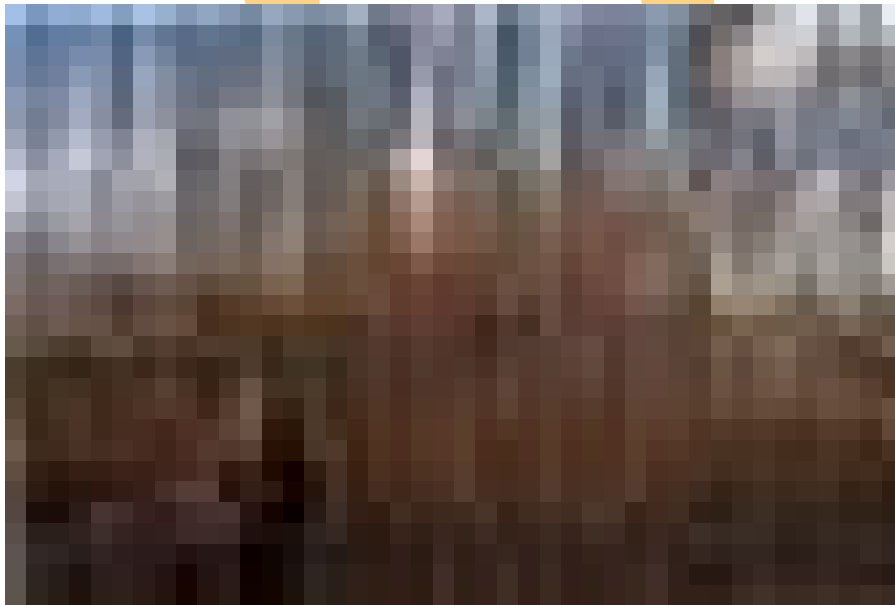
Gas: X3 = 2/46,1 = 0.0434

Con estos coeficientes se pondera los valores de gramos de CO₂ por kWh para los diferentes tipos de centrales que se presentaban en tablas anteriores, de forma que obtenemos los gramos de CO₂ por kWh que se emiten por estas centrales en el parque eléctrico español. La expresión será la siguiente:

(1.181,80 x X1 + 712,12 x X2 + 484,85 x X3) = **1.095,52 g CO₂ / kWh**

Con los datos anteriores se obtiene la emisión debida a la primera transformación. Las expresiones serán las siguientes:

13,27 kWh/m³ x 1.095,52 g CO₂/m³ = 14.537,5 g CO₂/



$m^3 = 14,537 \text{ kg CO}_2/m^3$

Si consideramos una densidad de la madera de $0,6 \text{ t/m}^3$ se obtiene:

$(18 \text{ t/ha.año} / 0,6 \text{ t/m}^3) \times 14,537 \text{ kg CO}_2/m^3 = 436,11 \text{ kg CO}_2/\text{ha.año} = 0,436 \text{ t CO}_2/\text{ha.año}$

$EM_e = 0,436 \text{ t CO}_2/\text{ha.año}$

No se consideran los procesos de tratamiento de la madera porque no se tienen datos para obtener un valor determinado. Por ello el resultado final lo multiplicaremos por 0,95.

De esta forma, el balance final de CO_2 fijado, por hectárea: $BA = FI_1 - E1 - EM_e = (41,250 - 0,77 - 0,436) \text{ t} = 40,044 \text{ t} = 40,044 \text{ kg}$

Considerando el factor debido al tratamiento de la madera (0,95) obtenemos $38,042 \text{ kg}$ de CO_2 fijados, por hectárea de plantación.

2) Para fabricación de tableros.

El uso considerado de la fabricación de tableros presenta el inconveniente de que consume más energía que el anterior ya que:

2A) Si el tablero es de partículas se consume energía y compuestos químicos en la obtención de la partícula, homogeneización y encolado de la misma y dimensionado del tablero.

2B) Si el tablero es contrachapado (o terciado como se denomina en el Cono Sur americano) se consume energía en la obtención de la chapa plana, encolado y prensado de la chapa y homogeneización y dimensionado del tablero.

2C) Si el tablero es de fibras se consume energía

y/o compuestos químicos en los procesos de desfibrado, homogeneización, encolado de la misma y dimensionado del tablero.

3) Para producción de pasta de papel.

En la producción de pasta los sistemas más habituales (por ser también los más baratos), son obtener la celulosa a partir de la madera virgen o bien el reciclar papel.

En cada uno de los sistemas hay unas consideraciones diferentes y emisión de CO_2 .

3A) En la producción de papel a través de madera virgen se consume CO_2 en los procesos de plantación tratamiento de la masa, recogida y procesado de la madera hasta la transformación en papel. En muchos de estos procesos se utiliza energía eléctrica y nos puede parecer que no emitimos CO_2 , pero el origen de esta energía consumida nos dirá la emisión de CO_2 que realizamos.

3B) En la producción de papel a partir de papel reciclado, utilizamos papel que ya ha sido transformado a partir de celulosa y este papel lo volvemos a utilizar para la fabricación de papel.

En este caso las emisiones de CO_2 durante el primer proceso son aprovechadas para la transformación del papel en el segundo proceso. Aunque hay gasto energético en la transformación del papel utilizado en celulosa este es inferior al de todo el proceso extractivo anterior.

Vamos a considerar el balance de CO_2 para los siguientes fabricantes partiendo de los datos de consumo de energía siguientes (IDAE, 1997):

T = toneladas de producto

Como en el caso de la madera maciza, vamos a considerar un valor de producción por hectárea total de 18 t, en las que el 50% de la madera es carbono. Igualmente se acepta una fijación de CO_2 de 1,25 g y un valor de emisiones desde la plantación hasta el transporte de la materia de $0,77 \text{ t CO}_2/\text{ha.año}$.

De esta forma las expresiones de los cálculos serán semejantes al caso de madera maciza:

$18.000 \text{ kg} \times 0,5 \times (44/12) \times 1,25 = 41.250 \text{ kg} = 41,250 \text{ t de CO}_2 = FI$

Denominamos E1 a este valor: $E1 = EM_{spc} + EM_c + EM_s + EM_t = 0,77 \text{ t de CO}_2$.

Para obtener la emisión de CO_2 que se produce por los diferentes fabricantes de papel, pasta e integrales, se parte de los valores de intensidad energética. Los cálculos serán los siguientes:

Fabricantes de pasta: $91,83 \text{ kWh/t} \times 18 \text{ t/ha.año} = 1.652,94 \text{ kWh/ha.año}$

$1.652,94 \text{ kWh/ha.año} \times 1.095,52 \text{ g CO}_2/\text{kWh} =$

$1.810.828,82 \text{ g CO}_2/\text{ha.año} = 1.811 \text{ t CO}_2/\text{ha.año} = EM_e$

Fabricantes de papel: $43,39 \text{ kWh/t} \times 18 \text{ t/ha.año} = 781,02 \text{ kWh/ha.año}$

$781,02 \text{ kWh/ha.año} \times 1.095,52 \text{ g CO}_2/\text{kWh} = 855.623,03$

$\text{g CO}_2/\text{ha.año} = 0,855 \text{ t CO}_2/\text{ha.año} = EM_e$

Fabricantes integrales: $46,29 \text{ kWh/t} \times 18 \text{ t/ha.año} = 833,22 \text{ kWh/ha.año}$

$833,22 \text{ kWh/ha.año} \times 1.095,52 \text{ g CO}_2/\text{kWh} = 912.809,17 \text{ g}$

$\text{CO}_2/\text{ha.año} = 0,913 \text{ t CO}_2/\text{ha.año} = EM_e$

No se consideran, como en el caso de la madera maciza, los procesos de tratamiento de la madera porque no se tienen datos para obtener un valor concreto. De esta forma, el balance final de CO_2 fijado, por hectárea:

Fabricantes de pasta: $BA = FI_1 - E1 - EM_e = (41,250 - 0,77 - 1,811) \text{ t} = 38,669 \text{ t}$

Fabricantes de papel: $BA = FI_1 - E1 - EM_e = (41,250 - 0,77 - 0,855) \text{ t} = 39,625 \text{ t}$

Fabricantes integrales: $BA = FI_1 - E1 - EM_e = (41,250 - 0,77 - 0,913) \text{ t} = 39,567 \text{ t}$

4) Carpintería y construcción.

El Balance final de CO_2 fijado, BA1, será igual que el de mueble de madera maciza, es decir, $40,044 \text{ kg}$ de CO_2 por hectárea de plantación. Esto es debido a que los procesos que se utilizan para la obtención de productos de carpintería (puertas, venatanas, suelos, etc.) y madera de construcción (vigas de madera maciza, vigas de madera laminada encolada, etc.) son los mismos que se utilizan para la fabricación de muebles de madera maciza.

5) Para producción de energía.

La madera se puede utilizar como fuente energética, que es el uso menos noble. Analizaremos la producción de energía eléctrica. El protocolo de Kyoto trató en 1997 de poner medidas para que el CO_2 atmosférico fuese fijado al terreno, en vez de ascender de forma continuada a la atmósfera cuando quemamos hidrocarburos. Nuestro objetivo en este epígrafe será determinar el CO_2 que es fijado por una plantación de chopo I-214. Para ello seguiremos la metodología presentada por Jesús Fernández (1998), modificada ligeramente por uno de nosotros

	Producción	Consumo energía	Intensidad energética
Fabricantes de pasta	902,2 kt	714.158 tep/año (82.848.955,9 kWh/año)	0,79 tep/t (91,83 kWh/t)
Fabricantes de papel	2.683,5 kt	14.003.767 tep/año (116.446.287,7 kWh/año)	0,37 tep/t (43,39 kWh/t)
Industrias integrales	1000,5 kt	399.246,3 tep/año (46.316.276,1 kWh/año)	0,40 tep/t (46,29 kWh/t)

Kt = 1.000 t

Tep = toneladas equivalente de petróleo.

(Marcos, 2000), los datos aportados con la bibliografía consultada y las consultas a los expertos que citaremos en los agradecimientos.

Siguiendo esta tendencia ambientalista, el Plan de Fomento de Energías Renovables de España (IDAE, 2000), aprobado en Consejo de Ministros el 30 de diciembre de 1999, hace especial hincapié en los llamados «cultivos leñosos», para producir energía. El cultivo del I-214 es uno de estos cultivos a tener en cuenta.

Hemos extrapolado, como hemos visto en los apartados anteriores, las hipótesis de cálculo de emisión (salvo la producción de energía eléctrica) y fijación de CO₂ en cultivos leñosos para producción de energía, a usos no energéticos de la madera.

Realizaremos los cálculos del CO₂ fijado por t de madera producida, supondremos que la madera de I-214 se transporta al lugar de elaboración. Las hipótesis de cálculo, justificación de las mismas y cálculos han sido divididas en dos fases:

Fase A: Cultivo del árbol y transporte a fábrica.

- Producción de **materia seca** por hectárea y año. En la hipótesis inicial supondremos 18 t, siguiendo publicaciones de San Miguel (1984) y estimaciones propias.
- Cantidad de C por t de materia seca: 500 kg (es decir, el 50%). Son datos medios utilizados por Marcos (2000), tras una vasta revisión bibliográfica. Jesús Rueda (1997) supone un porcentaje de carbono del 50% para *Populus tremula*. Habría que determinar con exactitud este valor, del que no disponemos datos, tal vez disponga de ellos el CEDER (Centro de Desarrollo de Energías Renovables, Lobia, Soria). Supondremos, por tanto, un 50%.
- Fijación de CO₂, por similitud con otras especies agroenergéticas (Jesús Fernández, 1998) supondremos que se fijan 1,25 g de C. Por g de C fijado en la madera., el 0,25 restante es el fijado en forma de mineralización, humus del suelo y raíces que forman parte del tocón. Por tanto, el tocón debe ser triturado e incorporado al suelo; pero en la plantación energética como se deja que recepe, esta labor se hará al cabo de 5 ó 6 turnos de aprovechamiento.

Como la molécula-gramo de CO₂ pesa 44 gramos frente a los 12 gramos que contiene de carbono el CO₂ fijado será:

$$18.000 \text{ kg} \times 0,5 \times (44/12) \times 1,25 = 41.250 \text{ kg} = \mathbf{41,250 \text{ t de CO}_2 = \text{FI}}$$

- Emisión de CO₂: En las etapas de plantación, mantenimiento, utilización de fungicidas, abonos, herbicidas, etc. Jesús Fernández emplea para el cardo (*Cynara cardunculus*) el valor total de 0,77 t de CO₂ por hectárea y año (es la suma de 0,25t en la maquinaria más 0,46t en las materias primas que incluyen semillas, abonos y plaguicidas más 0,06t en el transporte de biomasa a planta de aprovechamiento energético). Habría que recalcular las emisiones para el caso del I-214; nuestros cálculos en España y Chile han dado valores aproximados a las 0,77 t. El tema del riego lo consideraremos como un factor reductor al final de los cálculos, ya que es muy variable

con la zona en la que se realiza la plantación de I-214. Si se desea calcular aquí el dato de referencia es: Emisión de 76 g de CO₂ por cada MJ empleado en bombeo de agua.

Denominamos E1 a este valor: **E1 = 0,77 t de CO₂**.

En el esquema que a continuación se presenta, se muestra un diagrama de fórmulas de cálculo para la determinación de las emisiones de CO₂ en un cultivo energético de chopo a dos años. Se tienen en cuenta el gasto de obtención de la estaquilla, preparación del terreno, tratamientos culturales, riegos y por supuesto cosecha. También se incluye una leyenda donde se explican los coeficientes de cada una de las fórmulas.

Lo siguiente sería calcular el transporte y transformación energética de la biomasa en la producción de calor y/o electricidad en la central térmica correspondiente. Así como el cálculo de emisiones en la central térmica correspondiente no resulta difícil de calcular, el cálculo del transporte y transformación es más complicado dado que la distancia media va a variar, no pudiéndose determinar un contenido exacto o aproximado de la cantidad de emisiones de CO₂ emitidas a la atmósfera.

Fase B: Combustión y generación de energía eléctrica.

Siguiendo las citas de Gimeno (1989) los valores del poder calorífico superior del *Populus nigra* L. están comprendidos entre 4.449 kcal/kg (Fabricius y Gross) y 4.601 (Feher) kcal/kg, por lo que, teniendo en cuenta las impurezas, el valor de 4.200 kcal/kg para la biomasa de chopo nos parece aceptable. (4.200 kcal/kg = 17.556 kJ/kg).

El funcionamiento de la central térmica es de 6.750 horas/año = 24.300.000 s/año; según la publicación Energía 99, editada por el Foro de la Industria Nuclear Española y que recoge datos de la AIE (Agencia Internacional de la Energía).

Consideraremos el rendimiento energético, en términos de energía eléctrica; es decir, el cociente entre kWh eléctricos y el producto de la masa por el poder calorífico de referencia, de la central propuesta: 30% (debido a las buenas características combustibles de la madera de chopo). Las cenizas y partículas sólidas obtenidas en la combustión son recicladas en la propia parcela o taller donde se realizó la plantación, cerrando así el ciclo de nutrientes.

$$\begin{aligned} \text{La unidad de transformación: } 1 \text{ MJ eléctrico} &= \\ 1.000 \text{ kJ eléctricos} &= 1.000 \text{ kWh} = \\ &= 1.000 \text{ kWh} (1 \text{ hora} / 3600 \text{ s}) = 0,2777 \text{ kWh eléctricos} \end{aligned}$$

$$\text{Energía eléctrica obtenida: } 18.000 \text{ kg} \times 17.556 \text{ kJ/kg} \times 0,3 = 94.802,4 \text{ MJ} =$$

$$= 94.802,4 \times 0,2777 \text{ kWh eléctricos} = 26.326,626 \text{ kWh eléctricos}$$

Supondremos que un 3% de la energía disponible se emplea en el secado (se utiliza para secar el secado natural y un secadero contracorriente), por lo que la energía eléctrica realmente disponible es:

$$26.326,626 \times 0,97 = 25.536,827 \text{ kWh eléctricos}$$

$$\begin{aligned} \text{Potencia instalada: } 94.802,4 \times 0,97 \text{ MJ} / (6.750 \times 3.600 \text{ s}) \\ = 3,78 \text{ kW} \end{aligned}$$

CO₂ emitido en la combustión.

$$18.000 \text{ kg} \times 0,5 \times (44/12) = \mathbf{33,00 \text{ t de CO}_2 = \text{E2}}$$

Balance de CO₂ fijado, por hectárea:

$$\text{FI: } 18.000 \times 0,5 \times (44/12) \times 1,25 = 41.250 \text{ kg} = 41,25 \text{ t de CO}_2$$

$$\text{BA} = \text{FI} - \text{E1} - \text{E2} = (41,250 - 0,77 - 33,00) \text{ t} = 7,48 \text{ t} = 7.480 \text{ kg}$$

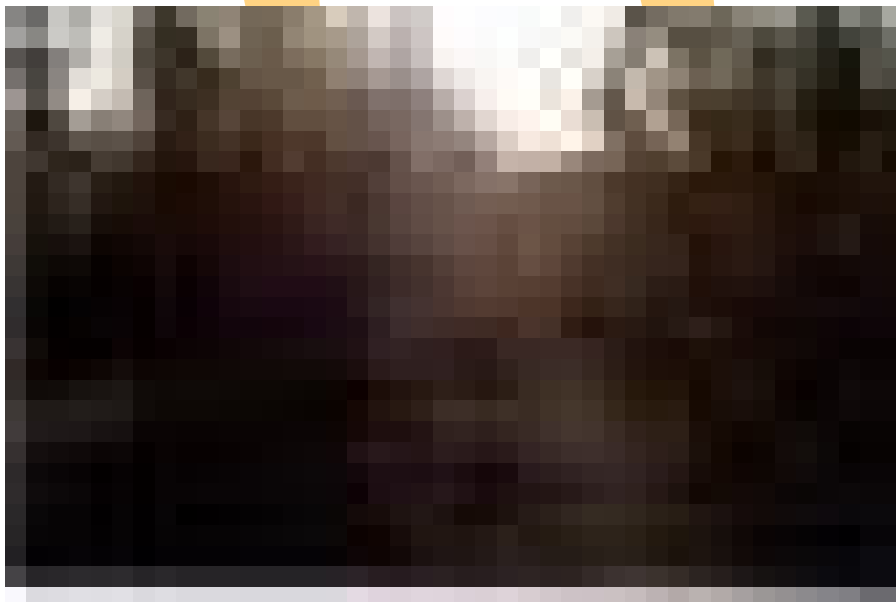
CONCLUSIONES

Como parecía obvio, una vez más, se comprueba que el uso más noble (desde el punto de vista de fijación de CO₂) de la madera es su uso como madera maciza y como madera para la carpintería – construcción. Pero también se comprueba que el resto de usos de la madera, en el análisis de su ciclo de vida fijan este gas.

Se debe hacer un análisis muy detallado en el que juegan muchos factores para determinar el contenido de CO₂ fijado cuando la madera es transformada y entran a jugar los kWh empleados en las operaciones de transformación. Cálculos a veces difíciles de realizar, pero posibles con los conocimientos actuales de la industria y de los centros de investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- Fernández-Golfín Seco, J.J., Illanes Muñoz, R., de Francisco García, A., Torres Escribano, J.L. (1994). Análisis de los consumos de energía eléctrica en aserraderos. Rev. Montes nº35. p.p. 27-32. Madrid.
- Fernández González J. (1998). La biomasa como energía alternativa para reducir el CO₂ atmosférico. Homenaje a D. Angel Ramos Fernández. Real Academia de Ciencias, Academia de Ingeniería. ETSI de Montes. Madrid.
- Foro de la Industria Nuclear Española. (1999). Energía 1999. Foro de la Industria Nuclear Española. Madrid.
- Gimeno Pérez C. (1989) Estudio de los poderes caloríficos de las especies forestales españolas del género Quercus en España. Tesis doctoral inédita, dirigida por Francisco Marcos Martín. Universidad de León. León. - Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Madrid.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (1997). Indicadores energéticos. Nº 7: Pasta de Papel y Cartón. IDAE. Madrid.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (2000). Plan de Fomento de las Energías Renovables en España. IDAE - Ministerio de Industria. Madrid.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2000). Impactos Ambientales de la Producción Eléctrica. Análisis de Ciclo de Vida de ocho tecnologías de generación eléctrica. IDAE. Madrid.
- Marcos Martín F, Ruiz Castellano J. e Izquierdo Osado I. (2000). Cultivos energéticos de chopos. Revista Forestal Española 26:4-14. Madrid.
- Peraza Oramas C. (1985). Industrialización de la madera.



Plantaciones de chopo



Madera cortada y embalada para su utilización



Producto obtenido de las plantaciones de chopo en Salamanca



Variables

- C_1 : l/h del combustible utilizado en obtención de estaca.
- K_{1CO_2} : factor que relaciona los kgCO₂ por litro de combustible.
- K_{2CO_2} : factor que relaciona los kgCO₂ por kg de fertilizante.
- T_1 : tiempo de funcionamiento(h).
- T_2 : tiempo de trabajo (h).
- S : superficie
- Y : producción (tm.s./ha.año).
- n : periodo de tiempo de realización de los trabajos (años).
- S_1 : superficie en ha, que planto con una carga de camión.
- S_2 : Superficie en ha, que trabajo con un camión.
- C_2 : Consumo del camión de transporte en l/km.
- d : distancia a recorrer en km.
- C_3 : consumo de la máquina de preparación del terreno en l/h.
- f : kg de fertilizante/ha.año.
- C_4 : consumo de la máquina de escarda (l/h).
- C_5 : consumo de la máquina de poda (l/h)
- C_6 : consumo de la máquina que aplica el insecticida (l/h)
- C_7 : consumo de la máquina de plantación (l/h).
- C_8 : consumo de la máquina de riego (l/h).
- C_9 : consumo de la máquina de cosecha (l/h).

Rev. El Campo nº 98: 54 – 62. Banco de Bilbao.

- Rueda J. (1997). La madera de chopo y sus aplicaciones. Junta de Castilla y León. Valladolid.
- San Miguel Ayanz A. y Montoya, J.M. (1984). Resultado de los primeros cinco años de producción de talleres de chopo en rotación corta (2-5 años) en Aranjuez. INIA
- Tecnoenergía (2000). Demanda y producción de energía. Tecnoenergía. 10: 11-13. Madrid.