

ESTUDIO DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE BIOMASA *Pinus caribaea* Morelet var. *Caribaea* (Pc) Y *Pinus tropicalis* Morelet (Pt); *Eucalyptus saligna* Smith (Es), *Eucalyptus citriodora* Hook (Ec) y *Eucalyptus pellita* F. Muell (Ep); DE LA PROVINCIA DE PINAR DEL RÍO

F. Márquez-Montesino¹; T. Cordero Alcántara²; J. Rodríguez-Mirasol³; J. J. Rodríguez-Jiménez⁴.

²⁻⁴Doctores en Ciencias Químicas, Profesores del Departamento de Ingeniería Química, E.T.S.I. Industriales, Universidad de Málaga, Campus de El Ejido s/n. 29071, Málaga, España.

¹Doctor en Ciencias Forestales, Departamento de Química, Universidad de Pinar del Río, calle Martí N° 270. Pinar del Río, C.P. 20100, Cuba. E-mail: fmarquez@af.upr.edu.cu Teléfono: 53-82-5452

RESUMEN

Los residuos forestales y de plantas agrícolas leñosas constituyen recursos potenciales con interesantes posibilidades de aprovechamiento tecnológico, entre los que cabe destacar el empleo de procesos termoquímicos, combustión, gasificación y pirólisis. La valoración energética de un determinado material debe considerar como elemento fundamental su poder calorífico. En el presente trabajo se presentan los resultados obtenidos sobre las posibilidades de aprovechamiento energético de diversos residuos forestales, abundantes en la provincia de Pinar del Río tales como *Pinus caribaea* Morelet var. *Caribaea* (Pc), y *Pinus tropicalis* Morelet (Pt); madera de eucaliptos, *Eucalyptus saligna* Smith (Es), *Eucalyptus citriodora* Hook (Ec) y *Eucalyptus pellita* F. Muell (Ep); carbonizados de aserrín preparados a escala de laboratorio, a una temperatura de 700 °C y 2 horas de carbonización y carbones vegetales preparados en horno de parva a partir de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea*, (Costanera), (PcC) y otras maderas de especies naturales tales como *Dicrostachys cinerea*, Wight & Arm., (Marabú), (Dc); *Conocarpus erecta* L., (Yana), (Ce); *Quercus oleoides* C. y S. var. *Sagreana* C.H. Mull, (Encina), (Qo) y *Guasuma tomentosa* HBK, (Guásima) (Gt).

Se ha establecido una ecuación que correlaciona el poder calorífico de diversos materiales biomásicos con sus contenidos en materia volátil y carbono fijo, a través de un análisis por regresión lineal múltiple. Esta ecuación ha resultado ser válida para residuos agroforestales húmedos, secos o carbonizados con distinto grado de carbonización, obteniéndose valores de poderes caloríficos del orden de 4.500 kcal·kg⁻¹ (20 kJ·g⁻¹) para las biomásas estudiadas y de hasta 8000 kcal·kg⁻¹ (33,5 kJ·g⁻¹) para los carbones vegetales obtenidos en el laboratorio. Por tanto, estos materiales presentan atractivas posibilidades de aprovechamiento energético como materia prima, dada la disponibilidad potencial de estos residuos en la provincia de Pinar del Río.

PALABRAS CLAVES: aprovechamiento, pirólisis, energía

STUDY OF ENERGETIC POTENTIAL OF BIOMASS OF TREE VARIETIES FROM THE PROVINCE OF PINAR DEL RÍO

SUMMARY

Forest and woody agricultural residues constitute potential resources with interesting possibilities for technological use, among which is highlighted their use in thermochemical processes, combustion, gasification, and pyrolysis. The appraisal of energy of a given material should be considered a basic element of its heat potential. In this paper, results are presented of a study of the possibilities of energetic use of diverse forest residues that are abundant in the province of Pinar del Río, such as *Pinus caribaea* Morelet var. *Caribaea* (Pc) and *Pinus tropicalis* Morelet (Pt), wood of eucalyptus: *Eucalyptus saligna* Smith (Es), *Eucalyptus citriodora* Hook (Ec) and *Eucalyptus pellita* F. Muell (Ep), carbonized sawdust prepared on a laboratory scale at a temperature of 700 °C for two hours and plant carbon from *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* (Costanera) (PcC) prepared in an oven, and other natural wood species such as *Dicrostachys cinerea* Wight & Arm. (Marabú) (Dc), *Conocarpus erecta* L. (Yana) (Ce), *Quercus oleoides* C. y S. var. *Sagreana* C.H. Mull (Encina) (Qo), and *Guasuma tomentosa* HBK (Guásima) (Gt).

KEY WORDS: Uses, pyrolysis, energy.

INTRODUCCIÓN

Un plan de energías renovables, que contemple el aprovechamiento de residuos forestales y de plantas agrícolas leñosas en procesos de pirólisis, gasificación o combustión directa, podría tener una doble vertiente: de una parte, el aprovechamiento energético de materiales que de otra manera estarían infrutilizados, y, por otra, desde el punto de vista ambiental, el aprovechamiento energético de estos residuos supondría la eliminación de grandes cantidades de biomasa residual, como aserrín de pino, tallo de tabaco, o cáscara de cítrico, entre otros. Además, puede contribuir a la reducción de los costos derivados de la limpieza de los bosques, así como a la generación de riqueza y un mayor autoabastecimiento energético.

El conocimiento de la composición, características físico-químicas y poderes caloríficos de estas biomásas residuales constituye un primer paso en el estudio de sus posibilidades de aprovechamiento energético. A tal efecto, en los laboratorios de investigación del Departamento de Química de la Universidad de Pinar del Río (Cuba) y del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Málaga (España), nos propusimos el objetivo de llevar a cabo, de forma conjunta, un estudio teórico-experimental de las características de diferentes biomásas residuales de Pinar del Río, para conocer sus posibilidades como fuente alternativa de energía renovable.

MARCO TEÓRICO

Los combustibles a base de madera representan aproximadamente el 7 % del suministro total de la energía mundial pero en los países en desarrollo, representa un promedio del 15 % (FAO, 1999; Hall, D.O. *et al*, 1992; Beck, S.R. *et al*, 1980). Una de las vías más interesantes de aprovechamiento de los residuos forestales y agrícolas leñosos es su valorización energética mediante el empleo de procesos termoquímicos, combustión, gasificación y pirólisis (Goldstein, L.S., 1981; Soltes, E.J., 1980; Demeyer, A., 1985; Rodríguez, J.J. *et al*, 1990). Las tres cuartas partes de la población mundial, o sea, aquella que vive en los países menos desarrollados, dependen fundamentalmente de la biomasa como recurso de energía primaria. Se estima que la bioenergía cubre el 35 % (Hall, D.O. *et al*, 1992) de las necesidades de estos países. En el ámbito regional de América Latina, la bioenergía ha ocupado siempre un lugar importante en el balance de producción y consumo energético, destacando el uso directo de la madera y del carbón vegetal.

En el contexto de la Unión Europea (UE), la biomasa y los residuos constituyen la segunda fuente de energía renovable en orden de importancia, detrás de la energía hidráulica. El aprovechamiento de los recursos biomásicos genera hoy día más de 25 millones de Tep/año (toneladas

equivalentes de petróleo al año), que supone un ahorro en las importaciones energéticas de más de 3000 millones de dólares al año, generando además gran cantidad de fuentes de trabajo, que se concentran, fundamentalmente, en áreas rurales, donde el aprovechamiento de los recursos energéticos locales supone una aportación importante para el desarrollo regional.

En el balance energético de Cuba, la presencia de la biomasa es relativamente baja, debido fundamentalmente a la existencia de una estructura de consumo de energía basada en los hidrocarburos (Oficina Cubana para la Cooperación Técnica en Dendroenergía, 1997). La provincia de Pinar del Río posee recursos forestales muy importantes, con una superficie "Patrimonio Forestal" por encima de las cuatrocientas mil hectáreas, de las que se encuentran cubiertas más del 80 % (Subdelegación Forestal Provincial, MINAGRI, Pinar del Río, 1998).

De ahí, que de los dos aspectos claves, de cara a la valorización energética de cualquier residuo, que son su disponibilidad y su poder calorífico, el primero está garantizado en nuestra región. La medida directa de los poderes caloríficos se realiza, comúnmente mediante calorímetros adiabáticos. Por otra parte, la estimación del poder calorífico de un combustible se puede realizar aplicando ecuaciones establecidas en la bibliografía y que expresan dicho parámetro en función de características físico-químicas del combustible. Así, por ejemplo se han presentado ecuaciones, como la de Dulong o las de Francis y Lloyd, que relacionan el poder calorífico de carbones minerales con su composición elemental (Francis, H.E. y Lloyd, W.G., 1983). Las propuestas por Shafizadeh y Degroot (Shafizadeh, F. Y Degroot, W.G., 1976) y Tillman (Tillman, D.A., 1978) lo relacionan con el contenido en celulosas, ligninas y extraíbles y la de Jiménez y González (Jiménez, L. y González, F. 1991) lo hace con el contenido total en volátiles más carbono fijo.

Para el estudio del aprovechamiento energético de los diferentes residuos de origen vegetal y forestal de la provincia de Pinar del Río, se ha establecido una ecuación, basada en resultados previos de nuestro grupo de investigación (Cordero, T. *et al*, 1989), que correlaciona el poder calorífico de diversos materiales biomásicos con sus contenidos en materia volátil y carbono fijo, a través de un análisis por regresión lineal múltiple. Esta ecuación se ha mostrado válida para residuos agroforestales húmedos, secos o carbonizados con distinto grado de carbonización. A partir de la misma se ha evaluado el potencial energético de las biomásas objeto de estudio en este trabajo y los valores de poderes caloríficos así obtenidos se compararán con los experimentales y con los derivados de la aplicación de alguna de las ecuaciones antes mencionadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materias Primas

Las materias primas utilizadas en este trabajo han sido aserrín de pinos de la provincia de Pinar del Río, *Pinus caribaea* Morelet var. *Caribaea* (Pc), y *Pinus tropicalis* Morelet (Pt); madera de eucaliptos, *Eucalyptus saligna* Smith (Es), *Eucalyptus citriodora* Hook (Ec) y *Eucalyptus pellita* F. Muell (Ep); carbones vegetales (carbonizados de serrín) preparados a escala de laboratorio, a una temperatura de 700 °C y 2 horas de carbonización y carbones vegetales preparados en horno de parva a partir de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea*, (Costanera), (PcC) y otras maderas de especies naturales tales como *Dicrostachys cinerea*, Wight & Arm., (Marabú), (Dc); *Conocarpus erecta* L., (Yana), (Ce); *Quercus oleoides* C. y S. var. *Sagreana* C.H. Mull, (Encina), (Qo) y *Guasuma tomentosa* HBK, (Guásima) (Gt).

Para obtener una buena homogeneización se molieron y tamizaron todas las muestras estudiadas, seleccionándose el intervalo de tamaño de partícula de 0.6 a 1.2 mm, que resultó ser el más abundante, en todos los casos.

Los carbonizados de aserrín se prepararon en una planta piloto, cuyo elemento central es un horno de tornillo sinfín, capaz de procesar hasta 50 kg de materia prima/día, dependiendo de la densidad del material y de su composición química. El horno se calienta mediante una resistencia eléctrica y la temperatura interior, en distintas zonas del reactor, está controlada mediante termopares. Mediante la velocidad de giro del tornillo se ajusta el tiempo de residencia del sólido en el horno.

Los carbones vegetales que se han incluido en el presente trabajo se han obtenido por el sistema tradicional, en horno de parva cubierto de tierra.

La ecuación para el cálculo de los poderes caloríficos se ha establecido a partir de los resultados obtenidos para madera de encino (*Quercus rotundifolia*) y de pino (*Pinus halepensis*) y algunos carbonizados de estas maderas, obtenidos a distintas temperaturas, a escala de laboratorio, con tiempos de carbonización de 2 h. Los poderes caloríficos, así como el análisis elemental e inmediato de estas muestras aparecen en la referencia 14.

MÉTODOS EXPERIMENTALES

Los poderes caloríficos se determinaron experimentalmente con un calorímetro adiabático de la marca Julius Peter.

El análisis elemental de las muestras se realizó en un aparato Perkin-Elmer 2400C, que permite determinar los porcentajes de Carbono, Hidrógeno y Nitrógeno; el

porcentaje de Oxígeno se obtiene por diferencia del total de muestra seca, sin considerar las cenizas.

El análisis inmediato (contenido en volátiles, humedad y cenizas) de las muestras se determinó según las normas ASTM (Annual book of ASTM, 1993); el carbono fijo, en base seca, de cada muestra se calcula por diferencia entre 100 y la suma de volátiles más cenizas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ecuación para el cálculo de los poderes caloríficos en función del análisis inmediato

Para establecer una ecuación que relacione el poder calorífico de materiales biomásicos o sus carbonizados con los contenidos respectivos en materia volátil y carbono fijo se han utilizado los datos que se presentan en el Cuadro 1 y que han sido ya, en parte, publicados por nuestro grupo (Cordero, T. *et al*, 1989). Como se menciona en el apartado experimental del presente trabajo, se trata de madera de *Quercus rotundifolia* (Qr) y de pino (*Pinus halepensis*) (Ph), así como carbonizados de éstas, a distintas temperaturas. En dicho cuadro se muestran los resultados correspondientes al análisis inmediato (volátiles, cenizas y carbono fijo), en base seca, así como el poder calorífico de cada muestra, determinado experimentalmente.

El grado de carbonización aumenta con la temperatura de trabajo, obteniéndose un sólido con más alto contenido en carbono fijo, menor en volátiles y mayor poder calorífico. Por regresión lineal múltiple de los datos del Cuadro 1 (poder calorífico experimental frente a contenido en volátiles y contenido en carbono fijo) se obtiene la siguiente ecuación (NE):

$$HV = 0.3563 Cf + 0.1755 Mv \quad [1]$$

donde HV representa el poder calorífico en $\text{kJ} \times \text{g}^{-1}$; Cf es el porcentaje en carbono fijo y Mv es el de materia volátil para cada material estudiado, expresados ambos sobre base seca, observándose la validez de la regresión por el valor de $R^2=0.999$, además el elevado porcentaje en que la regresión es válida así como la significación de 0,000 en la importancia de los coeficientes. Al establecer una comparación entre las diferencias de los valores calculados y los experimentales de la ecuación F-LI con los de la nueva ecuación se obtuvieron los resultados que a continuación se muestran:

Descriptivos de la desviación de cada ecuación respecto a los datos experimentales

	N	Mínimo	Máximo	Desv.Típ.	Varianza
NE	20	-80	1.30	0.4919	0.242
F-LI	20	-1.10	1.80	0.6126	0.375

Por correlación lineal entre los valores calóricos calculados por ambas ecuaciones, se demuestra que no hay diferencias estadísticas entre los resultados. El valor de correlación para estos dos juegos de datos fue de $r=0.986^{***}$, mientras el valor de t es ($t=0,489$ n.s.).

Los valores de los poderes caloríficos calculados mediante la ecuación anterior se muestran también en el Cuadro 1. La comparación de estos valores con los obtenidos experimentalmente puede realizarse representando gráficamente el valor del poder calorífico calculado frente al experimental. De dicha representación se obtiene una recta, de pendiente 0.9987, igual análisis hecho para los resultados obtenidos con la ecuación de F-LI se obtuvo una recta de pendiente 0.993. A la vista de estos resultados, así como de los valores de los poderes caloríficos que se presentan en el Cuadro 1 puede concluirse que la ecuación propuesta reproduce francamente bien los valores de los poderes caloríficos experimentales para la biomasa y sus carbonizados a distintas temperaturas.

CUADRO 1. Análisis inmediato^x y poder calorífico superior experimental y calculado, por la ecuación 1, de las maderas de *Quercus rotundifolia* (Qr) y *Pinus halepensis* (Ph) y sus carbonizados, a distintas temperaturas.

Muestra ^y	Volátiles (%)	Cenizas (%)	Carbono Fijo (%)	Poder Calorífico (kJ·g ⁻¹) Exp.	Calc.
Encina (Qr)	83.6	2.3	14.1	19.7	19.7
Qr-200	83.9	2.4	13.7	19.7	19.6
Qr-250	81.8	2.7	15.5	19.6	19.9
Qr-300	65.1	1.5	33.4	23.1	23.3
Qr-350	43.4	1.3	55.3	27.9	27.3
Qr-400	34.5	1.3	64.2	28.8	28.9
Qr-450	21.8	1.8	76.4	30.6	31.0
Qr-500	17.5	2.8	79.7	30.2	31.5
Qr-550	14.7	3.1	82.2	32.7	31.9
Qr-600	13.2	3.2	83.6	32.6	32.1
Pino (Ph)	82.5	0.5	17.0	20.2	20.5
Ph-200	83.1	0.5	16.4	20.1	20.4
Ph-250	82.7	0.5	17.9	20.5	20.9
Ph-300	68.1	0.6	31.3	22.8	23.1
Ph-350	49.5	1.1	49.4	26.7	26.3
Ph-400	36.5	1.3	62.2	28.2	28.6
Ph-450	27.4	1.5	71.1	29.6	30.1
Ph-500	20.2	1.7	78.1	30.7	31.4
Ph-550	18.1	1.7	80.2	31.5	31.8
Ph-600	13.4	1.7	84.9	31.9	32.6

^x% sobre base seca

^yEl número que aparece en la nomenclatura de las muestras indica la temperatura de preparación de las mismas.

En lo que sigue, se va a evaluar el potencial energético a partir de diferentes maderas de la provincia de Pinar del Río, empleando la ecuación antes deducida y la de Francis y Lloyd (Francis, H.E. y Lloyd, W.G., 1983) que, como se ha mencionado anteriormente, ha sido contrastada para el cálculo de poderes caloríficos en este tipo de materiales (Subdelegación Forestal Provincial, MINAGRI, Pinar del Río, 1998; Cordero, T. *et al*, 1989). La comparación entre los resultados obtenidos por ambas ecuaciones proporciona otra oportunidad de contraste de la propuesta en el presente trabajo.

La ecuación de Francis y Lloyd viene dada por:

$$HV=0.3578 C+1.1356 H+0.0594 N-0.0845 O-0.974 \quad [2]$$

donde HV representa el poder calorífico en kJ×g y C, H, N y O son los porcentajes respectivos de cada elemento, obtenidos por análisis elemental. En el Cuadro 2 se presentan los resultados relativos a dicho análisis elemental de las muestras biomásicas Qr y Ph y de sus carbonizados, así como los valores de los poderes caloríficos de cada una, calculados mediante la ecuación de Francis y Lloyd. A efectos de comparación se han incluido los valores de poderes caloríficos experimentales recogidos en el Cuadro 1.

CUADRO 2. Análisis elemental^x y poder calorífico superior experimental y calculado, de las maderas de *Quercus rotundifolia* (Qr) y *Pinus halepensis* (Ph) y sus carbonizados a distintas temperaturas.

Muestra ^y	C (%)	H (%)	N (%)	O(%)#	Cenizas (%)	Poder Calorífico (kJ/g) Exp.	Calc. ^z
Encina (Qr)	50.30	6.10	0.20	41.10	2.30	19.7	21.5
Qr-200	48.88	5.84	0.24	42.70	2.34	19.7	19.6
Qr-250	50.64	5.04	0.25	41.31	2.76	19.6	19.4
Qr-300	58.75	4.96	0.28	34.51	1.50	23.1	22.8
Qr-350	75.69	3.31	0.62	19.10	1.28	27.9	28.3
Qr-400	76.89	3.27	0.40	18.15	1.29	28.8	28.7
Qr-450	81.18	2.98	0.41	13.65	1.78	30.6	30.3
Qr-500	82.96	2.52	0.60	11.15	2.77	30.2	30.7
Qr-550	87.11	2.42	0.50	6.89	3.08	32.7	32.4
Qr-600	89.39	2.19	0.43	4.79	3.20	32.6	33.1
Pino (Ph)	48.90	6.00	0.10	44.50	0.50	20.2	20.6
Ph-200	48.75	5.72	0.13	44.91	0.49	20.1	19.6
Ph-250	49.57	5.64	0.17	44.13	0.49	20.5	19.4
Ph-300	57.76	4.98	0.17	36.47	0.62	22.8	22.3
Ph-350	72.08	4.09	0.19	22.49	1.15	26.7	27.6
Ph-400	74.69	3.60	0.15	20.26	1.30	28.2	28.1
Ph-450	78.26	3.25	0.19	16.85	1.45	29.6	29.3
Ph-500	81.85	2.97	0.15	13.36	1.67	30.7	30.6
Ph-550	86.13	2.52	0.16	9.55	1.67	31.5	31.9
Ph-600	87.36	2.18	0.26	8.49	1.71	31.9	32.0

^x% sobre base seca

^yEl número que aparece en la nomenclatura de las muestras indica la temperatura de preparación de la misma. # El Oxígeno se ha calculado por diferencia.

^zCalculado a partir de la ecuación de F-LI.

Evaluación energética de los residuos objeto de estudio

El Cuadro 3 muestra los resultados del análisis inmediato y elemental, en base seca, de la biomasa estudiada. Los valores presentados son muy similares a los que se muestran en los cuadros 1 y 2 para las biomásas de referencia Qr y Ph. Se destaca una ligera diferencia en el análisis elemental del *Eucalyptus citriodora* Hook con respecto a las otras biomásas tabuladas, diferencia que no resulta relevante en el intervalo de temperatura de la máxima descomposición de las mismas. Como puede observarse, la materia de partida tiene un bajo contenido en cenizas, dato importante a tener en cuenta de cara a su utilización, tanto como fuente de energía directa como en la obtención de carbón vegetal, ya que un alto contenido en materia inorgánica disminuye el poder calorífico (Raveendran, K. y Ganesh, A., 1996), además de limitar sus posibles aplicaciones como materia prima para otros procesos, por ejemplo, metalúrgicos o en la preparación de carbones activos (Rodríguez, *et al*, 1990).

CUADRO 3. Análisis elemental e inmediato^x, de las biomásas de origen natural estudiadas.

	Pc	Pt	Ep	Es	Ec
A.inmediato					
%Volátiles	83.91	83.88	83.62	82.00	85.70
%Cenizas	0.40	0.34	0.20	0.06	0.38
%Carbono fijo	15.69	15.78	16.18	17.94	13.92
A.elemental					
%C	46.75	49.00	48.00	47.29	46.90
%H	6.53	6.01	6.20	6.05	6.43
%N	0.14	0.10	0.12	0.11	0.10
%O ^y	46.18	44.55	45.48	46.54	46.57

^x % sobre base seca

^y El oxígeno se ha calculado por diferencia, descontando las cenizas.

Si se comparan los porcentajes de carbono fijo y carbono elemental, se observa una marcada diferencia, que es indicativa de un material, como es la biomasa, sin ningún grado de carbonización ni estructura estable condensada (Cordero, *et al*, 1989).

Los poderes caloríficos calculados para estas biomásas por las dos ecuaciones que se han planteado anteriormente se muestran en el Cuadro 4, junto con los valores experimentales, observándose, de nuevo, la buena concordancia existente. Los valores obtenidos para las biomásas estudiadas están dentro del intervalo de poderes caloríficos que se presentan en la bibliografía para los materiales biomásicos (Jiménez y González, 1991; Cordero, *et al*, 1989; Raveendran y Ganesh, 1996). En dicho cuadro se indican también los errores relativos con respecto a cada valor experimental.

CUADRO 4. Valores de los poderes caloríficos calculados y experimentales, de los residuos forestales estudiados en este trabajo.

BIOMASA	Poder Calorífico (kJ.g)		
	Experimental	Calc. F-LI	Cal. N.E.
Pc	19.95	20.12 (0.85)	20.31 (1.8)
Pt	21.80	20.47 (6.1)	20.34 (6.6)
Ep	20.41	20.25 (0.78)	20.44 (0.15)
Es	20.08	19.74 (1.7)	20.78 (3.5)
Ec	19.35	20.02 (3.5)	20.00 (3.4)

Entre paréntesis se representa el error relativo, en cada caso, con respecto al valor experimental. F-LI significa que el poder calorífico se ha calculado de acuerdo con la ecuación de Francis y Lloyd, mientras que N.E indica que el cálculo se ha realizado con la ecuación propuesta en este trabajo.

Carbonización a escala de laboratorio

La carbonización a escala de laboratorio se ha estudiado para las especies forestales más abundantes en la provincia de Pinar del Río, *Pinus caribaea* Morelet *var. Caribaea* (Pc) y *Pinus tropicalis* Morelet (Pt) y el *Eucalyptus saligna* Smith (Es) Los carbonizados se han preparado a la temperatura de 700 °C, con tiempo de carbonización de 2 h, lográndose así un producto sólido lo suficientemente pirolisado como para poder ser usado como combustible directo, reductor o materia prima para obtener carbones activos. El rendimiento de carbonización para el aserrín de Pc y Pt se sitúa en el 23 %, mientras que para el Es fue de un 21 %. Los carbonizados así obtenidos se denominaron C700Pc, C700Pt y C700Es, donde el número representa la temperatura de carbonización. En el Cuadro 5 se muestran los análisis inmediato y elemental de los carbonizados a escala de laboratorio, observándose que presentan un bajo contenido en cenizas lo que permite adelantar interesantes posibilidades de aplicación de estos carbones, desde el punto de vista energético y como materia prima.

CUADRO 5. Análisis inmediato y elemental^x, de los carbonizados de Pc, Pt y Es obtenidos a escala de laboratorio

Carbonizado	C700Pc	C700Pt	C700Es
Análisis inmediato (%)			
Volátiles	5.46	6.95	6.55
Cenizas	1.96	1.93	1.90
Carbono fijo	91.85	91.12	91.55
Análisis elemental (%)			
C	93.07	93.61	92.74
H	1.06	1.40	1.65
N	0.35	0.45	0.40
O ^y	3.56	2.61	3.31

^x% sobre base seca

^yEl Oxígeno se calcula por diferencia descontadas las cenizas.

También se observa que, las tres especies presentan resultados muy similares, tanto en su análisis inmediato como elemental. El contenido en carbono elemental, que en la biomasa no supera en la mayoría de los casos el 50 %, aumenta ahora hasta valores superiores al 90 %, dando muestra de la existencia de una estructura carbonosa condensada. Si se comparan los resultados presentados en el cuadro 5 con los recogidos en los cuadros 1 y 2, correspondientes a los análisis inmediato y elemental de las especies Qr y Ph y sus carbonizados a distintas temperaturas, hasta 600° C, puede observarse una buena concordancia, siguiendo la tendencia de a mayor temperatura de carbonización mayor contenido en carbono fijo y carbono elemental y menor diferencia entre los valores de estos dos últimos. Esta concordancia se observa también en los valores de los poderes caloríficos que se presentan en el Cuadro 6, que corresponden a los experimentales y los calculados a partir de la ecuación de Francis y Lloyd y la propuesta en el presente trabajo.

De los resultados recogidos en los cuadros 5 y 6 puede concluirse que los carbones obtenidos a escala de laboratorio presentan unas excelentes características para su empleo como combustibles o materia prima, dado su bajo contenido en cenizas y su alto poder calorífico (casi 8.000 kcal/kg, sensiblemente por encima de muchos carbones minerales que actualmente se queman en centrales térmicas de todo el mundo).

CUADRO 6. Valores de los poderes caloríficos calculados y experimentales, de los carbonizados obtenidos a escala de laboratorio

Muestra	Poder Calorífico (kJ-g)		
	Experimental	Calculado F-LI	Calculado N.E.
C700Pc	31.2	33.25 (6.6)	33.59 (7.7)
C700Pt	32.7	33.92 (2.1)	33.69 (3.0)
C700Es	32.2	33.83 (5.1)	33.77 (4.9)

Entre paréntesis se representa el error relativo, en cada caso, con respecto al valor experimental. F-LI significa que el poder calorífico se ha calculado de acuerdo con la ecuación de Francis y Lloyd, mientras que N.E indica que el cálculo se ha realizado con la ecuación propuesta en este trabajo.

Carbonización en horno de parva tradicional

A efectos comparativos se van a presentar en esta sección los resultados obtenidos con muestras de cinco carbones vegetales obtenidos de maderas silvestres de la provincia de Pinar del Río en hornos de parva. En estas muestras, dado el método de preparación, resultó poco

representativo el análisis elemental, ya que presentan un alto contenido en cenizas, mayoritariamente tierra, que pueden influir mucho sobre los resultados de los análisis debido a las pequeñas cantidades de muestra que se utilizan en los mismos. En el Cuadro 7 se muestran los resultados del análisis inmediato y los valores de poderes caloríficos, calculados por la nueva ecuación (N.E.), obtenidos para estos carbones vegetales.

CUADRO 7. Análisis inmediato y poderes caloríficos de los carbones vegetales obtenidos en horno tradicional.

Muestra	Análisis inmediato ²			Poder calorífico (kJ/g)	
	Volátiles	Cenizas	Carbono fijo	Experimental	Calculado N.E.
Ce ^x	24.54	13.07	62.39	27.10	26.53 (2.1)
Dc ^x	23.06	8.3	68.64	27.98	28.50 (1.9)
PcC ^y	20.36	2.93	76.71	29.41	30.90 (5.1)
Qo ^y	17.44	5.77	76.79	31.18	30.42 (2.4)
Gt ^y	16.13	10.48	73.39	30.21	28.98 (4.1)

¹Carbones obtenidos a partir de madera verde. ²carbones obtenidos a partir de maderas con dos meses de cortada. Entre paréntesis se representa el error relativo, en cada caso, con respecto al valor experimental. N.E indica que el cálculo se ha realizado con la ecuación propuesta en este trabajo, ²% sobre base seca.

A la vista de los resultados que se muestran en el Cuadro 7 puede concluirse que estos carbones vegetales no se han tratado a temperaturas suficientemente altas, dado el alto contenido en volátiles que presentan, lo que, junto con el elevado contenido en cenizas hace que estos carbones se aparten de los parámetros de calidad que se establecen en las normas internacionales para su uso como combustibles de calidad. Así por ejemplo las normas de calidad AFNOR en cuanto a los carbones vegetales para uso como combustibles, señalan un 82 % de carbono fijo y en torno al 15 % de volátiles, para la categoría superior, valores de sobra obtenidos para los carbones vegetales obtenidos a escala de laboratorio. Esto significa que en la producción de campo debiera usarse una tecnología que permitiera por una parte trabajar a temperaturas mas altas y homogéneas en todo el horno y por otra parte obtener carbones menos contaminados por tierra.

CONCLUSIONES

1. La información requerida para la valoración energética de residuos biomásicos puede obtenerse mediante la aplicación de una ecuación sencilla, que permite calcular el poder calórico a partir del análisis inmediato.
2. Dicha ecuación se ha mostrado válida no sólo para materiales biomásicos, sino que puede aplicarse también con garantías a carbones vegetales.
3. La Provincia de Pinar del Río cuenta con un elevado potencial energético a partir de residuos forestales.

RECOMENDACIONES

1. El aprovechamiento energético de los residuos forestales procedentes de las tareas de poda y limpieza de bosques así como del aserrín procedente de los aserraderos industriales, puede constituir una importante fuente energética y contribuir muy positivamente al desarrollo sostenible de Pinar del Río, al tiempo que evita problemas ambientales que pueden derivarse de la acumulación de grandes cantidades de residuos, que aumentan el riesgo de plagas e incendios.
2. La preparación de carbones vegetales a partir de residuos forestales puede constituir una actividad rentable si se obtiene un producto de calidad, con bajo contenido en cenizas y volátiles, ya que dicho producto se podría utilizar, además de como combustible, como materia prima o reductor.
3. La calidad del carbón vegetal es mayor si se trabaja en hornos que superen las limitaciones de las técnicas tradicionales de campo (por ejemplo hornos metálicos, hornos de colmena etc., discontinuos u hornos industriales continuos como los Lambiotte, Pillard, Lurgy etc.) y se opera a temperaturas suficientemente altas, 550- 600 °C
4. La rentabilidad del proceso de carbonización puede verse incrementada en la medida en que se aprovechen los volátiles de la biomasa inicial. Estos volátiles, una vez condensados, pueden constituir una fuente interesante de productos químicos y/o energía. La recuperación de condensables no resulta posible en las operaciones de campo realizadas por la vía tradicional de horno de parva (o tierra), lo que aconseja el empleo de sistemas capaces de superar las limitaciones de esta forma de trabajo y, cuya concepción y construcción, resulta, por otra parte, sencilla y asequible en muchos casos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Internacional de Andalucía el soporte económico para la realización del proyecto, incluyendo la estancia de F. Márquez en España.

LITERATURA CITADA

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS 1993, vol. 15.01.
- BECK, S. R.; HALLIGAN, J. E. 1980. "Thermochemical conversion of agricultural residues" Capítulo 5 en "Utilization and recycle of agricultural wastes and residues". Shuler, M.L. (Ed.) CRC Press, Boca Raton, Fla.
- CORDERO, T.; GARCÍA HERRUZO, F.; GÓMEZ LAHOZ, C.; RODRÍGUEZ 1989, J.J.; An. Qui. 85(3), 445.
- DEMEYER, A. 1985, "La conversión bioenergética de la radiación solar y las biotecnologías", Alhambra. Madrid.
- FAO (1999), Editorial Dirección de Información de la FAO. " Situación y perspectivas de la conservación y desarrollo de los bosques", Situación de los bosques en el mundo, p. 37.
- FRANCIS, H. E.; LLOYD, W. G. 1983., J. Coal Qual., 2(2), 21.
- GOLDSTEIN, L. S. 1981., For. Prod. J. 31(10), 63.
- HALL, D. O.; ROSILLO CALLE, F.; GROOT, P. DE. 1992. "Lessons from case studies in developing countries", Energy Policy, p. 62. enero.
- JIMÉNEZ, L.; GONZÁLEZ, F. 1991. Fuel, 70(8), 947.
- RAVEENDRAN, K.; GANESH, A. 1996, Fuel, 75(15), 1715.
- RODRÍGUEZ, J. J.; GARCÍA HERRUZO, F.; CORDERO, T. 1990. Ingeniería Química, 254(22), 191.
- SHAFIZADEH, F.; DEGROOT, W. G. 1976. "Thermal uses and properties of carbohydrates and lignins", Academic Press, New York.
- SOLTES, E. J. 1980. Tappi, 63(7), 75.
- SUBDELEGACIÓN FORESTAL PROVINCIAL, MINAGRI, 1998, Pinar del Río, Cuba.
- TILLMAN, D. A. 1978. "Wood as a energy resource", Academic Press. New York