

ACCIONES DE EXTENSIÓN UNIVERSITARIA. OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES POR PIRÓLISIS DE BIOMASA.

Melisa Bertero

Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica (INCAPE) (FIQ, UNL – CONICET)

Santiago del Estero 2654, (3000) Santa Fe, Argentina

Tel. 0342-4528062, Fax. 0342-4531068, e-mail: mbertero@fiq.unl.edu.ar

RESUMEN: El procesamiento de biomasa para la producción de biocombustibles de transporte representa una alternativa sostenible para la consolidación de fuentes energéticas alternativas, con creciente interés en el mundo. En particular, la producción de bio-oil por pirólisis de residuos lignocelulósicos es una opción atractiva, debido al reducido costo de las materias primas y a que no compete con la producción de alimentos. En este trabajo se presentan algunas actividades de producción y caracterización de bio-oil, planificadas para que alumnos de la modalidad de educación secundaria existente al momento (polimodal) realicen experiencias sencillas con materiales de bajo costo, aprendan a utilizar instrumentos básicos de medición para la toma de datos e interpreten de manera crítica los resultados obtenidos, los cuales se pueden comparar con los obtenidos con equipos convencionales de pirólisis y técnicas sofisticadas de análisis de la composición de los bio-oils. Es de destacar el alto grado de participación de los alumnos en las actividades desarrolladas. El aserrín de pino resultó el más conveniente para la producción de combustibles líquidos, debido al mayor rendimiento en la pirólisis y a las propiedades fisicoquímicas del bio-oil obtenido, especialmente el mayor poder calorífico superior y la relación H/C.

Palabras clave: pirólisis, bio-oil, educación secundaria

INTRODUCCIÓN

La biomasa es una fuente de energía renovable con creciente potencial en el mercado energético mundial. Entre las ventajas de su uso en reemplazo de fuentes fósiles puede citarse la disminución de las emisiones al ambiente de gases responsables del efecto invernadero y otros contaminantes. En relación al dióxido de carbono, el balance es esencialmente nulo, dada la reabsorción durante el desarrollo de la biomasa.

Los desechos de biomasa lignocelulósica originados por las actividades forestal, industrial y agrícola representan una fuente sostenible de materias primas, a partir de la cual pueden obtenerse combustibles líquidos, sólidos y gaseosos, por ejemplo, por gasificación, liquefacción o pirólisis. El producto líquido de la pirólisis de biomasa (denominado bio-oil), tiene potencial como combustible para motores diesel (Chiaramonti et al., 2003 a y b; Ikura et al., 2003), turbinas de gas y calderas (Czernik y Bridgwater, 2004), y para la producción de hidrocarburos, principalmente en el rango de la gasolina, por transformación catalítica (Gayubo et al., 2005; Adjaye y Bakhshi 1995) o hidrot ratamiento (Elliott, 2007). Dos parámetros importantes en la caracterización de combustibles son el Poder Calorífico Superior, que es la cantidad de energía que entrega por unidad de masa al oxidarse en forma completa, y la relación molar H/C, que permite estimar la emisión de CO₂ por unidad de energía que se producirá durante la combustión.

La pirólisis de biomasa es la degradación térmica de la misma en ausencia de oxígeno o con cantidades limitadas de este elemento y temperaturas superiores a 400 °C. Los bio-oils son líquidos que fluyen libremente, de color marrón oscuro y con un olor distintivo “a humo”, con composición muy diferente a la de los derivados del petróleo. Son mezclas complejas de especies derivadas de la fragmentación de los tres componentes principales de la biomasa: celulosa, hemicelulosa y lignina, con alto contenido de oxígeno (entre 30 y 40 %), pH ácido, densidades entre 1 y 1.2 g/cm³ y contenidos de agua de entre 15 y 50 % (Czernik y Bridgwater, 2004; García-Pérez et al., 2007).

La educación ambiental que se brinda en las escuelas secundarias promueve la toma de conciencia sobre la búsqueda de un desarrollo sostenible enfocado en la protección del ambiente, y crea capacidades para analizar críticamente el entorno social y natural, y participar en la búsqueda de opciones para enfrentar los problemas. Las energías renovables son parte de los contenidos curriculares. En este sentido, la posibilidad de que los alumnos experimenten e investiguen sobre la producción de combustibles alternativos de transporte representa una opción interesante. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto “Producción y caracterización de bio-oils”, dirigido a los alumnos del tercer año del polimodal de la Escuela de Enseñanza Media N° 329 Brigadier Gral. Estanislao López de la ciudad de Frontera (provincia de Santa Fe).

Se pretendió despertar en los alumnos el interés por opciones innovadoras para el aprovechamiento de los residuos de biomasa, lograr que interpreten de manera crítica los resultados obtenidos experimentalmente en el laboratorio y puedan generar conclusiones a partir de ellos. Además, con la colaboración de las docentes de ciencias naturales, se los orientó para que adquieran competencias para redactar informes y presentar los resultados de la investigación de manera ordenada.

ACTIVIDADES Y METODOLOGÍA

Se planteó el desarrollo del proyecto para que los alumnos identifiquen y apliquen los pasos del método científico a su investigación. Las actividades, para las cuales se organizaron cuatro equipos de trabajo, comprendieron revisión bibliográfica

y realización de experimentos de producción y caracterización de bio-oils. El análisis bibliográfico, desarrollado en base a guías prácticas orientativas, incluyó la utilización de la biomasa como fuente energética renovable y la factibilidad de empleo de distintas materias primas para la obtención de bio-oil a nivel regional y nacional. En este aspecto, se analizaron la disponibilidad y el aprovechamiento actual de biomasa de cuatro distintos orígenes. El trabajo experimental, que se llevó a cabo en los laboratorios de la UTN Facultad Regional San Francisco, comprendió cinco trabajos prácticos de 3 hs en los que se abordaron los siguientes aspectos: producción de bio-oil por pirólisis de distintas biomásas, caracterización química de los bio-oils obtenidos por cromatografía en capa delgada y fraccionamiento con solventes, y determinación de la densidad y del pH. Las experiencias de laboratorio fueron sencillas; los alumnos las desarrollaron utilizando materiales de bajo costo y realizaron mediciones con instrumentos básicos.

Al finalizar cada trabajo práctico resolvieron distintas cuestiones en función de los resultados obtenidos. Así, por ejemplo, plantearon los balances de masas para las pirólisis y determinaron los rendimientos de cada uno de los productos, analizaron los parámetros que influyen sobre la cantidad y calidad del bio-oil, estudiaron la estabilidad de las fracciones soluble e insoluble en agua de los distintos bio-oils, calcularon el Poder Calorífico Superior y la relación molar H/C, que son parámetros relevantes en la caracterización de combustibles. El proyecto se desarrolló en ocho encuentros de 3 hs de duración cada uno (incluyendo los cinco TPs), y los alumnos realizaron tareas complementarias con las docentes colaboradoras.

EXPERIMENTAL

Materias primas

Se seleccionaron como materias primas para la producción de bio-oils a cuatro tipos de materiales lignocelulósicos: aserrín de pino (*Pinus elliottii*) y de algarrobo (*Prosopis juliflora*), cáscara de trigo (*Triticum vulgare*) y una mezcla de hierbas aromáticas. Los materiales fueron provistos por dos industrias madereras, un molino harinero y una industria de elaboración de bebidas, respectivamente.

El análisis de la disponibilidad de estas biomásas en Argentina, mostró que el aserrín de maderas es uno de los principales desechos de la industria maderera. Este sector industrial genera anualmente en Argentina alrededor de 1.4 millones de toneladas de residuos que generalmente son incinerados cerca de las plantaciones y/o aserraderos (Maslatón, 2007). La cáscara de trigo, un subproducto de la molienda del trigo cuyo valor comercial es bajo, se utiliza principalmente como alimento forrajero. La producción de cáscara de trigo, que representa aproximadamente el 14.5 % del grano entero, se estimó en aproximadamente 0.8 millones de toneladas (SAGPyA, 2009). La mezcla de hierbas aromáticas es el residuo de un proceso de elaboración de bebidas analcohólicas, que actualmente es depositado en el relleno sanitario de la ciudad de Santa Fe.

Pirólisis de biomásas

Los bio-oils se obtuvieron por la pirólisis en lecho fijo de materia prima utilizando un reactor de vidrio de 1.5 cm de diámetro y 12 cm de longitud calentado por combustión de gas natural. En cada experimento, que se desarrolló en alrededor de 10 min, se cargaron entre 3 y 5 g de biomasa, y se alcanzó una temperatura superior a 350 °C. Los efluentes del reactor pasaron por un condensador inmerso en un baño de hielo-agua donde se retuvieron los líquidos, y los gases fueron venteados a la atmósfera. El reactor y el recipiente colector de líquidos se pesaron antes y después de cada experiencia para determinar las cantidades de char (residuo sólido) y bio-oil obtenidas, respectivamente. La cantidad de gases fue determinada por diferencia. Un esquema del equipo de pirólisis se presenta en la Figura 1.

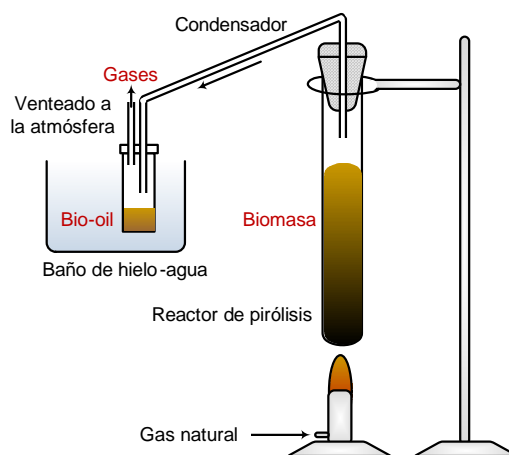


Figura 1. Esquema del equipo de pirólisis utilizado para la producción de bio-oil

Caracterización del bio-oil

Los bio-oils se sometieron a cromatografía en capa delgada. Todos los cromatogramas se desarrollaron durante 8 min sobre una placa porosa de sílice comercial utilizando eluyentes con distinta polaridad: pentano, éter etílico, tolueno, metanol y mezcla de ácido acético/cloroformo (9:1 v/v). El R_F (Factor de Retención), que expresa la posición de un compuesto (o grupo de compuestos) en un cromatograma se definió como:

$$R_F = \frac{\text{Distancia recorrida desde el origen por el compuesto}}{\text{Distancia recorrida desde el origen por el solvente}} = \frac{X}{Y} \quad (1)$$

Los bio-oils también fueron fraccionados mediante un tratamiento con agua y éter (Sipilä et al., 1998). Un volumen de bio-oil fue mezclado con diez volúmenes de agua agregados gota a gota bajo agitación constante, y posterior filtrado para separar una fracción de aspecto alquitranoso, insoluble en agua (IA). La fracción soluble en agua (SA) fue mezclada con igual volumen de éter etílico y agitada vigorosamente; luego de 5 minutos de decantación, se separaron las fracciones soluble (SE) e insoluble (IE) en éter. En la Figura 2 se presenta un esquema del proceso de fraccionamiento y análisis de los bio-oils.

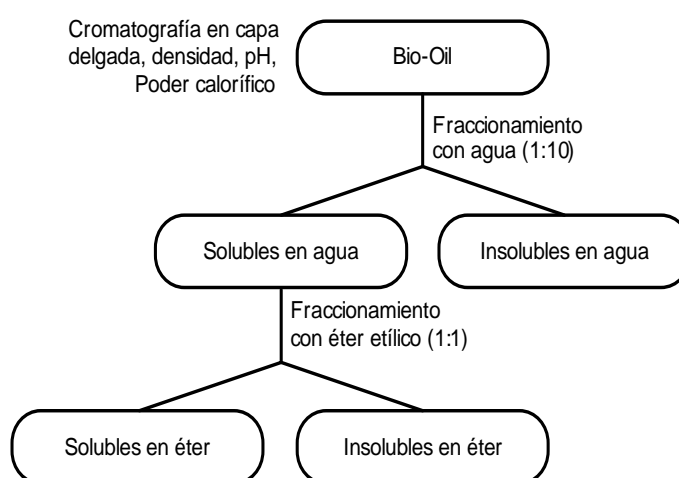


Figura 2. Esquema de fraccionamiento y análisis de los bio-oils.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Productos de la pirólisis

La composición y cantidades relativas de los productos de la pirólisis dependen del tipo de biomasa y de las condiciones operativas (velocidad de calentamiento y temperatura) (Williams y Besler, 1996). El producto final de las pirólisis de biomasa se distribuyó entre tres fases: una líquida (bio-oil), una sólida (char, residual en el reactor), y una gaseosa. En la Tabla 1 se presentan los rendimientos para las distintas materias primas. El mayor rendimiento de bio-oil se obtuvo con aserrín de pino (42.6 %), resultado que concuerda con los reportados en bibliografía (Bertero et al., 2009; Demirbas, 2007), a pesar de que el equipo de pirólisis utilizado en este trabajo es elemental. Para el resto de las materias primas el producto principal fue gas, con un rendimiento superior a 50 % en el caso de las hierbas aromáticas.

Producto, %p	Materias primas			
	Aserrín de pino	Aserrín de algarrobo	Cáscara de trigo	Hierbas aromáticas
Gases	38.8	48.9	44.9	54.1
Bio-Oil	42.6	27.1	32.5	20.1
Char	18.6	24.0	22.6	25.2

Tabla 1. Rendimientos de los productos de pirólisis.

Los componentes principales del gas de pirólisis son dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), metano (CH_4), etileno (C_2H_6) e hidrógeno (H_2), pero sus proporciones dependen de la temperatura (típicamente 80-90% óxidos de carbono

(Yanik et al., 2007)). Su poder calorífico (entre 8 y 15 MJ/m³) es bastante inferior al de gases de origen fósil (por ejemplo, gas natural 34,8 MJ/m³). El char es un combustible sólido muy apreciado desde el punto de vista ambiental, debido a su bajo contenido de azufre y su elevado poder calorífico (25-30 MJ/kg) (Kim et al., 2007).

Composición química de los bio-oils

Los bio-oils son líquidos de color marrón oscuro con olor característico a humo. Su composición es sumamente compleja, con concentraciones muy variables de más de 400 compuestos, lo que refleja la multiplicidad de reacciones que ocurren durante la pirólisis. En consecuencia, la identificación de sus componentes, que son de muy variados pesos moleculares, es muy dificultosa (Oasmaa y Czernik, 1999). Las técnicas que se emplean para el análisis cuantitativo incluyen cromatografía gaseosa acoplada a espectrometría de masas (GC/MS) y pirólisis analítica combinada con espectrometría de masa (Py-GC/MS), entre otras (Sipilä et al., 1998). Los alumnos realizaron un análisis cualitativo de la composición de los bio-oils utilizando técnicas sencillas (cromatografía en capa delgada y fraccionamiento con solventes).

La cromatografía en capa delgada es una técnica que presenta ventajas para la caracterización química de mezclas complejas en el laboratorio escolar: es rápida, sencilla, económica y permite utilizar una pequeña cantidad de muestra. A pesar de ello, no permite identificar de manera individual los compuestos presentes en el bio-oil, siendo posible solamente la separación en grupos con polaridad similar.

En la Tabla 2 se presentan los R_F obtenidos para los bio-oils con los distintos eluyentes utilizados. Para un determinado solvente, los compuestos menos polares presentes en la muestra recorren una distancia mayor sobre la fase estacionaria durante el desarrollo del cromatograma (Abbott y Andrews, 1970). El bio-oil de pino presentó el mayor R_F para los eluyentes pentano y metanol, y el bio-oil de algarrobo, para tolueno y cloroformo/ácido acético. En la Figura 3 se presentan los cromatogramas obtenidos con los distintos solventes, para el caso del bio-oil de pino. El metanol no resultó un solvente adecuado para la separación en grupos, debido a que todos los compuestos eluyeron de manera conjunta, y el éter etílico no fue adecuado para el análisis de composición, debido a que se obtuvieron R_F iguales a uno en todos los casos.

Bio-oil	Eluyentes				
	Pentano	Éter etílico	Tolueno	Metanol	Cloroformo/Ácido acético (9:1 v/v)
Aserrín de pino	0.93	1.00	0.67	0.65	0.79
Aserrín de algarrobo	0.85	1.00	0.86	0.57	0.86
Cáscara de trigo	0.86	1.00	0.79	0.43	0.71
Hierbas aromáticas	0.84	1.00	0.80	0.36	0.72

Tabla 2. Valores de R_F obtenidos para los distintos solventes



Figura 3. Cromatogramas obtenidos con distintos solventes para el bio-oil de pino.

La intensidad de coloración de la mancha producida en el cromatograma depende de la concentración de las sustancias en la muestra (Abbott y Andrews, 1970). Cuando se eluyó con pentano, la mancha de coloración más intensa se obtuvo con el bio-oil de hierbas aromáticas, mientras que en la elución con tolueno, se obtuvo con el bio-oil de pino, y cuando se empleó la mezcla cloroformo/ácido acético, con el bio-oil de algarrobo. De acuerdo a estudios previos, el bio-oil de algarrobo posee mayor cantidad de compuestos polares (tales como ácidos, ésteres, aldehídos, cetonas y fenoles) que los bio-oils obtenidos de aserrín de pino y cáscara de trigo (Bertero et al., 2009). Utilizando GC/MS se determinó que el contenido de compuestos no polares (principalmente hidrocarburos) en el bio-oil de hierbas aromáticas (alrededor de 3.8 %) es mayor que en el resto de bio-oils estudiados (menos de 2 %).

El fraccionamiento de los bio-oils con agua y éter es una técnica específica que facilita el análisis de su composición. La fracción insoluble en agua (IA) es viscosa, posee derivados oligoméricos de la lignina y es más densa que la soluble en agua (SA), compuesta por productos más livianos de la degradación de los carbohidratos (celulosa y hemicelulosa) y de la lignina. En la fracción soluble en éter (SE) se concentran los productos de la degradación profunda de la lignina, y en la insoluble en éter (IE), los de la degradación de los carbohidratos (Sipila et al., 1998). En la Figura 4 se presentan los perfiles de solubilidad de los distintos bio-oils. En todos los casos la fracción SA representó más de 97 %. Los bio-oils obtenidos de biomásas herbáceas (cáscara de trigo y hierbas aromáticas) mostraron proporciones similares de las fracciones SE e IE. Igual comportamiento se observó para los bio-oils obtenidos de maderas maduras (aserrín de pino y de algarrobo).

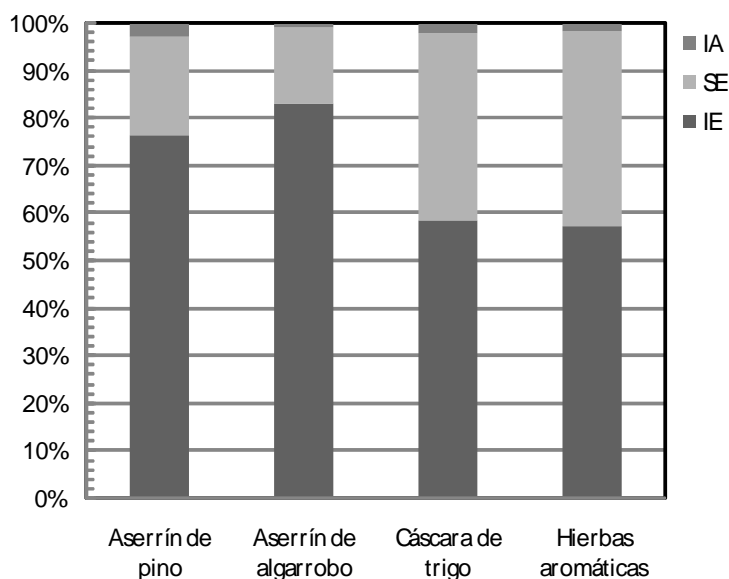


Figura 4. Perfiles de solubilidad de los bio-oils.

Propiedades fisicoquímicas

En la Tabla 3 se presentan algunas propiedades de los bio-oils. El agua del bio-oil proviene de las reacciones de deshidratación que ocurren durante la conversión térmica y, en este caso donde no se produjo un secado previo, también depende de la humedad inicial de la materia prima. El pH es bajo debido a la elevada proporción de ácidos, y la densidad, que es una medida importante para su transporte, estuvo en el rango de los valores reportados (Oasmaa y Peacocke, 2001).

En términos generales, el poder calorífico superior (PCS) de los bio-oils es similar a los de la biomasa de origen, y un 40 a 45 % menores a los de combustibles fósiles (el fuel oil pesado, 40 MJ/kg (García-Pérez et al., 2007)), principalmente debido al elevado contenido de agua y la gran proporción de oxígeno de los bio-oils. Los alumnos calcularon esta propiedad con los datos de composición elemental, utilizando la fórmula de Dulong (Ecuación 2) para combustibles secos y luego lo afectaron por el contenido de agua del bio-oil (Özbay et al., 2008; Scholze y Meier, 2001).

$$PCS (kJ / kg) = 338.2 * C + 1442.8 * \left(H - \frac{O}{8} \right) + 93.1 * S + 23.3 * N \quad (2)$$

La relación molar H/C de un combustible permite estimar la emisión de CO₂ por unidad de energía que se producirá durante la combustión, de forma que cuanto mayor es la relación H/C menor será la emisión de CO₂. (Figueroa y Dávila, 2004). El carbón, por ejemplo, es uno de los combustibles más contaminantes, con una relación H/C de aproximadamente 1. La relación H/C del bio-oil de pino fue superior a la del resto de los bio-oils y estuvo en el rango de valores típicos de la gasolina (2 a 2.5).

Propiedad	Materias primas			
	Aserrín de pino	Aserrín de algarrobo	Cáscara de trigo	Hierbas aromáticas
pH	3	3	6	3
Densidad (kg/dm ³)	1.07	1.11	1.00	1.02
Agua (% p)	49.6	67.6	84.4	
Análisis elemental, % base seca				
C	45.8	58.0	69.9	
H	8.7	5.8	11.0	
N	<0.2	<0.3	12.1	
O	45.3	33.1	6.9	
PCS (MJ/kg)	10.03	7.24	6.02	
Relación molar H/C	2.28	1.20	1.90	

Tabla 3. Propiedades fisicoquímicas de los bio-oils.

* Las determinaciones de composición elemental y contenido de agua no fueron realizadas por los alumnos.

CONCLUSIONES

Como actividad de extensión universitaria dirigida a alumnos de la escuela secundaria, se planteó una serie de experimentos de producción y caracterización de bio-oil, y una revisión bibliográfica sobre el aprovechamiento energético de biomasa lignocelulósica y la producción de combustibles alternativos de transporte.

En el trabajo experimental se abordaron los siguientes aspectos: producción de bio-oil por pirólisis de distintas biomásas, caracterización química de los bio-oils obtenidos por cromatografía en capa delgada y fraccionamiento con solventes, y determinación de la densidad y del pH. Al finalizar cada trabajo práctico, los alumnos resolvieron distintas cuestiones en función de los resultados obtenidos, lo que les permitió aplicar a situaciones concretas conceptos como balance de masas, rendimientos de productos, separación cromatográfica, entre otros. Es de destacar el alto grado de participación de los alumnos en las actividades desarrolladas.

De acuerdo a los resultados obtenidos, el aserrín de pino parece ser la materia prima más adecuada (de las estudiadas) para la producción de combustibles líquidos, debido al mayor rendimiento en la pirólisis y a las propiedades fisicoquímicas del bio-oil obtenido, especialmente el mayor poder calorífico superior y la relación H/C.

REFERENCIAS

- Abbott, D., Andrews, R. (1970). Introducción a la cromatografía. 2da. edición. Madrid: Alhambra, p. 16-45.
- Adjaye, J., Bakhshi, N. (1995). Production of hydrocarbons by catalytic upgrading of a fast pyrolysis bio-oil. Part I: Conversion over various catalysts. *Fuel Process. Technol.* 45, 161-183.
- Bertero, M., de la Puente, G., Sedran, U. (2009). Co-procesamiento de bio-oils. Caracterización y pre-tratamiento térmico. *AVERMA* 13, 6.01-6.6.
- Chiaromonti, D., Bonini, M., Fratini, E., Tondi, G., Gartner, K., Bridgwater, A., Grimm, H., Soldaini, I., Webster, A., Baglioni, P. (2003a). Development of emulsions from biomass pyrolysis liquid and diesel and their use in engines. Part 1: emulsion production. *Biomass Bioenergy* 25, 85-99.
- Chiaromonti, D., Bonini, M., Fratini, E., Tondi, G., Gartner, K., Bridgwater, A., Grimm, H., Soldaini, I., Webster, A., Baglioni, P. (2003b). Development of emulsions from biomass pyrolysis liquid and diesel and their use in engines. Part 2: tests in diesel engines. *Biomass Bioenergy* 25, 101-111.
- Czernik S., Bridgwater A. (2004). Overview of Applications of Biomass Fast Pyrolysis Oil. *Energy & Fuels* 18, 590-598.
- Demirbas, A. (2007). The influence of temperature on the yields of compounds existing in bio-oils obtained from biomass samples via pyrolysis. *Fuel Process. Technol.* 88:591-597.
- Elliott D. (2007). Historical developments in hydroprocessing bio-oils. *Energy Fuels* 21, 1972-1815.
- Figueruelo, J., Dávila, M. (2004). Química del ambiente y de los procesos medioambientales, 1ª edición. España: Reverté, pp.392-393.
- García-Pérez M, Chaale A, Pakdel H, Kretschmer D, Roy C. (2007). Characterization of bio-oils in chemical families. *Biomass Bioenergy* 31, 222-242.
- Gayubo, A., Aguayo, A., Atutxa, A., Valle, B., Bilbao, J. (2005). Undesired components in the transformation of biomass pyrolysis oil into hydrocarbons on a HZSM-5 zeolite catalyst. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 80, 1244-1251.
- Ikura, M., Stanculescu, M., Hogan, E. (2003). Emulsification of pyrolysis derived bio-oil in diesel fuel. *Biomass Bioenergy* 24, 221-232.

- Kim, M.R., Buonomo, E., Cukierman, A.L., Bonelli, P. (2007). Obtención de biomcombustibles y carbón activado a partir de un precursor renovable. *AVERMA* 11, 27-32.
- Maslatón C, González A.L., Miño M. (2008). Pellets de madera para usos energéticos. *Saber Cómo* 60. <http://www.inti.gov.ar/sabercomo/sc60/imagenes/SC60.pdf>.
- Oasmaa A., Czernik S.(1999). Fuel Oil Quality of biomass pyrolysis oils: state of the art for the end users. *Energy & Fuels* 13, 914-921.
- Oasmaa A., Peacocke C. (2001). A guide to physical property characterisation of biomass-derived fast pyrolysis liquids. 2ª edición. Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland, pp. 28.
- Özbay N., Apaydin-Varol E., Uzun B., Putün. (2008). Characterization of bio-oil obtained from fruit pulp pyrolysis. *Energy* 33, 1233-1240.
- SAGPyA, Informe Mensual de Coyuntura sector farináceos, marzo 2009.
- Sipilä, K., Kuoppala, E., Fagernäs, L., Oasmaa, A. (1998). Characterization of biomass-based flash pyrolysis oils. *Biomass Bioenergy* 14 (2), 103-113.
- Scholze, B., Meier, D.(2001) Characterization of the water-insoluble fraction from pyrolysis oil (pyrolytic lignin). Part I. PY-GC/MS, FTIR, and functional group. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 60, 41-54.
- Williams, P., Besler, S. (1996).The influence of temperature and heating rate on the slow pyrolysis of biomass. *Renewable Energy* 7, 233-250.
- Yanik, J., Kornmayer, C., Saglam, M., Yüksel, M. (2007). Fast pyrolysis of agricultural wastes: Characterization of pyrolysis products. *Fuel Process. Technol.* 88, 942-947.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado gracias al financiamiento de la Universidad Nacional del Litoral (Secretaría de Extensión Universitaria de la Facultad de Ingeniería Química), con la colaboración de las docentes Emma Plez, Silvina Matorras y Silvana Pochettino y la directora Marta Pettite de la E.E.M. N° 329; el Ing. Eduardo Marteleur y la Ing. Stella Baravalle de la UTN Facultad Regional San Francisco.

ABSTRACT: Processing biomass to produce transport biofuels is a sustainable option to consolidate alternative energy sources with world-wide growing interest. The production of bio-oil from the pyrolysis of lignocellulosic wastes from various sources is particularly attractive, due to the low cost of raw materials and to the fact that it does not compete with food production. Bio-oil production and characterization activities planned for and executed with secondary grade students are presented in this work; experiments were simple and performed with very low cost materials. Students learnt to use basic instruments for data acquisition and the experimental results, that can be compared with those obtained with conventional and sophisticated techniques, were analyzed critically. It is to be mentioned that the degree of compromise shown by the students was very high. Pine wood resulted the most convenient for the production of liquid fuels, because their yield were higher and the physicochemical properties of the bio-oil were the best, specially their higher heating value and H/C ratio.

Keywords: pyrolysis, bio-oil, secondary education.