

# Aprovechamiento de los residuos vegetales de una central de abastos para la obtención de etanol

Elsa Beatriz Fonseca Santanilla\*, Gerson Aurelio Maturana Moreno\*\*

Fecha de envío: 20 de noviembre de 2009

Fecha de aceptación: 1º de marzo de 2010

## RESUMEN

En este artículo, se presentan los resultados de la investigación realizada para evaluar la factibilidad de obtención de etanol a partir de los residuos vegetales generados por la segunda central mayorista más grande de Suramérica: Corabastos S.A., la cual se encuentra ubicada en el sector de Kennedy, en la ciudad de Bogotá. La investigación se desarrolló en dos fases: un estudio de campo para caracterizar los residuos generados por bodega y un estudio experimental que incluyó el muestreo, el pre-tratamiento y los procesos de tratamiento químico y de fermentación del material vegetal. Los resultados obtenidos indican que es factible obtener más de cuarenta litros de etanol bruto por tonelada de residuo a través del proceso químico propuesto, mientras que se demostró que un proceso de fermentación no genera cantidades adicionales significativas de etanol. La implementación del método propuesto en las plazas de mercado permitiría eliminar el costo por tonelada de residuos transportados y dispuestos en rellenos sanitarios.

**Palabras clave:** hidrólisis ácida, residuos vegetales, etanol, fermentación.

## PRODUCTION OF ETHANOL FROM WASTE VEGETABLES FROM A WAREHOUSE

### ABSTRACT

A research was conducted to evaluate the viability to produce ethanol using vegetable waste produced at the second most important farm products warehouse in South America: Corabastos S.A. This warehouse is located in Bogotá D.C., Colombia. The research was divided in two phases, first a *field study* to characterize the waste products per warehouse, and second, an experiment sampling waste before and after a chemical treatment and fermentation, by measuring the amount of ethanol produced afterwards. Results indicated that it is possible to produce more than forty liters of crude ethanol per ton of waste by using the proposed chemical treatment. They also showed that fermenting waste did not increase production. Using the residues to produce ethanol will decrease the costs to dispose waste transporting it to sanitary filler. Additionally, the process will produce an alternative source of fuel, and will reduce negative environmental impact by reducing the production of greenhouse gases as a result of the use of fossil fuels.

**Keywords:** acid hydrolysis, vegetables wastes, ethanol, fermentation.

\* Química, Universidad Nacional de Colombia. Especialista en Educación y Manejo Ambiental, Universidad Politécnica de Madrid. Maestría en Docencia de la Química Universidad Pedagógica Nacional. Universidad de La Salle, Departamento de Ciencias Básicas, Instituto La Salle de Investigaciones Avanzadas ISIA, Vicerrectoría de Investigación y Transferencia. Correo electrónico: efonsecas@unisalle.edu.co

\*\* Químico, Maestría en Educación de la Pontificia Universidad Javeriana.

## INTRODUCCIÓN

Los residuos vegetales son una fuente importante de azúcares, almidones y materiales celulósicos que se pueden considerar como materias primas directas e indirectas para la obtención de alcohol combustible, por medio de procesos de fermentación e hidrólisis química o enzimática (Medve et ál., 1998).

En Colombia, se ha trabajado en la obtención de etanol por procesos químicos y biotecnológicos empleando otros residuos agroindustriales: bagazo de trigo, maíz, cebada, café, mango, banano, almidón de yuca y plátano (Ruíz, 1997; Fonseca, et ál., 2006, 2007; Giraldo et ál., 2007; Mahajan y Ro, 2007; Monsalve et ál., 2006). Sin embargo, el potencial energético de las mezclas de residuos vegetales de plazas de mercado y centrales de abasto no ha sido evaluado suficientemente.

Como antecedentes importantes del presente trabajo se encuentran: Cardona et ál. (2004), quienes evaluaron el potencial de producción de biogás y etanol de los residuos de la Plaza de Mercado de Manizales (Colombia) y el estudio de gestión de las 18,500 ton/año de los residuos orgánicos en las plazas de mercado de Bogotá que desarrolló el Consorcio Nam-Velzea (2000), en el que a pesar de que se planteó el aprovechamiento energético de los mismos, la opción fue descartada, argumentando falta de tecnología y costos elevados.

La Central de Abastos Corabastos S.A. se encuentra localizada en la carrera 86 A n.º 24 A-19 sur, en la localidad de Kennedy, en la ciudad de Bogotá. Es una sociedad anónima de economía mixta, en la cual participan la Gobernación de Cundinamarca, la Alcaldía de Bogotá, el Ministerio de Agricultura y el sector privado.

El promedio de volumen de ingreso diario de alimentos a Corabastos es de 11.100 toneladas. La papa el

producto más comercializado, seguido de las frutas y hortalizas provenientes de Ecuador, Chile, Venezuela, Perú, Canadá, Estados Unidos, Francia y de todos los departamentos del país, siendo Cundinamarca, Boyacá y Meta los mayores proveedores de la central.

De los productos que ingresan a la Central de Abastos, se registró en el 2008 un promedio mensual de generación de 2.100 toneladas de residuos, lo que equivale a 25.200 toneladas por año (Uribe et ál., 2008). Las verduras corresponden al 50% de los residuos orgánicos, seguidas de las frutas, con un 14% (Nam-Velzea, 2000).

En este artículo, se presentan el método y los resultados del estudio preliminar para la obtención de etanol a partir de los residuos vegetales de Corabastos S.A., el cual se realizó con el fin de contribuir a la búsqueda de soluciones reales para la problemática planteada.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló en dos fases. La primera de ellas fue la correspondiente al trabajo de campo. La segunda fase, de carácter experimental, se desarrolló en los laboratorios de la Universidad Manuela Beltrán.

### FASE I. TRABAJO DE CAMPO

El trabajo de campo se desarrolló en las instalaciones de Corabastos S.A. y comprendió un periodo de dos meses, en los cuales se intercalaron los días de observación de una a otra semana, con el objeto de identificar la dinámica de transporte, ingreso, almacenamiento y comercialización de productos, así como de tipificar los residuos generados por bodega.

*Muestreo del material vegetal.* Para obtener una muestra representativa de los residuos vegetales generados en Corabastos, durante dos semanas, intercalando los días de recolección, se realizó el

muestreo de material vegetal de la siguiente forma: la primera semana, los días lunes, miércoles y viernes y la segunda semana, los días martes, jueves y domingo. Durante cada día se reunieron 0,5 kg. de mezcla de los residuos generados en cada una de las bodegas de la central, los cuales se conservaron en nevera a temperatura entre 4 °C y 5 °C, hasta reunir el total de la muestra.

## FASE II. TRABAJO EXPERIMENTAL

*Pre tratamiento.* Una vez obtenida la muestra de residuos vegetales, se realizó un proceso de lavado para eliminar polvo, lodo, arena y todo tipo de suciedad adherida a ellos.

Posteriormente, los residuos vegetales fueron mezclados y, por el método de cuarteo, se obtuvieron dos kilogramos de muestra, los cuales fueron sometidos a un proceso de secado lento durante 72 horas a 90 °C en una estufa Memmert, proceso recomendado por Ferrer et ál. (2002).

Los residuos deshidratados se sometieron a un proceso de picado manual y tamizado en el tamizador Sieve Shaker 18480 Scientific Company, al final del cual se escogió la fracción de tamaño inferior a un milímetro, porque según la literatura esta homogeneidad en el material permite que la hidrólisis sea total (Harris, 1975). Este material fue conservado en un lugar fresco y seco en bolsas plásticas de cierre hermético.

*Diseño experimental.* Con el fin de convertir los residuos vegetales en etanol, el material pre tratado fue sometido a un proceso de sacarificación en un sistema de reflujo con ácido sulfúrico de diferentes concentraciones (en una relación de 1:30 equivalente a 2 gr de residuos: 60 ml de ácido) y diferentes tiempos de reacción a una temperatura de 150 °C y con agitación constante, de acuerdo con un diseño totalmente al azar (Martínez y López, 2003) de 12 experimentos

elementales con dos repeticiones cada uno. Las variables y niveles del diseño planteado son:

- Variable 1: porcentaje de ácido sulfúrico  
Niveles: 2%, 4%, 6% y 8%
- Variable 2: tiempo de reacción  
Niveles: 2 h, 4 h y 8 h

El producto de cada tratamiento de hidrólisis fue filtrado y ajustado a un pH entre 2 y 4,5 con hidróxido de sodio diluido. Posteriormente, se le determinó el contenido de azúcares y etanol empleando el método que se detalla a continuación.

*Determinación de azúcares.* Esta se llevó a cabo para cada una de las mezclas de residuos vegetales tratadas con ácido sulfúrico de acuerdo con el método 4.7.01 de la AOAC (Asociation of Official Analytical Chemical, 2000), el cual se basa en la titulación de la muestra con una mezcla de solución Fehling A y Fehling B, empleando azul de metileno como indicador del punto final de la valoración.

*Determinación de etanol.* El análisis se basó en la reacción óxido-reducción que ocurre entre el alcohol presente en 0,5 ml de muestra y una solución de dicromato de potasio. El exceso de este último se valora por titulación con una solución de concentración conocida de sulfato ferroso amónico (FAS), empleando ferroina como indicador de punto final (Alcoquímica, 1997).

**Fermentación con levaduras.** Una vez determinado el contenido de azúcares y etanol en las mezclas tratadas con ácido sulfúrico, se procedió a inocular dos gramos de levadura activa seca a cada una de ellas. Luego se dejaron en incubación a 32 °C durante 36 horas. Una vez finalizado el periodo de fermentación, se procedió a la determinación de etanol por el procedimiento antes planteado.

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del trabajo realizado en la central y en el laboratorio.

### TRABAJO DE CAMPO

Como resultado del estudio realizado en la Central de Abastos Corabastos S.A., se obtuvo la caracterización de los productos que se almacenan y comercializan por bodega, la cual se presenta en la tabla 1.

**Tabla 1. Corabastos S.A., productos almacenados y comercializados por bodega**

Bodega	Productos
1-10	Granos y procesados
11	Arracacha, plátano, yuca
12	Tomate, pepino, pimentón
13-15	Papa
16-17	Grasas, procesados, huevos
18	Minoristas frutas y verduras
19 -20	Papa
21	Cebolla, pepino
22	Plátano, yuca ,arracacha, maíz
23	Frutas y Hortalizas
24	Ajo, zanahoria, cebolla
25	Cebolla cabezona
26	Central hortalicera
27	Granos y procesados
29-30	Frutas bodega "La Reina"
31	Bananos, aguacates
32	Plátanos
Bodega popular mayorista	Frutas y hortalizas
Bodega popular minorista	Frutas y hortalizas

El análisis de los productos que se comercializan en las bodegas permitió identificar que la mayor cantidad de residuos se genera durante los días sábados y domingos, en los cuales se realiza la mayor cantidad de transacciones. La caracterización de los residuos sólidos que se generan en cada bodega se presenta en la tabla 2. En la mayoría de las bodegas de Corabastos se generan residuos de frutas, granos, tubérculos y hortalizas, los cuales presentan gran potencial como materia prima para la obtención de etanol por su elevado contenido de materiales directa e indirectamente fermentables, tales como: azúcares, almidón y materiales celulósicos (Mahajan y Ro, 2007).

**Tabla 2. Residuos generados por bodega de Corabastos S.A.**

Bodega	Productos
1-10	Papel, plásticos, granos y harinas,
11	Yuca, plátano
12	Cáscaras, arveja , repollo, tomate
13-15	Papa
16-17	Granos
18	Ramas de cebolla
19 -20	Papa
21	Pepino, cebolla cabezona
22	Mazorcas, maíz, yuca, plátano
23	Cáscaras de arveja, lechuga, tomate, ramas de cebolla, zapallo
24	Zanahoria, cebolla cabezona
25	Cebolla cabezona
26	Cáscaras de arveja, ramas de cebolla, hojas de lechuga , apio
27	Papel y plásticos
29-30	Mango, naranja, papaya, tomate, guayaba, zapayo, tomate, aguacate
31-32	Bananos, plátanos, aguacates
32-32	Plátanos, bananos
Bodega mayorista	Naranja, tomate, mandarina, ciruela, papaya, zapallo, uchuva
Bodega Minorista	Yuca, maíz, cebolla, arveja, cabezona, lechuga, cáscaras

*Hidrólisis ácida.* Las condiciones de cada experimento y la cantidad de azúcares promedio obtenida en cada uno de ellos se presentan en la tabla 3.

**Tabla 3. Relación entre la concentración de ácido sulfúrico y los azúcares obtenidos**

Concentración de ácido sulfúrico (%V/V)	Tiempo tratamiento (Horas)		
	2 h	4 h	8 h
2%	17,58	15,48	19,39
4%	17,14	31,44	23,57
6%	17,29	34,58	26,77
8%	14,93	19,95	18,36

En la tabla anterior, se observa que las cantidades de azúcares reductores obtenidas se encuentran entre 14,93% y 34,58%, valores similares a los reportados por otros investigadores (Lantero y Bereskin, 2002; Medina y Ruiz, 2006; Mejía et ál., 2007) para sustratos que se emplean típicamente en la producción de etanol, como la caña, la remolacha y la papa. También se encontró que para los diferentes tiempos de hidrólisis evaluados, el ácido sulfúrico al 6% generó los mayores porcentajes de azúcares reductores, siendo el tratamiento de cuatro horas el más efectivo, con una producción de azúcares del 34,58%. Lo anterior permite deducir la relación lineal entre el tiempo de hidrólisis y la concentración de ácido hasta alcanzar un punto óptimo de concentración, luego de lo cual se detecta una disminución en la concentración de azúcares, posiblemente debida al aumento de la velocidad de la reacción de hidrólisis y a la fermentación posterior de los azúcares presentes por el uso de mayores concentraciones de ácido (Ferrer et ál., 1995).

**CANTIDAD DE ETANOL OBTENIDO EN LOS TRATAMIENTOS CON ÁCIDO SULFÚRICO**

Para determinar el porcentaje de alcohol en las muestras de residuos hidrolizados se utiliza la ecuación 1:

$$\%v / v_{ETOH} = \frac{((V_b - V_2) * n * 46.07 / 4000)}{Vm(ml) * 0.79} * 100 \tag{1}$$

Donde:

$V_b$  = ml del sulfato ferroso amónico (FAS) consumido en el blanco.

$V_2$  = ml del sulfato ferroso amónico (FAS) consumido en la titulación.

$V$  = Volumen de la muestra.

$n$  = Normalidad del FAS.

46.07 = Peso molecular del etanol.

0.79 = Densidad del etanol.

4000 = Factor de dilución \* 1000 ml/L.

El porcentaje de etanol promedio obtenido después de los tratamientos de hidrólisis ácida de los residuos vegetales se presenta en la tabla 4.

**Tabla 4. Relación entre la cantidad de etanol obtenido y las variables experimentales**

Concentración de ácido sulfúrico (%V/V)	Tiempo en horas		
	2 h	4 h	8 h
2%	6,342	6,954	7,435
4%	7,348	9,534	8,266
6%	7,435	9,666	8,878
8%	6,910	9,447	7,610

*Determinación de etanol en las muestras fermentadas con levadura.* En la tabla 5, se presenta la relación entre la concentración de ácido sulfúrico, el tiempo en horas del tratamiento y la cantidad promedio de etanol producido en las mezclas de residuos vegetales sometidos a hidrólisis y fermentación con levaduras durante 48 horas.

**Tabla 5. Relación entre la cantidad de etanol obtenido luego de la fermentación con levaduras y las variables del proceso químico**

Concentración de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (%V/V)	Tiempo en horas		
	2 h	4 h	8h
2%	5,68	6,73	7,08
4%	7,21	9,31	8,00
6%	6,95	9,44	8,61
8%	6,65	9,09	7,26

El análisis de etanol en las muestras hidrolizadas mostró que existe una directa relación entre los azúcares presentes y el porcentaje de alcohol que se obtiene a partir de ellos y que el método empleado (hidrólisis ácida) permite no solamente la sacarificación del material vegetal, sino que es capaz de degradarlo directamente hasta etanol, encontrándose que el mayor porcentaje de etanol se obtiene a las cuatro horas de reacción y está alrededor del 9,5% V/V, independientemente de la concentración de ácido empleada, seguido del tratamiento de ocho horas, con concentraciones de ácido de 4% y de 6% (8,26% y 8,88%, respectivamente).

En la tabla 4, se muestra que los valores porcentuales de alcohol se encuentran entre 6,34% y 9,66%, lográndose el mayor a las cuatro horas, bajo diferentes concentraciones (9,53 al 4%, 9,66 al 6% y 9,54 al 8%), por lo que también el mejor promedio porcentual (8,9%) se encuentra bajo estas condiciones de tratamiento. Entonces, las condiciones óptimas de obtención de etanol son: cuatro horas y concentración de ácido entre 4% y 6%, lo cual está ratificado por los datos de varianza (en su orden 2 h: 0,25, 4 h: 1,69, y 8 h: 0,43).

Del análisis se establece que el tiempo de reacción es determinante para la producción de azúcares y etanol por el proceso estudiado.

### PROCESO DE FERMENTACIÓN CON LEVADURAS

En la tabla 5, se observa que el porcentaje de alcohol obtenido luego de la fermentación con levaduras se encuentra en concordancia con los resultados arrojados por hidrólisis ácida, al obtener los mayores porcentajes de alcohol con el tratamiento de cuatro horas, pero que estos no son diferentes de los encontrados luego del tratamiento de hidrólisis. Los resultados más bajos se encuentran en los residuos que habían sido sometidos a hidrólisis por dos horas.

Los valores volumétricos de alcohol que se observan en la tabla 5 van de 5,68% a 9,44%, encontrándose que, aunque los residuos fueron sometidos a un tiempo de incubación igual (36 h para todas las muestras), se partió de los residuos ya hidrolizados. También se determinó que los mayores resultados se alcanzan a las cuatro horas (9,31%, 9,44% y 9,09%), mientras que el promedio más elevado se encontró a las cuatro horas (8,64%).

### ANÁLISIS DE LAS VARIABLES DE RESPUESTA

Se consideran como variables: respuesta al rendimiento, la eficiencia y la productividad de los procesos desarrollados:

$$Rendimiento(R) = (producto / sustrato) * 100 \quad (2)$$

$$Rendimiento teórico (Rt) = (0,511 * 95) / 100 \quad (3)$$

Considerando que un gramo de glucosa es capaz de producir hasta 0,511 ml de etanol y que solo se puede generar hasta el 95% de esta cantidad:

$$Rt = (0,511 * 95) / 100 = 0,4855$$

De dos gramos (100%) de sustrato tomados para el desarrollo de los procedimientos se obtuvo un 19,34% de azúcar, es decir 0,3868 g del sustrato están conformados por azúcares (A).

Rendimiento real (Rr) = (producto/ sustrato) \* 100

$$Rr = (0,3868/2g) * 100 = 19,34\%$$

En la tabla 6 se presentan los valores obtenidos para el rendimiento del sustrato en azúcares de todos los tratamientos realizados.

**Tabla 6. Rendimiento del sustrato en azúcares**

Tratamiento n.º	Gramos de sustrato	Gramos de azúcar	Rendimiento real (%)
1	2	0,3868	19,34
2	2	0,4714	23,57
3	2	0,5354	26,77
4	2	0,3672	18,36
5	2	0,3096	15,48
6	2	0,6288	31,44
7	2	0,6916	34,58
8	2	0,3990	19,95
9	2	0,3516	17,58
10	2	0,3428	17,14
11	2	0,3458	17,29
12	2	0,2986	14,93

El rendimiento del sustrato con respecto al alcohol producido es:

$$Rt = 1 \text{ g de glucosa a } 0,511 \text{ ml de etanol}$$

$$Rt = (0,511 * 95)/100 = 0,4855$$

En este cálculo se ha tenido en cuenta que solo es posible obtener hasta un 95% de rendimiento teórico máximo debido a que las células de levaduras, además de alcohol, sintetizan otros compuestos para su crecimiento, así como metabolitos secundarios (Paredes, 2001).

## EFICIENCIA DEL PROCESO DE HIDRÓLISIS ÁCIDA EN LA OBTENCIÓN DE ETANOL

Esta se calculó como:

$$\text{Eficiencia (E)} = (Rr/Rt) * 100$$

Para la determinación de la eficiencia se consideró la ecuación de Gay Lussac, según la cual solo el 48,55% del azúcar presente es susceptible de convertirse en alcohol (Paredes, 2001). Mientras que para determinar la eficiencia para las muestras, se consideró que el rendimiento teórico es (muestra 1):

$$Rt = 0,485 * 100\%$$

$$Rt = 0,485 * 0,3868g = 0,1877g$$

0,1877 g es la cantidad teórica por cada dos gramos de sustrato susceptible de convertirse en alcohol. Considerando que un gramo de glucosa es capaz de producir hasta 0,511 ml de etanol y que solo se puede generar hasta el 95% de esta cantidad, entonces:

$$Rt = (0,1877 \text{ g} * 0,511\text{ml de etanol})/1 \text{ g}$$

$$Rt = 0,095 \text{ ml de etanol}$$

El rendimiento teórico del sustrato respecto al etanol es:

$$Rt = (\text{producto/sustrato}) * 100$$

$$Rt = (0,095 \text{ ml etanol}/2 \text{ g}) * 100$$

$$Rt = 0,0475 \text{ ml etanol/g de residuo}$$

Mientras que el rendimiento real y la eficiencia del proceso son:

$$Rr = (\text{producto/sustrato}) * 100$$

$$Rr = (0,07435 \text{ ml de etanol}/2 \text{ g}) * 100$$

$R_r = 0,0371$  ml etanol/g de residuo

$$E = R_r/R_t$$

$$E = (0,0371/0,0475) * 100 = 78,1\%$$

De la misma forma, se calcula el rendimiento teórico en mililitros como etanol que se ha de obtener por gramo de residuo y el rendimiento real de etanol que se obtuvo por gramo de residuo (tabla 7).

**Tabla 7. Rendimientos teórico y real, eficiencia en la obtención de etanol por tratamiento químico**

Tratamiento n.º	Rendimiento teórico	Rendimiento Real	Eficiencia %
1	0,0475	0,0371	78,1
2	0,0580	0,0413	71,2
3	0,0565	0,0443	78,4
4	0,0455	0,0380	83,5
5	0,0385	0,0348	90,3
6	0,0780	0,0476	61,0
7	0,0855	0,0483	56,5
8	0,0495	0,0472	95,3
9	0,0435	0,0317	72,8
10	0,0425	0,0367	86,3
11	0,0430	0,0372	86,5
12	0,0370	0,0345	93,2

**Eficiencia del proceso de fermentación con levaduras para la obtención de etanol**

Se determinó el grado alcohólico, la eficiencia y la productividad del proceso con las mismas ecuaciones aplicadas a la obtención de alcohol por hidrólisis ácida. Los resultados se presentan en la tabla 8.

**Tabla 8. Rendimientos teórico, real y eficiencia en la obtención de etanol después de tratamiento químico y fermentación**

Tratamiento n.º	Rendimiento teórico	Rendimiento real	Eficiencia %
1	0,0475	0,0354	74,5
2	0,0580	0,0400	68,9
3	0,0565	0,0430	76,1
4	0,0455	0,0363	79,8
5	0,0385	0,0337	87,5
6	0,0780	0,0466	66,0
7	0,0855	0,0472	55,2
8	0,0495	0,0455	91,9
9	0,0435	0,0284	65,3
10	0,0425	0,0360	84,7
11	0,0430	0,0348	80,9
12	0,037	0,0332	89,7

**Comparación de rendimiento entre proceso químico y proceso fermentativo**

Se identificó una diferencia promedio de 3,68% entre el rendimiento teórico de etanol y el rendimiento real alcanzado por hidrólisis, y de 3,93% con el rendimiento real alcanzado por fermentación. Ambos márgenes porcentuales son aceptables dentro de un proceso de producción industrial (Paredes, 2001).

Existe una diferencia ligeramente superior (0,26%) entre el rendimiento en etanol alcanzado por el método de hidrólisis ácida y el obtenido por fermentación, lo que se visualiza en el promedio de 8,90% y 8,64%, respectivamente. Se deduce, entonces, que el método de hidrólisis ácida es mucho más eficiente, ya que requiere menos tiempo y según los resultados convierte los residuos vegetales directamente en etanol. Los resultados nos indican que el porcentaje de alcohol que se obtiene al estandarizar el método es directamente proporcional a la concentración ópti-

ma del ácido sulfúrico (coeficiente de correlación  $r = 0,978$ ).

**Proyección de la cantidad de etanol a producir por el proceso propuesto**

Para el tratamiento que generó los mayores rendimientos y productividad (4 horas de hidrólisis áci-

da con ácido sulfúrico al 4%), se calculó la producción de etanol por cantidad de residuos vegetales tratados teniendo en cuenta que, en promedio, un gramo de residuo vegetal produce 0,044 ml de etanol. La productividad de etanol expresada en litros por tonelada sería:

$$\text{Productividad } \frac{l}{T} = \frac{0,044475 \text{ mL}}{1g} \times \frac{1l}{1000ml} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1T}$$

$$\text{Productividad} = \frac{47,5 l}{T \text{ Residuo}}$$

Como en Corabastos se generan diariamente más de 70 toneladas de residuos vegetales, por el proceso propuesto se podrían obtener, teóricamente:

$$\begin{aligned} \frac{\text{Etanol}}{\text{día}} &= 70 \frac{T}{d} \times 47,5 \frac{l}{T} \text{ residuo} \\ \frac{\text{Etanol}}{\text{día}} &= 3325 \frac{l \text{ etanol}}{d} \\ \frac{\text{Galón etanol}}{\text{día}} &= \frac{1 \text{ galón}}{3,785 l} * \frac{3325}{\text{día}} = 878,5 \frac{\text{Gal}}{d} \end{aligned}$$

Se debe tener en cuenta que este volumen corresponde a etanol bruto no purificado (al 70%), por lo que el volumen de etanol puro que se podría producir será sensiblemente menor. Sin embargo, quienes empleen el método propuesto, deben decidir, de acuerdo al mercado, si van a comercializar el alcohol bruto para uso industrial o si lo purifican para usarlo como antiséptico, o si lo deshidratan en un 99% para que pueda emplearse como combustible alternativo poco contaminante.

Finalmente, es necesario resaltar que la implementación de la alternativa propuesta permitirá que diariamente se ahorren miles de pesos en el transporte y en

la disposición final de los residuos vegetales que serán la materia prima del proceso de obtención de etanol.

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Los residuos vegetales que se generan en el proceso de selección, comercialización y transporte de alimentos en las instalaciones de la Corporación de Abastos de Bogotá Corabastos S.A. son desechos con potencial como materia prima para la obtención de etanol, que permitirían obtener 47,5 l de etanol bruto por cada tonelada de residuos vegetales tratados. Las condiciones de hidrólisis ácida que generan los mayores rendimientos de etanol a partir de los

residuos de Corabastos son: ácido sulfúrico al 4% y cuatro horas de tratamiento. El análisis estadístico realizado demuestra que el porcentaje de azúcares y de etanol obtenido está influenciado directamente por la concentración de ácido sulfúrico empleado y el tiempo de tratamiento, y, por tanto, deben tenerse en cuenta en la estandarización del método.

Se resalta el hecho de que los residuos vegetales generados en todas las plazas de mercado son similares a los de Corabastos y, por ende, el proyecto se puede implementar no solo en la Central, sino en cualquier plaza o en un sitio centralizado de acopio. Se recomienda desarrollar un estudio de factibilidad financiera que comprenda el análisis de los principales costos de producción, tales como: materiales, mano de obra directa e indirecta, costos indirectos de producción —incluyendo control de calidad y supervisión de operación—, así como gastos generales de operación.

En Colombia, se requieren mecanismos de regulación e incentivos de financiación para las iniciativas de aprovechamiento de los residuos vegetales de las plazas de mercado similares a la que recientemente aprobó el Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, para recibir recursos del CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México) y a la del Gobierno del Distrito Federal de México, para producir etanol con residuos de vegetales y frutas de las centrales de abastos locales a través del método propuesto (noticia publicada en [www.universia.net.mx](http://www.universia.net.mx), octubre 2 de 2009), proyecto que redundará en beneficios económicos, ya que se dejaría de pagar el costo por tonelada de residuo transportado y dispuesto tradicionalmente en rellenos sanitarios y que se podría convertir en una fuente de ingreso por la venta del etanol obtenido, que, de ser apto para su empleo como combustible, contribuiría a la disminución del impacto ambiental actualmente generado por el empleo masivo de combustibles fósiles.

## REFERENCIAS

- Alcoquímica Ltda. (1997): *Procedimientos estandarizados de análisis*.
- Andren, R. et ál. (1976): "Production of sugars from waste cellulose by enzymatic hydrolysis: Primary evaluation of substrates". *Proc. Biochem* 10. 1-11.
- Association of Chemical Analytical Chemists (AOAC) (2000): *Official methods of Analysis*.
- Cardona, C. et ál. (2004): "Biodegradación de residuos orgánicos de plazas de mercado". *Revista Colombiana de Biotecnología* 6. 2 78-84.
- Cochran, W. y Cox, G. (1974) *Diseños Experimentales*. Johyn Wiley & Sons.
- Consortio Nam-Velzea. (2000) *Gestión de residuos orgánicos en las plazas de mercado de Santafé de Bogotá*. Contrato PNUD (COL/96/23).
- Ferrer, J. et ál. (2002): "Kinetics of the acid hydrolysis of sugar cane bagasse pith". *Revista Facultad de Agronomía (LUZ)* 19. 23-33.
- Fonseca, E. et ál. (2006): "Hidrólisis ácida de sustratos residuales agroindustriales colombianos". *Umbral científico* 8. 2 5-11.
- Fonseca, E. et ál. 2007. "Estudio cinético comparativo para la obtención de etanol a partir de residuos agrícolas por métodos químicos y biotecnológicos". Sexto simposio internacional de alcoholes y levaduras SIPAL-07. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- Lantero, O. y Bereskin, P. (2002). "Methodes de production d'ethanol a partir de substrats de carbone". Patente W003/066826.

- Mahajan, D. y Ro, K. (2007): "Clean Fuels from Biomass and Wastes". *Ind. Eng. Chem. Res.* 46.
- Martínez, N. (2003). "Metodología de la investigación: diseño experimental, cuasiexperimental y experimental de caso único".
- Medina, V. y Ruiz, A. (2006): "Ethanol Production of Banana Shell and Cassava Starch". *Revista Facultad Nacional de Minas* 73. 150 21-27.
- Medve J. et ál. (1998): "Hydrolysis of microcrystalline cellulose by cellobiohydrolase I and endoglucanase II from trichoderma reesei adsorption sugar production patten and synergism of the enzymes". *Biotech. Bioeng* 59. 621-634.
- Mejía, F. et ál. (2007): "Aprovechamiento del residuo agroindustrial del mango común (*mangifera indica L.*) en la obtención de azúcares fermentables". *Ingeniería y Ciencia* 3. 6 41-62.
- Paredes, R. 2001. "Evaluación de cepas de levadura para la producción de alcohol". Trabajo de grado. Carrera de Microbiología Industrial. Pontificia Universidad Javeriana.
- Quang, N. et ál. (2003). "Ethanol production with dilute acid hydrolisis using partially dried lignocellulosics". Patente US 2003/019049 A1.
- Ruiz, A. y Arias, E. (1997). "Fermentación alcohólica de mucílago de café con levaduras". Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín.