

# Aprovechamiento energético integral de la *Eichhornia crassipes* (Buchón de agua)

Integral Energetic use of *Echornia Crassipes* (Water Hyacinth)\*

Recibido: 18 de agosto de 2016 - Aceptado: 1 de septiembre de 2016

Para citar este artículo: A. Rodríguez, F. Colmenares, J. Barragán, M. Mayorga «Aprovechamiento energético integral de la *Eichhornia crassipes* (buchón de agua)», *Ingenium*, vol. 18, n.º 35, pp. 134-151, febrero, 2017.



Anderson Guillermo Rodríguez Meléndez\*\*  
Fredy Andrés Colmenares Mestizo\*\*\*  
Juan Carlos Barragán Vega\*\*\*\*  
Manuel Alejandro Mayorga Betancourt\*\*\*\*\*

## Resumen

Este artículo presenta a la *Eichhornia crassipes*, una maleza acuática conocida popularmente con el nombre de Buchón, Lirio o Violeta de agua. El interés se centra en el aprovechamiento energético de esta biomasa procesada para obtener briquetas, bioetanol y biogás; citando los procesos para obtener estos derivados y realizando una comparación cualitativa entre ellos, mostrando un panorama energético de la *Eichhornia crassipes* como fuente de energía alternativa y sostenible. Por último, se hará una propuesta teórica de la producción energética de briquetas y biogás basada en estudios de terceros de esta planta, en la laguna de Fúquene, cuerpo de agua invadido por la *Eichhornia crassipes* y ubicado en la región cundiboyacence de Colombia.

\* Grupo de Investigación: Grupo de Aprovechamiento Tecnológico en Materiales y Energía (GIATME). Universidad patrocinadora: Universidad Escuela Colombiana de Carreras Industriales (ECCI). Proyecto de investigación: «Aprovechamiento energético de biomasa residual» Fecha de inicio y finalización del proyecto: julio de 2015-diciembre de 2016.

\*\* M. Sc. (c) en Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Colombia, aspirante al Título de Experto en Aplicación de Energías Renovables de la Universidad Internacional, Ingeniero Mecánico y Tecnólogo en Mecánica Industrial de la Universidad ECCI.. Proyectista en diseño de tuberías y plantas industriales energéticas del sector Oil & Gas. Participa en el grupo de investigación GIATME. E-mail: angridrodriguezme@unal.edu.co

\*\* Ingeniero Mecánico de la Universidad ECCI con conocimientos en energías alternativas, de la mecánica y electrónica automotriz. Tecnólogo en autrónica y Técnico profesional en Electricidad Automotriz del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). E-mail: fredycolmenares08@yahoo.com

\*\*\* Ingeniero Mecánico y Tecnólogo en Mecánica Industrial de la Universidad ECCI. Gerente y representante legal de SCIPION GROUP S.A.S, integrante del Grupo de Investigación GIATME. E-mail: jotacabave@hotmail.com

\*\*\*\* Ph. D. (c) y M. Sc. en Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, investigador de la Universidad ECCI. Líder del Grupo de investigación GIATME. E-mail: mmayorgab@ecci.edu.co

## Palabras clave

Biomasa, *Eichhornia crassipes*, biogás, bioetanol, briquetas.

## Abstract

This article presents the *Eichhornia crassipes*, an aquatic undergrowth that is known popular as Buchan, lirio or water violet. The interest is focusing in the energetic exploitation of its biomass process to obtain briquettes, bioethanol and biogas, citing the process to obtain these products and doing a qualitative comparison among them, shown an energetic outlook of the *Eichhornia Crassipes* as a source of alternative energy and sustainable. Finally, it will make a theoretical proposal of energetic production of briquettes and biogas based on studies of thirds about this plant, in the Fúquene lagoon water body.

## Keywords

Biomass, *Eichhornia crassipes*, biogas, bioethanol, briquettes.

## 1. Introducción

La generación de energía eléctrica en Colombia se produce a través de diferentes recursos renovables y no renovables, con una participación porcentual en capacidad instalada de tecnologías como la hidráulica con 69.97 %, térmica de gas con 9.85 %, térmica carbón 8.20 %, líquidos 9.69 %, gas - líquido 1.61 %, viento 0.11 % y biomasa con un 0.57 % [1]. La energía hidráulica y los combustibles fósiles son las principales fuentes energéticas del país. Estas presentan desventajas al momento de su explotación; por ejemplo, la hidráulica en épocas de sequía genera una reducción en los niveles de sus embalses de agua, disminuyendo la disponibilidad del recurso hídrico. Así mismo, los recursos de origen fósil son finitos y presentan problemas de emisión de gases contaminantes y de efecto invernadero.

Los recursos biomásicos de Colombia son importantes gracias a la vasta actividad agrícola y a la gran biodiversidad del país; con ellos, además de generar electricidad también se puede generar energía térmica, mecánica y combustible. «La biomasa es toda la materia que se puede derivar directa o indirectamente de la fotosíntesis de las plantas, encontrándose en forma vegetal o animal» [2]. Existen dos tipos de biomasa, biomasa virgen que se divide en terrestre y acuática; y la biomasa de residual que se divide en residuos municipales, sólidos agrícolas, forestales e industriales [3]. El Buchón de agua es una planta flotante de crecimiento rápido (El buchón tiene una tasa de crecimiento muy rápida al punto que puede llegar a duplicar el número de retoños de 6 a 15 días [4, 5]), con una rápida adaptación a los cuerpos de agua dulce, y con ausencia de enemigos y/o herbívoros, convertido en una planta invasiva debido a que ha traído distintas consecuencias negativas para el medio ambiente.

Dentro de sus consecuencias negativas se conoce que provoca una evapotranspiración tres o cuatro veces superior a lo normal consumiendo el cuerpo de agua y causando putrefacción [6]; invade los generadores de las hidroeléctricas obstruyéndolos [6]; reduce

la biodiversidad; oclusión de ríos y alcantarillados; bloquea la luz impidiendo el desarrollo del fitoplancton; absorbe el oxígeno que produce las plantas acuáticas sumergidas; y altera la química del agua [7]. A pesar de que la planta se usa para la limpieza de fuentes de agua de metales pesados, tiene una consecuencia negativa al permitir el crecimiento de flora cianobacterial entre ellas *M. aeruginosa*, una bacteria toxica que produce varias neurotoxinas entre ellas la lipopolysaccharides-(LPSs) y la hepatotoxins(microcystins); dificultando la fotosíntesis de muchas plantas, envenenando así el agua y convirtiéndola en no potable [8]. Es considerada dentro de las 100 especies más invasivas del mundo por la Unión Internacional para la Conservación Natural (UINC). Tiene la capacidad de absorber nutrientes (N, Ca, P, K, entre otros) [7]. Estas características fisiológicas y morfológicas convierten esta especie en un problema si no se hace un control adecuado [9]. Debido a esta problemática ambiental el buchón de agua debe de ser retirado, convirtiéndose en biomasa residual, pudiendo generar a partir de biogás, briquetas y bioetanol.

## 2. Aprovechamiento energético

El buchón de agua satisface todos los criterios para la producción de bioenergía siendo permanente, tiene un montón de plantas disponibles, no es de cultivo, es biodegradable y tiene alto contenido de celulosa; sin embargo, su fuerte desventaja es que tiene más contenido de agua del 90 %, lo que complica el proceso de recolección y procesamiento [10]. Al tener un bajo porcentaje lignina (10 %) y hemicelulosa (33 %), en comparación con otro tipo de fuentes (15 %-30 % de lignina y 20 %-40 de hemicelulosa) se puede acelerar el proceso de fermentación para la producción de bioetanol y biogás, dado que el bajo contenido de lignina es beneficioso, porque es una fibra que protege de la degradación química a la planta, pero no se convierte en azúcares pueden limitar la capacidad de la actividad microbológica durante el proceso de fermentación [10]. Los valores del poder calorífico para cada una de las partes de la planta son presentados en la tabla 1 [11]:

Tabla 1. Análisis químico de biomasa seca de *Eichhornia crassipes* [11].

Composición (seca en % masa)	Hojas	Tallos	Raíces
Celulosa	28.91	28.23	17.07
Hemicelulosa	30.8	26.35	15.25
Lignina	4.59	17.44	14.63
Proteína	20.97	6.8	2.6
Lípidos	1.79	0.91	0.47
Ceniza	12.95	20.26	49.97
Valor calorífico (kJ/g)	14.93	13.52	8.46

De acuerdo con la tabla 1, las partes más útiles para la extracción de glucosa son los tallos y las hojas, ya que el contenido de celulosa y hemicelulosa es alto. Sin embargo, las raíces son las más complejas de convertir en glucosa ya que tiene mucha ceniza (metales), la lignina es el elemento de la planta que hay que retirar para que permita la extracción de los otros elementos [11]. Para la obtención de briquetas, biogás o bioetanol, se debe realizar los procesos de secado, sabiendo que el buchón tiene un alto contenido de agua, se requiere alrededor de 49.85°C para secarla [16]. A continuación, se mencionan los

derivados energéticos del buchón de agua y sus procesos de obtención realizados por otras investigaciones.

## 2.1 Biogás

Para el estudio de la producción de biogás se tuvieron en cuenta los siguientes dos métodos, el primero en donde el biogás que se estudió fue netamente el generado por el buchón de agua y el segundo producido por una mezcla entre aguas residuales y buchonas de agua.

### 2.1.1 Biogás neto producido

Para la producción de este biogás se tienen dos etapas de producción, la primera donde se hace un pretratamiento a la fermentación y la segunda que es la fermentación como tal, se presentan de las siguientes maneras:

#### 2.1.1.1 Pretratamiento

Antes de convertir la biomasa en gas, hay que retirar lignocelulosa que cubre a la planta (que es la parte más compleja de convertir en gas), para ello existen varios solventes para hacer este proceso [12]. Para ello se utilizó 5 % (M/M) solución de *Eichhornia crassipes* que se preparó combinando 3.0 g de la planta con 51.0 g de IL (acetato de 1-etil-3-metilimidazolio) y 11.0 g de CO disolvente en frascos de 250 ml. La solución se calentó y se agitó en un recipiente de baño de aceite a temperaturas variadas (20-140°C) y se incubaron durante 60, 120, 150 y 240 min. Se usa el solvente DMC para las reacciones [12].

Luego, la muestra se centrifugó brevemente. Se separa el contenido de IL y CO disolvente para reutilizarlo. El resto de la mezcla se lava tres veces con adiciones de agua desionizada. Por último, se filtra y se seca a 45°C durante 48 h para luego fermentarlo y producir el gas [12]. Otro solvente es NaOH, se utiliza proporciones de 100 ml de este solvente para remover la lignina que protege la celulosa y la hemicelulosa con concentraciones del 0 a 5 %, se colocan en proporciones de 6 g de Jacinto de agua a 45°C durante 24h en un frasco tapado. Luego se pasa por un proceso de centrifugado [11].

#### 2.1.1.2 Fermentación

*Eichhornia crassipes* tiene biomasa con el potencial de producir  $\text{CH}_4$  y  $\text{H}_2$  a través de la fermentación. La celulosa y la hemicelulosa se pueden hidrolizar para reducirlo en azúcar, la cual puede ser fermentada por bacterias anaeróbicas para producir el biogás. Se ha estudiado el uso del  $\text{CH}_4$ , pero no ha habido estudios de  $\text{H}_2$ . Teóricamente una mol de *Eichhornia crassipes* puede producir cuatro moles de  $\text{H}_2$  y dos moles de  $\text{CH}_4$  producto de la fermentación anaeróbica oscura, la utilización de  $\text{H}_2$  es de 33,5 %, mientras que la utilización de  $\text{CH}_4$  es de 89 % [11]. Los sustratos de las hojas por tener celulosa y hemicelulosa más que lignina y ceniza, son fáciles de convertir en biogás por bacterias anaeróbicas. Pero las raíces son más difíciles de procesar debido a que contiene gran cantidad de metales pesados. Los tallos por su gran cantidad de celulosa e hidrocelulosa se pueden obtener glucosa y xilosa. El montaje del experimento se puede ver en la figura 1 [12].

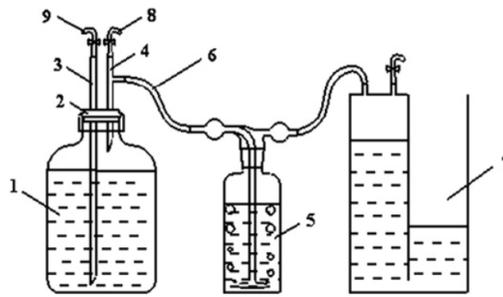


Figura 1. Reactor de experimentación para la producción de biogás a partir de *Eichhornia crassipes*. 1. Reactor de fermentación; 2. Tapón; 3. 4. Aguja de muestreo; 5. Solución de NaOH; tubo de sílice en gel; 7. Contenedores de gas; 8. Muestreo de gas; 9. Muestreo de líquido [11].

En un experimento las digestiones anaerobias se llevaron a cabo a 35°C en 250 botellas de vidrio, cerrados con juntas de goma. Se colocó en cada uno 100 ml de inóculo (suspensión de bacterias de cultivo), 8 g de Jacinto de agua sin tratar y 2 g de la mezcla producto del pretratamiento. Todas estas muestras se someten a diferentes rangos de temperatura y tiempo mostrados en la Figura 2 [12]. Las bacterias son propensas a los cambios de clima, para su óptimo desarrollo, se requiere una temperatura promedio entre 20 y 55°C. De lo contrario la reproducción bacteriana será deficiente. Estos procesos se recomiendan no dejarlo más de cuatro días, o de lo contrario empieza a disminuir la concentración de metano de hasta un 30 % de acuerdo a lo mostrado en la figura 2 [12].

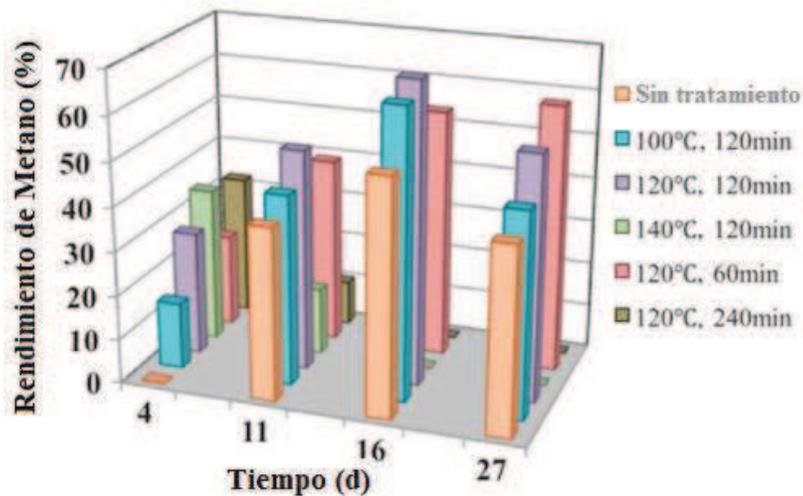


Figura 2. Concentración de gas metano y producción de biogás en varias condiciones [12].

### 2.1.2 Biogás producto de la mezcla de aguas negras y *Eichhornia crassipes*.

En el centro Tecnológico de Costa Rica (TEC) se ha investigado el uso de buchón de agua para aumentar la producción de metano a partir de aguas residuales con el proceso mostrado en la figura 3. Esta investigación se basa en estudios anteriores en los cuales se colocaban residuos animales (estiércol) con una mezcla de vegetales secos y triturados, dentro de ella al realizar la mezcla entre el estiércol y Jacinto de agua se determinó que

producen más metano, mientras que usar solamente estiércol disminuye la producción de metano debido a su alta concentración de nitrógeno [13].

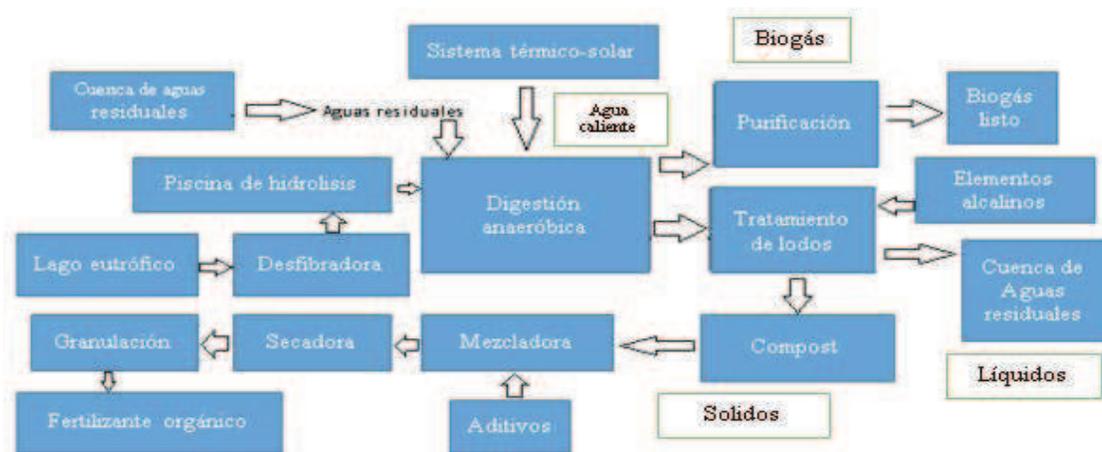


Figura 3. Diagrama de flujo de producción de gas a partir de aguas negras y buchón de agua [14]

El proceso es por digestión anaeróbica y participan cuatro grupos de bacterias:

- Las hidrolíticas, las cuales hidrolizan las moléculas complejas de la biomasa para formar ácidos grasos de cadena corta y alcohol.
- Las acetogénicas que producen acetato e hidrógeno.
- Las homoacetogénicas que convierte un amplio espectro de materia orgánica en ácido acético.
- Las metanogénicas que digieren la materia orgánica y devuelven los elementos básicos para volver a empezar el ciclo [13].

Sin embargo, las bacterias son propensas a los cambios de clima, para su óptimo desarrollo se requiere una temperatura promedio entre 20 y 55°C. De lo contrario la reproducción bacteriana será deficiente. Un decrecimiento súbito de temperatura podría reducir la producción de metano [13].

El nivel de pH, para que sea óptimo debe oscilar entre los 6.5 y 8. En el caso de la investigación el nivel de pH estuvo por debajo del promedio (6.28), lo que obtendrá una digestión anaeróbica incompleta desaprovechando parte del material. Otro inconveniente es que las aguas residuales son ricas en nitrógeno, obstaculizando la cantidad de producción de biogás [13].

Inicialmente se dispuso de cuatro biodigestores, los cuales serían puestos a prueba durante un periodo de dos meses y serían alimentados manualmente dos veces por semana. Las proporciones de material serán mostradas en la tabla 2. En los biodigestores 1 y 4 se alimentarían con una mezcla de aguas residuales y Jacinto de agua (este fue preparado secándolo durante tres días y después se pasa a un molino), mientras que los biodigestores 2 y 3 serían alimentados solamente con aguas residuales [13].

En el transcurso de los días se ve que en el biodigestor 1, hay un pico de producción de metano en 70 % (Día 49), pero se disminuye al 50 % al final de la prueba. Mientras los biodigestores 2 y 3 tuvieron un aumento creciente de metano de hasta el 40 %, pero tres días después el porcentaje de metano baja al 30 %. El biodigestor 4 mostró un crecimiento constante de hasta el 50 % [13]. En la tabla 2 y en la figura 5 [13]. se muestra el máximo porcentaje de metano en un día determinado de cada biodigestor.

Tabla 2. Disposición de material para la producción de metano a partir de aguas residuales en los biodigestores y picos de mediciones de metano en % (promedio de temperatura 19.5°C durante 60 días) [13].

Bio-digestores	Agua residual en litros	Lirios seco y triturado en gramos	Día de mayor porcentaje de metano	Porcentaje pico	Porcentaje promedio de producción
1	7.8	200	49	70 %	50 %
2	8	---	52	40 %	30 %
3	8	---	52	40 %	30 %
4	7.8	200	55	50 %	40 %

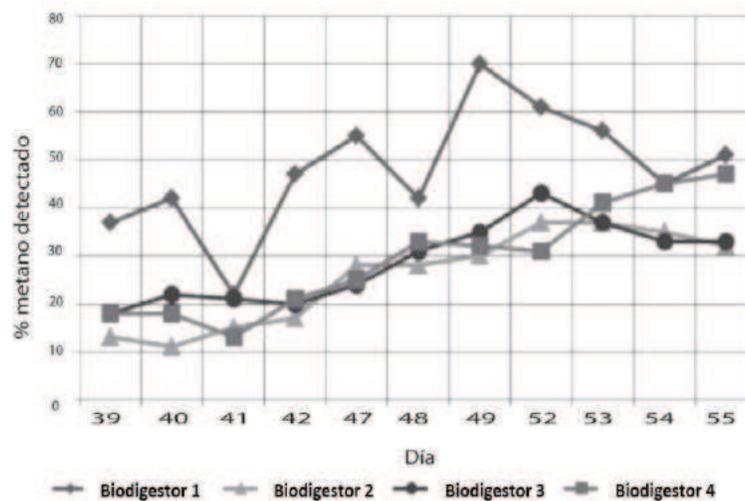


Figura 4. Niveles de porcentaje de metano por días [13]

Los estudios evidencian que hay un aumento relativo si se llegan a mezclar vegetales como el buchón de agua con desechos humanos. Sin embargo, la producción por estar dependiendo del clima tiene picos muy variados de producción. Al analizar más los biodigestores 1 y 4 se descubre que el proceso tuvo una digestión anaeróbica ineficiente a pesar de tener más picos de producción. Esto se debe a la dependencia del clima, el grado de contaminación del agua y el nivel de pH. Se concluye que para una mayor producción se recomienda tiempos más largos de biodigestión, temperaturas constantes, pH óptimos y se estudia la posibilidad de mezclar otros tipos de desechos [13].

## 2.2 Briquetas de *Eichhornia crassipes* para centrales eléctricas

Las briquetas, que son una densificación de biomasa, han sido usadas en muchos países por varios años. Al ser más densas las briquetas tienden a desprender más energía

que si se fuera a quemar biomasa solida normal. Una de las razones del desarrollo de las briquetas a nivel industrial, ha sido la eficiencia de aprovechamiento energético, el ahorro que supone en lugar de aplicar diversos tipos de combustión dependiendo del material [10]. La preparación de las briquetas de buchón de agua con residuos es la siguiente: se seca al sol durante siete días, se pasa por un proceso de molienda y mezcla con los residuos tal como lo muestra la figura 5.

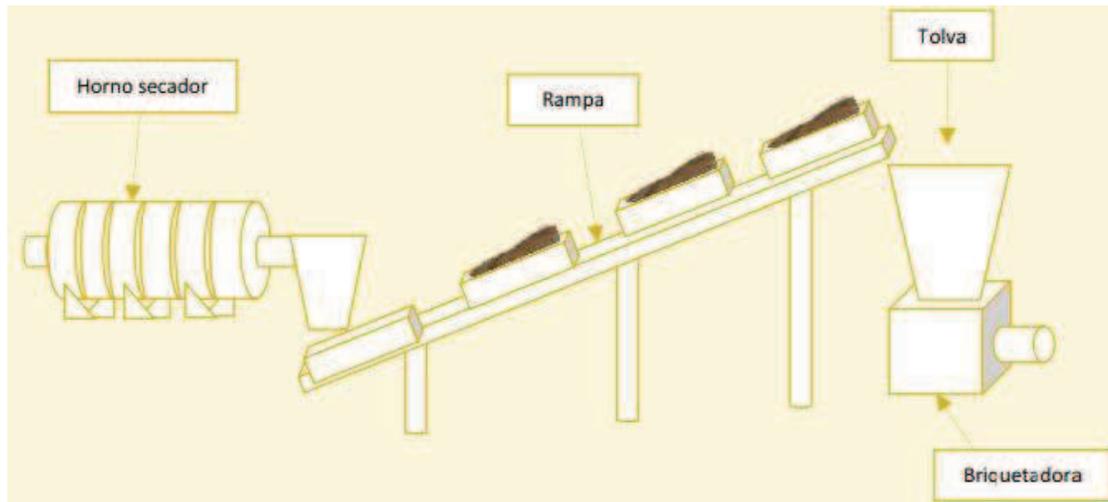


Figura 5. Proceso de briquetado [15]

Con esto reduce hasta un 50 % su volumen. Después se prensa manualmente a 20 t quedando como producto final unas briquetas de 0.5 cm de alto y 4.7 cm de diámetro. Su eficiencia energética esta alrededor del 28.17% mientras que el carbón tiene una eficiencia del carbón es de 31.29 % [16]. El poder calorífico obtenido es de 3.3629 kcal/kg y genera una compresión máxima de 4545 N [10]. El poder calorífico del carbón es de  $6552.00 \pm 4.73$  kcal/kg y el poder calorífico de la leña es de  $4166.67 \pm 4.33$  kcal/kg [16]. Los resultados confirman la posibilidad de utilizar briquetas de buchón de agua en las plantas eléctricas, aunque su poder calorífico es menor que el carbón mineral y el carbón de madera [10].

### 2.3 Bioetanol

Así como en la producción de bebidas alcohólicas, que se realiza de diferentes maneras, la producción de bioetanol a base de biomasa se puede efectuar por medio de distintas rutas tecnológicas, con ventajas y desventajas distintas. El bioetanol se destaca por ser la alternativa con mayor madurez y por su efectiva inserción en las matrices energéticas de diversos países. En 2006, el bioetanol representó una oferta energética cercana a un 3 % de la demanda mundial de gasolina y más de diez veces superior a la producción de biodiesel observada en el mismo período [17]. Existen varios preprocesos para la obtención de azúcares de *Eichhornia crassipes* tales como la hidrólisis enzimática, hidrólisis química, entre otros. El azúcar obtenido se pasa a un proceso de fermentación donde se obtendrá el etanol y por último pasa a un proceso de destilación [7]. Tal como se muestra en la figura 6.

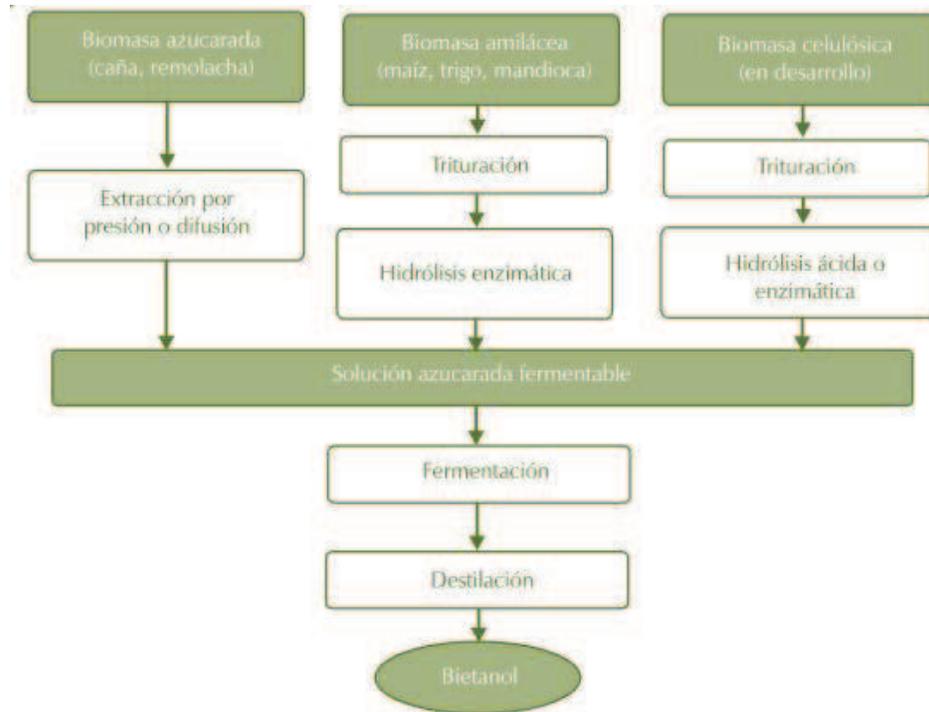


Figura 6. Fases de la producción de bioetanol [17].

### 2.3.1 Hidrólisis

Uno de los inconvenientes en la hidrólisis de esta planta es que posee muchas estructuras de celulosa cristalinas, ya que químicamente se dificulta su proceso. La hemicelulosa es fácilmente hidrolizable, pero su carbono principal, la xilosa, es difícil de fermentar en alcohol. Por último, la lignina no se puede convertir en etanol, porque no es un carbohidrato, sino un polímero rígido aromático. La hidrólisis es un proceso por el cual se separa la glucosa o el azúcar del resto del material orgánico a través de un proceso químico o biológico. Dependiendo del tratamiento de hidrólisis estas se le agregan ácidos, bases o levaduras para llevar a cabo su hidrolización [7].

### 2.3.2 Hidrólisis ácida

Se pueden aplicar dos tipos de hidrólisis ácida, la hidrólisis con ácidos concentrados, la cual consiste en añadir ácido sulfúrico al material seco a 50°C, luego se agrega agua a 100°C para diluir el ácido. El producto final se seca y se comprime para posteriormente separar la mezcla de ácidos y azúcares. Una de las ventajas es el de tener una alta eficiencia al recuperar el azúcar (alrededor del 90 %). Desafortunadamente es un proceso lento y costoso [7].

El otro método consiste en la hidrólisis con ácidos diluidos. Esta consiste en utilizar una proporción mucho menor de ácido sulfúrico (entre 0.7 y 1 %) a 190°C. Celsius En el caso de hidrolizar la hemicelulosa se usa una concentración de ácido sulfúrico de 0.4 % a 215°C. El producto se neutraliza y se recupera a través de la percolación. Sin embargo, solo tiene una recuperación del 50 % (Figura 7) [7].

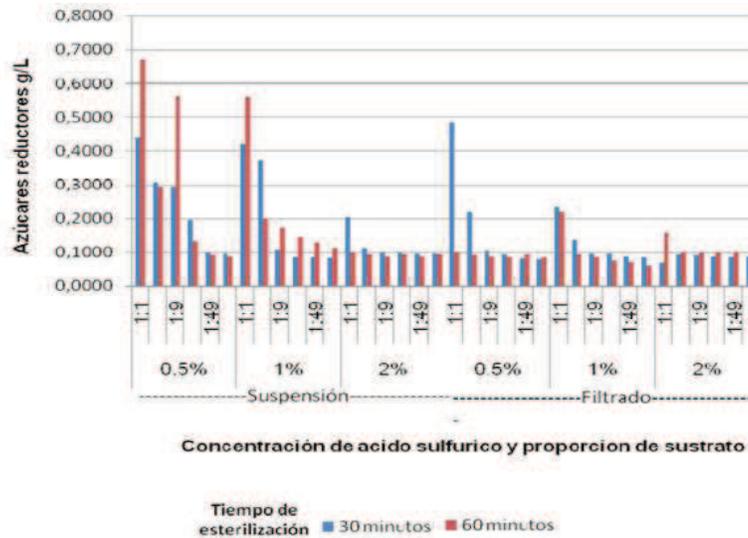


Figura 7 . Hidrólisis con ácido sulfúrico en distintas concentraciones y tiempos.

Sin embargo, se ha demostrado que la fermentación usando hidrólisis ácida puede ser más complejo debido a que en las reacciones químicas generar sustancias tóxicas que inhiben a las células, afecta al crecimiento específico de células y el rendimiento de masa por ATP. Para muchos autores, la hidrólisis ácida es de bajo rendimiento y además genera muchos subproductos tóxicos [7]. Aquí se muestra la producción de azúcar dependiendo de las concentraciones de ácido sulfúrico, del tiempo y temperaturas a las que las muestras fueron sometidas, figura 7.

### 2.3.3 Hidrólisis alcalina

A diferencia de la hidrólisis química ácida, se utilizan bases tales como el hidróxido de sodio del 5 al 10 % (M/V). Se esterilizan con diferentes tiempos de ácidos de 30 a 60 minutos, y luego se neutraliza con agua. Sin embargo, se ha demostrado que tiene una producción menor que la hidrólisis ácida, a pesar de que no genera subproductos tóxicos. Esto se debe a que el alcalino utilizado (NaOH) conlleva a un hinchamiento que no necesariamente conlleva a una hidrólisis ni modifica su composición química. Aquí se muestran algunos resultados tendiendo como variante el tiempo, figura 8 [7].

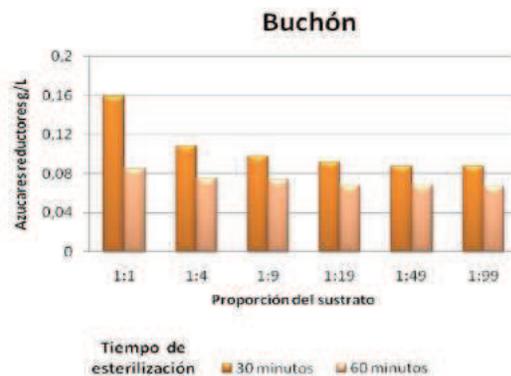


Figura 8 . Hidrolisis con hidróxido de sodio [7].

### 2.3.4 Hidrólisis enzimática o biológica

Existen dos métodos para la extracción de azúcar, la fermentación y sacarificación separado (SHF) y la fermentación y sacarificación simultánea (SSF). No ha sido aplicada la SSF, pero tiene grandes posibilidades de mejora. Uno de los microorganismos que interviene en este proceso es el *Saccharom* y el *cescerevisiae*, que convierte las hexosas en etanol, lo mismo pasa con el *E. coli* con resultados similares [18]. Hay otro tipo de hongos anaeróbicos que tiene la facultad de degradar las ligninas en etanol a través de complejos celulíticos. Una de las ventajas que tiene la hidrólisis enzimática es su bajo costo a diferencia de la hidrólisis química [7].

Otro método de hidrólisis biológica es utilizar el hongo *Pleurotusostreatus* que al dejarlo actuar por diez días obtiene los niveles máximos de azúcar [7]. La siguiente figura 12 muestra que la mayor producción de azúcar se produce en concentraciones del 10 % y a los diez días. De dejarse más tiempo se empieza a reducir la producción de azúcar.

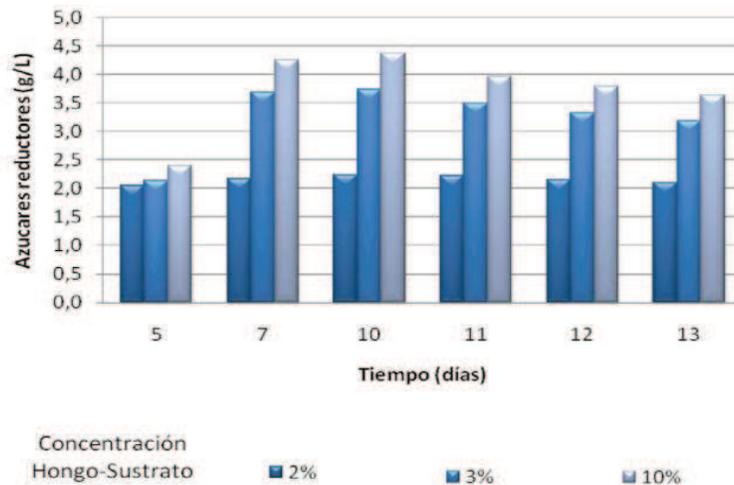


Figura 9. Hidrólisis biológica con la levadura Secharon [7]

### 2.3.5 Fermentación

Este proceso se lleva a cabo por microorganismos tales como hongos, levaduras y bacterias de tipo aeróbico o anaeróbico, mesófilos o termófilos, que fermentan los azúcares. Gracias a la enzima inversada presente en los azúcares, lo convierte en glucosa y fructosa. Esta a su vez reacciona con otras enzimas llamadas zimasa que también están presentes en la levadura, produciendo el etanol y el dióxido de carbono [7].

### 2.3.6 Resultados de comparativos de hidrólisis y fermentación

Comparando todos los resultados para la producción de azúcar ha sido la hidrólisis biológica con el hongo *Pleurotusostreatus* la que obtuvo los mayores resultados, a los diez días de incubación generó la mayor cantidad de azúcar, después paulatinamente empezaba a disminuir. El promedio de producción fue de 55.303 g/l. En los procesos de fermentación los que se recomienda fueron las levaduras *albicans* y *C. lusitanie*.

### 3. Análisis comparativo de las fuentes energéticas derivadas de *Eichhornia crassipes*

Los biocombustibles producidos a partir de la *Eichhornia crassipes* son muy variados tanto en productos, como en tratamiento. La cuestión es ¿cuál es la mejor aplicación bioenergética del buchón de agua? Para poderlo analizar más a fondo hay que conocer primero toda la región que se quiere aplicar, las necesidades que se planea cubrir y los sectores económicos que pueden salir beneficiados. Un ejemplo de ello es que las industrias que estén más cerca hagan uso de este recurso disminuyendo costos y volviendo más eficaz su producción. También hay que tener en cuenta que hay uno o varios productos de esta biomasa que sobresale de los demás por el sector económico, por su procesamiento y su transporte. Como primer paso se hace una comparación de todos los biocombustibles de esta planta. Después se hizo un análisis económico de la región consultando las alcaldías de los municipios que rodean a esta laguna. Seguidamente se estudia cuál es el sector líder de la región y cuál biocombustible es el indicado. No es lo mismo un combustible para la industria ladrillera (que básicamente usa combustible sólido como el carbón) que la industria alimentaria (que en la mayoría de los procesos usa gas y diésel). Como primer paso, hay que hacer una comparación de todos los biocombustibles a base de *Eichhornia crassipes* que se han descrito hasta ahora y descartar los que tienen más inconvenientes, en otras palabras analizar las fortalezas y debilidades de cada uno de ellos. A continuación, en la tabla 3 se observan todos los tratamientos y productos energéticos de esta planta vistos hasta ahora.

Tabla 3. Tabla comparativa de producción energética derivadas de *Eichhornia crassipes* (por los autores)

CARACTERÍSTICAS FUENTE	PROCESO DE PRODUCCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
BIOGÁS	Digestión Anaeróbica Retiro de Lignocelulosa con agua ionizada o Hidróxido de Sodio Fermentación anaerobia	Reducción de emisiones de CO <sub>2</sub> en procesos de combustión. Reducción de metano a la atmosfera.	El elevado contenido de sulfuro de hidrógeno, puede llegar a tener inconvenientes en la utilización de motores. La utilización de ácidos puede ser un residuo contaminante Genera residuos sólidos
BRIQUETAS	Astillado	Tiempo corto de producción una vez la materia prima esté lista. Puede usarse para generar calor para calefacción.	Al tener una humedad elevada, puede presentar condensaciones a la salida de la combustión. Bajo poder calorífico comparándolo con otros combustibles de esta planta
BIOETANOL	Hidrólisis biológica Hidrólisis química Fermentación [19, 20, 21, 22].	Combustible que tiene muchos usos industriales y de transporte. Máximo aprovechamiento de la biomasa. Múltiples formas de producción.	Su poder calorífico es menor al de la gasolina. Algunos procesos de hidrolización son costosos Procesos largos

## 4. Propuesta energética de la *Eichhornia crassipes* en la laguna de Fúquene

La laguna de Fúquene constituye una fuente de sustento y seguridad alimentaria para más de 200 familias, pero desafortunadamente por causa de la contaminación se acumulan grandes cantidades de nutrientes que permiten el crecimiento de maleza acuática como buchón de agua [7].

A continuación, en la tabla 4 se puede observar la información de la laguna de Fúquene:

Tabla 4. Descripción laguna de Fúquene (por los autores)

UBICACIÓN	Se ubica en el sistema hídrico de los ríos Ubaté y Suárez en el departamento de Cundinamarca.
GEOGRAFÍA	<b>Descripción física:</b> Cuenta con una superficie de 3150 hectáreas, con una profundidad media de 2 m y un volumen de $50 \times 10^6 \text{ m}^3$ [7]. <b>Límites del municipio:</b> Limita con Ubaté, Susa, Guachetá y el departamento de Boyacá. <b>Altitud (metros sobre el nivel del mar):</b> 2539 <b>Temperatura media:</b> 13° C
ECOLOGÍA	Se presenta un problema ambiental dado a la disminución del 70 % de la extensión de la laguna por el avance de la frontera agrícola y las descargas de aguas residuales domésticas e industriales de los habitantes de 14 municipios [7].
ECONOMÍA	Las principales actividades económicas de Fúquene y sus alrededores son la agricultura, la minería carbonera, la ganadería el desarrollo agroindustrial y la pesca, sin nombrar el procesamiento de productos lácteos como fuente principal del sector junto con actividades secundarias como el turismo y las artesanías [7, 23].

El panorama de la laguna de Fúquene es un perfecto escenario para la producción de biogás mediante la mezcla de aguas residuales o heces de animales con la *Eichhornia crassipes*, teniendo en cuenta los requerimientos propuestos en el numeral 2.2.1 de tiempos más largos de biodigestión, temperaturas constantes, pH óptimos y mezclas con otros residuos [13]. Con la mezcla propuesta para obtener biogás se busca disminuir el impacto ambiental de la laguna y generar calor para usarse en la industria de los lácteos, fuente de economía primaria en la región. La demanda de calor en la industria de lácteos es considerable en procesos como la pasteurización, donde se lleva la leche mediante un calentamiento progresivo hasta 85°C seguido de un enfriamiento hasta 4°C [24]. Se busca usar el biogás en quemadores de calderas para generar calor en la industria. Otra aplicación energética del Buchón de agua son las briquetas para el área de las artesanías en los hornos y como nicho de combustión en labores de calefacción. A continuación, se realiza un análisis del aprovechamiento energético que se puede realizar con el Buchón de agua de la laguna de Fúquene para la producción de biogás y briquetas, según los datos mostrados en la tabla 5.

Tabla 5. Superficie observada del agua y el buchón de agua entre 1955 y 2007 [5].

Año	Agua km <sup>2</sup>	Buchón km <sup>2</sup>
1955	27.1	4.0
1956	26.8	4.3
1978	21.8	9.3
1982	21.0	10.1
1983	20.4	10.8
1989	19.3	11.9
1992	17.2	13.9
2007	9.7	21.5

Teniendo el comportamiento estadístico de la tabla 5 se puede estimar el valor de Buchón de agua en km<sup>2</sup> para el 2015, generando un gráfico de dispersión con su respectiva línea de tendencia, esto se puede observar en la figura 10.

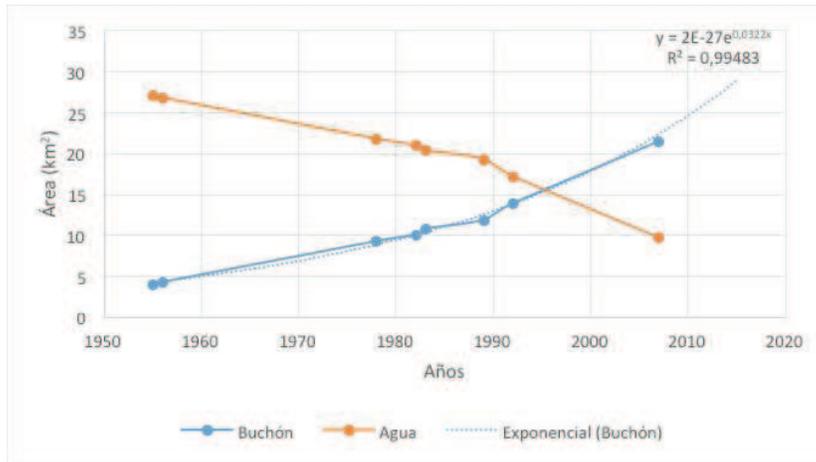


Figura 10. Análisis de tiempo vs. crecimiento de Buchón de agua entre 1955 y 2007, con proyección 2015.

Por medio de una regresión exponencial, definida por la función  $y = 2 \cdot 10^{-27} e^{0.0322x}$  y con coeficiente de determinación de **0.9948**, se estima para el año 2015 el área aproximada de Buchón de agua sea de 30.19 km<sup>2</sup>. Sabiendo que la profundidad promedio de la Laguna de Fúquene es 2 m, se estima un volumen aproximado de 60230 m<sup>3</sup>. La densidad promedio de la *Eichhornia Crassipes* es de 67.5 kg/m<sup>3</sup> [25].

#### 4.1 Producción de briquetas de Buchón de agua (*Eichhornia crassipes*) de la Laguna de Fúquene

Para producir briquetas se debe tener presente que al moler y secar el buchón de agua pierde un 50 % de su volumen, por tanto la cantidad de Buchón de agua disponible para producción en la Laguna de Fúquene es de 30610 m<sup>3</sup> y el poder calorífico de las briquetas es de 3.3629 kcal/kg o 14.0798 kJ/kg. Es importante resaltar que el poder calorífico del carbón es de 32.8 kJ/kg [26], comparándolo con el del buchón corresponde a la mitad dando una pauta que podría utilizarse como alternativa al carbón, produciendo menos energía pero ayudando al medio ambiente. Usando la densidad obtenemos la cantidad de masa de buchón de agua en la Laguna de Fúquene:

$$\frac{67.5 \text{ kg}}{\text{m}^3} \cdot 30160 \text{ m}^3 = 2035800 \text{ kg}$$

Con la masa obtenida y el poder calorífico se puede calcular la energía estimada producida por las briquetas, con la ecuación 1.

$$E = m \cdot Pc \quad (\text{Ecuación 1}) [26]$$

donde

$E$ : Energía producida.

$m$ : Cantidad de masa de una sustancia.

$Pc$ : Poder calorífico de la sustancia.

$$\text{por tanto, } E = 2035800 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \cdot 14.0798 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$E = 28663.6568 \text{MJ}$$

La cantidad aproximada de energía producida por las briquetas es de 28663.6568 MJ para el año 2015 según las estimaciones que se hicieron con la figura 10.

#### 4.2 Producción de biogás por Buchón de agua (*Eichhornia crassipes*) en la laguna de Fúquene

Para la producción de biogás se tiene en cuenta la siguiente información estimada sobre el Buchón de agua, recopilada a lo largo del artículo:

Tabla 6. Información de Buchón de agua para la producción de biogás en la Laguna de Fúquene

Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	67.5
Volumen en la laguna de Fúquene [m <sup>3</sup> ]	60230
Masa en la laguna de Fúquene [kg]	4065525
Composición química [%]	55 CH <sub>4</sub> 2.5 H <sub>2</sub> S 2.5 H <sub>2</sub> 40 CO <sub>2</sub>
Relación de uso agua residual [m <sup>3</sup> ] / Buchón de agua [kg]	0.0078/0.2

Con la información tomada de la tabla 2. Como base de un análisis primario, sabemos que el biodigestor 5 a pesar de los problemas de la temperatura de biodigestión y el pH, tuvo el mejor comportamiento lineal en el aumento de metano con el pasar de los días, hasta llegar a su mayor porcentaje de metano que fue 55 % (Porcentaje expresado en la tabla 6). Se puede calcular el poder calorífico superior (PCS) y el poder calorífico inferior (PCI) aproximado del biogás a partir de las siguientes expresiones [27]:

$$PCS = 39.71m \text{ kJ}/Nm^3 \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$PCS = 3500m \text{ kcal}/Nm^3 \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$PCIV = 35.78m - 1.81w \text{ kJ}/Nm^3 \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$PCIV = 3260m - 434w \text{ kcal}/Nm^3 \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde  $m$  es el tanto por uno en volumen de metano.

$w$  es el tanto por uno de volumen de vapor de agua.

La investigación no suministra el porcentaje de vapor de agua producido por eso inicialmente solo se calculará el , sabiendo que el tanto por uno de metano mayor producido por el biodigestor 5 es 0.55 se tiene:

$$PCS = 39.71(0.55)V$$

$$PCS = 21.8402 \text{ MJ}/Nm^3 = 5225 \text{ kcal}/Nm^3$$

Para obtener el poder calorífico en unidades de MJ/kg es necesario averiguar la fórmula molar del biogás, la cual fue calculada con base libre de CO<sub>2</sub> y con una base de cálculo

de 100 kg de biogás. La composición química del biogás con base libre de CO<sub>2</sub> será de 91.667% CH<sub>4</sub>; 4.1667% H<sub>2</sub>S; 4.1667% H<sub>2</sub>. Con esta información se obtuvieron los datos mostrados en la tabla 7.

Tabla 7. Resultados de biogás con base libre de CO<sub>2</sub>.

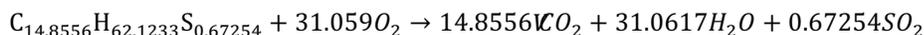
Fórmula molar	C <sub>14.8556</sub> H <sub>62.1233</sub> S <sub>0.67254</sub>
Masa promedio biogás [Kg]	16.2061
Agua residual estimada para mezclar con el buchón de agua en la Laguna de Fúquene [m <sup>3</sup> ]	23489.7

Para el cálculo del agua residual estimada para mezclar con el buchón de agua se utilizó la masa de Buchón de agua en la Laguna de Fúquene y la relación agua residual/Buchón de agua, como se indica en la tabla 6. Con la masa promedio del biogás se puede calcular el poder calorífico en términos de MJ/kg de la siguiente forma:

$$PCS_{C_{14.8556}H_{62.1233}S_{0.67254}} = 21.8402 \frac{MJ}{Nm^3} \cdot \frac{22.414 Nm^3}{1 Kmol_{C_{14.8556}H_{62.1233}S_{0.67254}}} \cdot \frac{1 Kmol_{C_{14.8556}H_{62.1233}S_{0.67254}}}{16.2061 Kg} = 30.2063 \frac{MJ}{kg}$$

El PCS 30.2063 MJ/kg es el estimado usando los parámetros del experimento indicado en el numeral 2.2.1, el metano es el combustible fósil que más se asemeja al biogás, tiene un PCS de 55 MJ/kg y PCI 50MJ/kg [28]. Se podría estimar con la proporción de los poderes caloríficos del metano el PCI del biogás, dado que en el metano el poder calorífico inferior es equivalente aproximadamente al 91 % del superior, por tanto el poder calorífico inferior del biogás sería de un valor cercano a 27.4877MJ/kg. Comparando los poderes caloríficos, el del biogás equivale al 55 % del metano.

Por último se presenta la reacción química balanceada para hacer combustión completa con el biogás:



## 5. Conclusiones

Sin duda alguna la *Eichhornia crassipes* presenta diversas formas de producción de energía en biogás, bioetanol y briquetas. Aunque su porcentaje de humedad es de un 95.5 %, procesos como la digestión anaeróbica, fermentación, astillado e hidrolisis, se encargan de convertirla en un recurso energético de primera mano.

Se postula como energía alternativa, como una biomasa para producir un combustible de segunda generación (en el caso del biogás o el etanol) proveniente de una maleza natural que busca principalmente usarse para calefacción o producción de biocombustibles; pensando en áreas rurales cercanas a donde crece la *Eichhornia crassipes* no conectadas a redes eléctricas o en la misma industria, esto gracias a su rápido crecimiento y reproducción.

Con los estudios estimados de la producción de briquetas y biogás en la laguna de Fúquene, realizando un estudio a profundidad con valores veraces, se puede llegar a

evaluar la posibilidad de empezar a utilizar las briquetas en lugar del carbón, dado que estas equivalen al 43 % del poder calorífico del carbón, pero producen una combustión más limpia, a su vez el biogás estimado equivale al 55 % del Metano.

Para la producción de biogás en la laguna de Fúquene es necesario tener una nueva investigación donde se evalúen los temas de la acidez de los desechos de la laguna, clasificarlos y determinar cuáles son aptos para la combinación con la *Eichhornia crassipes*, a su vez las cantidades disponibles para la producción de energía junto con parámetros de temperaturas controladas para la biodigestión y la correcta selección de biodigestores; buscando producir un biogás adecuado para quemadores industriales que cumplan con la demanda de calor en la región y sus alrededores.

## Bibliografía

- [1] UPME, «SIEL (Sistema de información Eléctrico Colombiano)». Diciembre 2015. [En línea]. Available: [www.siel.gov.co/portals/0/generacion/2015/Seguimiento\\_Variables\\_Diciembre\\_2015.pdf](http://www.siel.gov.co/portals/0/generacion/2015/Seguimiento_Variables_Diciembre_2015.pdf). [Último acceso: mayo 2016].
- [2] W. K. S. R. Alexander Gómez, «Universidad Kassel.» 2008. [En línea]. Available: [www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-89958-457-8.volltext.frei.pdf](http://www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-89958-457-8.volltext.frei.pdf). [Último acceso: 25 de abril de 2016].
- [3] P. Basu, «Chapter 2 Biomass Characteritics,» de *Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory*, Amsterdam, Boston, Heidelberg, London, San Francisco, Singapore, Sydney, Tokyo, New York, Oxford, Paris, San Diego, Elsevier, 2010, p. 29.
- [4] L. T. T. D. Juan-Guillermo Reales Alfaro, «Acid Hydrolysis of Water Hyacinth to Obtain Fermentable Sugars,» *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro*, vol. 5, n.º 2, pp. 101-102, 2013.
- [5] S. B. Sanint, *Modelado de especies invasoras, caso de estudio: pérdida del espejo de agua en la laguna de Bogotá D.C.*, Bogotá D.C: Pontificia Universidad Javeriana, 2010.
- [6] Universidad Francisco de Paula Santander, «Aplicación de la técnica fotoacústica resuelta en tiempo al monitoreo de la fotosíntesis en plantas de lirio acuático,» vol. 1, n.º 1, 2008.
- [7] M. Z. P. MELISSA VANEGAS, *Aislamiento de levaduras capaces de producir alcohol a partir de macrofitas acuáticas extraídas mecánicamente de la laguna de Fúquene*, Bogotá, Pontificia Universidad Javeriana.
- [8] S. H. S. Y. J. G. W. S. G. L. Qing Zhou, «Impacts of *Eichhornia Crassipes* (Mart.) Solms Stress on The Physiological Characteristics, Microcystin Production and Release of *Microcystis Aeruginosa*,» *Biochemical Systematics and Ecology*, vol. 55, pp. 148-155, 2014.
- [9] W. M. H. Ana Karina Bacca Vega, *Estudio de los efectos hidráulicos causados por la planta acuática *Eichhornia crassipes* localizada en la superficie del agua en canales abiertos*, Bogotá: Universidad de La Salle, 2007.
- [10] M. P. M. F. M. D. A. R. S. F. M. S. S. C. Shahabaldin Rezanian, «The diverse Applications of Water Hyacinth With Main Focus on Sustainable Energy and Production for New Era: An Overview,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, p. 943-954, 2015.
- [11] B. X. J. Z. S. K. C. Jun Chenga, «Cogeneration of H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> from Water Hyacinth by Two-Step Anaerobic,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, p. 3029-3035, 2010.
- [12] L. C. Z. Y. Jing Gao, «Effect of Ionic Liquid Pretreatment on the Composition, Structure and Biogas Production of Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*),» *Bioresource Technology*, vol. 132, pp. 361-364, 2013.
- [13] O. R. S. Rossy Guillén Watson, «Producción de metano a partir de desechos orgánicos generados en el Tecnológico de Costa Rica,» *Tecnología en Marcha*, vol. 25, n.º 2, pp. 73-79, 2011.
- [14] M. M. C. Zanzin Wang, «Environmental and Economic Analysis of Application of Water Hyacinth for Eutrophic Water Treatment Coupled With Biogas Production,» *Journal of Environmental Management*, vol. 110, 2012.
- [15] M. E. G. Alama, *Diseño de proceso y de planta piloto para fabricación de briquetas de aserrín*, Piura: Universidad de Piura, 2014.
- [16] O. A. D. U. S. M. Rotimi Moses Davies, «Combustion Characteristics of Traditional Energy Sources and Water Hyacinth Briquettes,» *Environmental Science (ijsres)*, vol. 1, 2013.
- [17] Coordinación – BNDES e CGEE, «Bioetanol de la caña de azúcar. Energía para el desarrollo sostenible,» *BNDES*, vol. 1, p. 320.
- [18] M. K. S. S. S. I. M. F. D. Mishima a, «Ethanol Production from Candidate Energy Crops: Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and Water Lettuce (*Pistia Stratiotes L.*),» *Bioresource Technology*, vol. 99, p. 2495-2500, 2008.

- [19] Alcaldía de Fúquene, «Página de la Alcaldía de Fúquene,» 2013 7 21. [En línea]. Available: [www.fuquene-cundinamarca.gov.co/informacion\\_general.shtml#economia](http://www.fuquene-cundinamarca.gov.co/informacion_general.shtml#economia). [Último acceso: 8 3 2015].
- [20] Alcaldía de Simicaja, 12 2 2011. [En línea]. Available: [www.simijaca-cundinamarca.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.simijaca-cundinamarca.gov.co/informacion_general.shtml). [Último acceso: 8 3 2015].
- [21] Alcaldía de Sutamarchán, 27 2 2007. [En línea]. Available: [www.sutamarchan-boyaca.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.sutamarchan-boyaca.gov.co/informacion_general.shtml). [Último acceso: 8 3 2015].
- [22] Alcaldía de San Miguel, «Página del municio de San Miguel,» 23 7 2012. [En línea]. Available: [www.sanmigueldesema-boyaca.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.sanmigueldesema-boyaca.gov.co/informacion_general.shtml). [Último acceso: 8 3 2015].
- [23] Alcaldía de Ráquira, «Pagina del municipio de Ráquira,» 2013 04 23. [En línea]. Available: [www.raquira-boyaca.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.raquira-boyaca.gov.co/informacion_general.shtml). [Último acceso: 8 3 2015].
- [24] A. F. C. Narváez, «Universidad Nacional de Colombia», 2003. [En línea]. Available: [www.bdigital.unal.edu.co/1183/1/alva-rofranciscocabreranarvaez.2003.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/1183/1/alva-rofranciscocabreranarvaez.2003.pdf). [Último acceso: 10 03 2015].
- [25] D. P. Ortiz González, F. Andrade Fonseca, G. Rodríguez Niño y L. C. Montenegro Ruiz, «Biomateriales sorbentes para la limpieza de derrames de hidrocarburos en suelos y cuerpos de agua» *Ingeniería e Investigación*, vol. 26, n.º 2, 2006.
- [26] Y. A. Cengel y M. A. Boles, *Termodinámica*, México: McGraw-Hill, 2012.
- [27] M. G. Lluís Jutglar, *Termotecnia*, México: Alfaomega, 2014.
- [28] J. González Velasco, *Energías renovables*, Barcelona: Editorial Reverté, 2009.
- [29] UPME, «SIEL (sistema de información eléctrico colombiano)», diciembre 2015. [En línea].