

Determinación de curvas de secado y poder calorífico del jacinto de agua para su uso en calderas

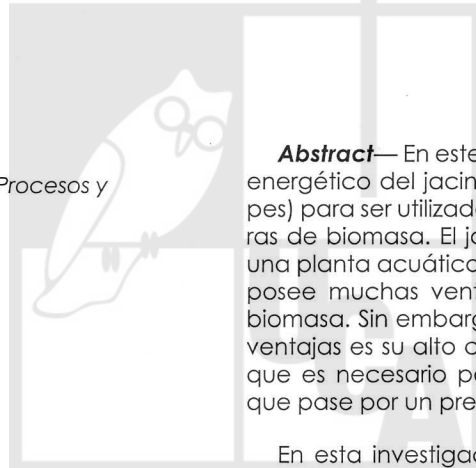
Alemán, Luis

Bará, André

Rovira, María Dolores

Departamento de Ingeniería de Procesos y
Ciencias Ambientales

Universidad Centroamericana
José Simeón Cañas, El Salvador.
mrovira@uca.edu.sv



Abstract— En este estudio se evalúa el potencial energético del jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) para ser utilizado como combustible en calderas de biomasa. El jacinto de agua, al tratarse de una planta acuática con alta tasa de crecimiento, posee muchas ventajas para ser utilizada como biomasa. Sin embargo, una de sus principales desventajas es su alto contenido de humedad, por lo que es necesario para su uso como combustible que pase por un pretratamiento térmico.

En esta investigación se realizó un secado por convección natural del jacinto de agua dispuesto en pilas de secado a alturas de 10, 25 y 40 cm y por un periodo de 15 días. Por otra parte, se contempló el efecto del volteo en las pilas de secado, para determinar si esta acción disminuía el tiempo en que se pierde la humedad. Además, se evaluó

si cortar la raíz reduce dicho tiempo. De los resultados, se determinó que las plantas dispuestas a una altura de 10 cm tardaron menos en secarse (alrededor de 7-13 días), seguidas por las de 25 cm (12-13 días) y por último las de 40 cm (11-15 días), en todas las configuraciones se observó que el uso del volteo no influyó de manera significativa. De forma similar, se determinó que el corte de raíz solo fue relevante para las pilas de secado con altura de 10 cm.

Adicionalmente, se evaluó el poder calorífico del jacinto de agua, el cual fue de 13.232.00 J/g y se determinó que el tallo es el componente que más poder calorífico aporta debido a que típicamente compone el 67% de la planta. Adicionalmente, se comparó el poder calorífico del jacinto de agua frente a otras biomásas como el bagazo de caña de azúcar, la cascarilla de café, switchgrass y King grass, con los cuales se determinó que el jacinto de agua posee un poder calorífico muy cercano a éstos con una variación de 5,000-6,000 J/g, por lo que se demostró su viabilidad para ser utilizado como combustible en calderas.

Palabras clave – Jacinto de agua, biomasa, curvas de secado, poder calorífico.

Introducción

Según Jafari [2010], la biomasa es aquella materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los residuos y desechos orgánicos, susceptible de ser aprovechada energéticamente [1]. En El Salvador las principales fuentes de biomasa para la generación de combustibles de calderas son la leña, el bagazo de caña de azúcar, la

cáscara de café y la cáscara de arroz [2]. Sin embargo, se pueden evaluar otras biomásas como el jacinto de agua. La *Eichhornia crassipes*, comúnmente llamada en El Salvador jacinto de agua o lírio acuático, es una planta nativa del Neotrópico, originaria de la cuenca del Amazonas en Brasil. Esta especie se ha convertido en la peor maleza acuática del mundo ya que se extiende desde su nativa América del Sur y se produce en los lagos, ríos de movimiento lento y pantanos del mundo entre 40°N y 40°S [3].

Según Bhattacharya & Kumar [4], la planta es muy difícil de erradicar por medios físicos, químicos y biológicos ya que es una especie muy resistente y como consecuencia de esto provoca la obstrucción de los canales de riego que afectan el flujo de agua a los campos, se enredan en los rotores de lancha dificultando la pesca, y hace que cualquier lugar sea inhabitable y poco accesible. Si está presente en embalses puede bloquear turbinas hidroeléctricas causando enormes daños[5].

Según Bhattacharya & Kumar[4], B. Karki [6], Keith & Hans-Martin [7] y Mukherjee & Nandi [8], el jacinto de agua satisface todos los criterios para la producción de bioenergía. Entre ellos se puede mencionar: Vegetación perenne con alto crecimiento, alto contenido de celulosa con bajo contenido de lignina por unidad de volumen de materia seca, fácilmente degradable, resistente a plagas y enfermedades, no aumenta el dióxido de carbono atmosférico, su producción no ocupa tierra adicional, ahorra madera, se puede convertir en un combustible sólido o gaseoso y por ser una planta dominante no compite con otras plantas por espac-

cio, luz y nutrientes. De los atributos mencionados anteriormente, el más importante es el segundo. De acuerdo con estos autores, el jacinto de agua es bajo en contenido de lignina (10%) y contiene altas cantidades de celulosa (20%) y hemicelulosa (33%); generalmente, una biomasa típica de plantas de la tierra puede tener un 30-50% de celulosa, hemicelulosa 20-40% y 15-30% ligninas.

Sin embargo, si bien el jacinto de agua posee numerosas ventajas para ser utilizado como combustible, los autores hacen hincapié en que posee ciertas desventajas que deben controlarse para poder aprovecharlo. Entre esas desventajas resaltan que no existe un método eficiente para la recolección de grandes volúmenes de la planta y su posterior manejo y además posee un alto contenido de agua, el cual representa el 90% del peso de la planta.

Así, para que el jacinto de agua sea reconocida como fuente potencial de combustible de calderas, es necesario conocer el tiempo en el que este se seca. Adicionalmente, es necesario conocer su poder calorífico para determinar si tiene la capacidad de generar la misma cantidad de calor que otras biomasas más convencionales como lo son la leña o el bagazo de caña de azúcar.

Por lo anterior los objetivos del presente trabajo fueron determinar las curvas de secado por convección natural de jacinto de agua a diferentes grosores del aglomerado de la planta y determinar el efecto del volteado y el corte de raíz en el tiempo de secado. Adicionalmente se comparó el poder calorífico del jacinto de agua seco con el de

otras biomasas y se determinó el poder calorífico de cada parte de la planta.

Materiales y metodos

A. Metodología para determinación de curvas de secado

Para realizar diferentes curvas de secado de la planta, se delimitó un área de secado, razón por la cual se hizo uso de un marco. El marco que se utilizó tenía dimensiones de 5.18 pies de ancho por 10.06 pies de largo. La Fig. 1 muestra uno de los marcos utilizados, así como la visualización de la disposición de las muestras.

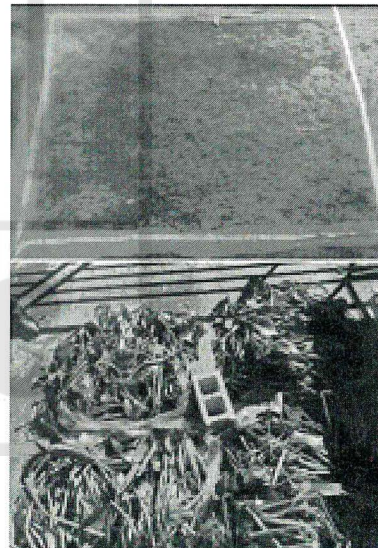


Fig. 1. Marco con dimensiones utilizado para el proceso de secado así como la disposición de la planta sobre dicho marco.

Los factores a variar en las curvas de secado consistieron en la evaluación del espesor de la pila de secado; es decir, la altura que posee el acumulado de la planta desde la base hasta la capa superior de planta (sin apuñarla), el volteo de la planta durante el tiempo de secado (a realizarse cada 24 horas) y el secado de la planta con o sin la raíz (para determinar su influencia). Así, el número de ensayos de la curva de secado a realizar fueron 12:

- 2 muestras de jacinto de agua sin volteo con una altura de 25 cm.
- 2 muestras de jacinto de agua con volteo cada 24 horas con una altura de 25 cm
- 2 muestras de jacinto de agua sin volteo con una altura de 10 cm.
- 2 muestras de jacinto de agua sin volteo con una altura de 40 cm.
- 1 muestra de jacinto de agua con volteo cada 24 horas con una altura de 40 cm.
- 1 muestra de jacinto de agua sin raíz y sin volteo con una altura de 10 y 25 cm.
- La TABLA I resume la información relevante de cada pila de secado.

Tabla 1
Información relevante respecto a las muestras contempladas

Muestra	Tipo	Altura (cm)	Muestra	Tipo	Altura (cm)
1	sin volteo	25	7	sin volteo	10
2	con volteo	25	8	sin volteo	10
3	sin volteo	25	9	sin raíz, sin volteo	25
4	con volteo	25	10	sin raíz, sin volteo	10
5	sin volteo	40	11	con volteo	40
6	sin volteo	40	12	Raíz	-

Fuente: Elaboración propia

Se recolectó jacinto de agua del Embalse Cerón Grande y se dispuso en todo el marco, evitando la compresión de la planta. Es importante resaltar que para este experimento se registró la humedad relativa y la temperatura promedio de los días de experimentación. El proceso de secado tuvo una duración de 15 días y cada día se realizaron mediciones de pérdida de humedad utilizando un dinamómetro. La Fig. 2 muestra como se realizaba las pesadas.



Fig. 2 . Pesada de muestras.

B. Determinación del poder calorífico para el Jacinto de agua

Se determinó el poder calorífico del jacinto de agua utilizando el procedimiento propuesto por el Calorímetro sistema C-200 marca IKA. Se determinó el poder calorífico de la planta completa, de la mezcla tallo-hoja y de sus componentes individuales (hoja, tallo y raíz), todos con un contenido de humedad del 0% utilizando el calorímetro C-200 IKA (Fig. 3). En primera instancia, se homogenizó cada muestra y se pesó entre 0.5 y 1.0 g. Luego de pesar cada muestra, éstas se colocaron en la bomba calorimétrica y después se le colocó un hilo de algo-

dón que sirvió para hacer contacto con la muestra a quemar, se selló la bomba calorimétrica y se llenó de oxígeno comprimido a una presión de 300 kPa por 30 segundos aproximadamente. Una vez completado los pasos anteriores, se colocó la bomba en el calorímetro y se llenó de agua a 20-25°C en donde se dejó quemar la muestra durante 8 minutos, y así, para cada una de las muestras restantes.

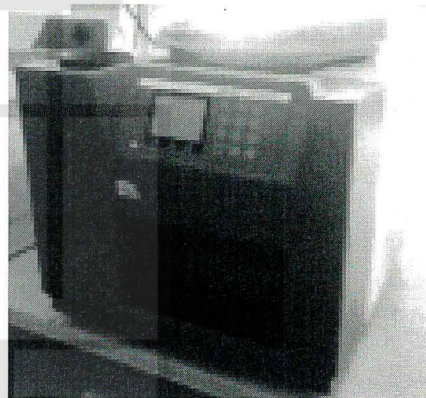


Fig. 3 . Calorímetro C-200 marca IKA.

Resultados y discusión

A. Resultados de la generación de curvas de secado

La TABLA II registra las pérdidas porcentuales acumuladas en el periodo de evaluación, en la cual se contempla la pérdida acumulada en el quinto día así como la pérdida acumulada en el decimo día y luego las pérdidas acumuladas de los días restantes de la prueba.

Tabla 2
Registro porcentual de pérdida de humedad del jacinto de agua

Muestra/ día	Pérdida Porcentual							
	0	5	10	11	12	13	14	15
1	0%	73%	86%	88%	89%	90%	90%	90%
2	0%	79%	89%	90%	90%	90%	90%	90%
3	0%	76%	88%	89%	90%	90%	90%	90%
4	0%	80%	89%	90%	90%	90%	90%	90%
5	0%	65%	76%	78%	82%	90%	90%	90%
6	0%	65%	78%	81%	83%	86%	88%	90%
7	0%	81%	88%	86%	89%	91%	91%	91%
8	0%	85%	91%	91%	91%	91%	91%	91%
9	0%	78%	87%	87%	91%	91%	91%	91%
10	0%	85%	91%	91%	91%	91%	91%	91%
11	0%	79%	88%	88%	90%	90%	90%	90%
12	0%	74%	89%	91%	91%	91%	91%	91%

Fuente: Elaboración propia

A partir de estos resultados obtenidos, se procedió a graficar las muestras para determinar su tendencia. Los gráficos que van desde la Fig. 4 a la Fig. 11 muestran las tendencias de cada ensayo y su respectivo duplicado (para aquellos ensayos que lo tenían).

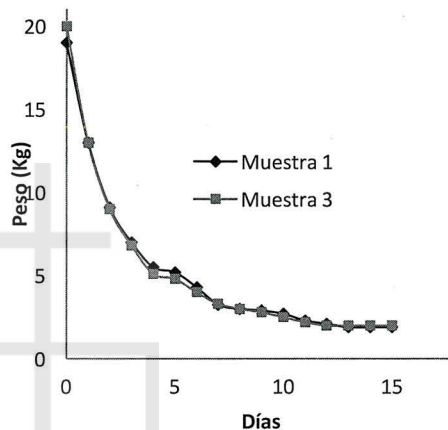


Fig. 4 . Pérdida de peso para muestras con una altura de 25 cm y sin volteo diario.

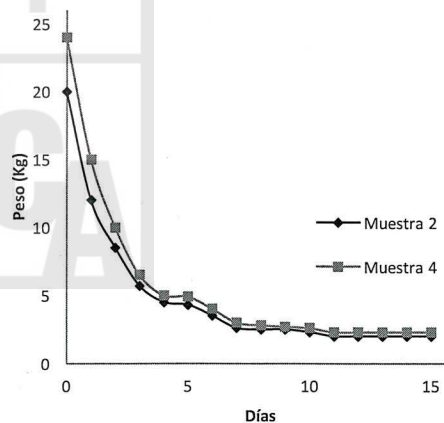


Fig. 5 . Pérdida de peso para muestras con una altura de 25 cm y con volteo diario.

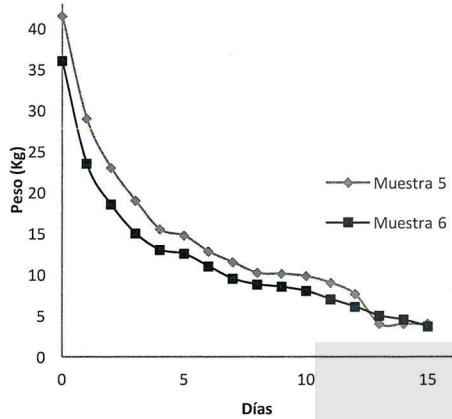


Fig. 6. Pérdida de peso para muestras con una altura de 40 cm y sin volteo diario.

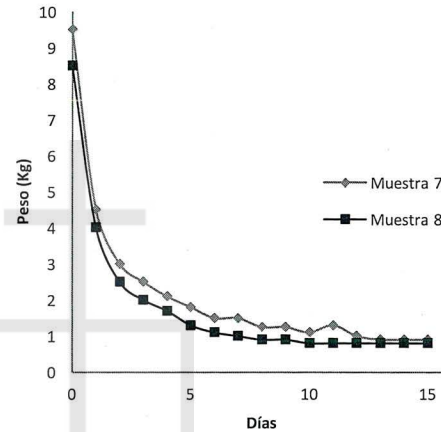


Fig. 8. Pérdida de peso para muestras con una altura de 10 cm y sin volteo diario.

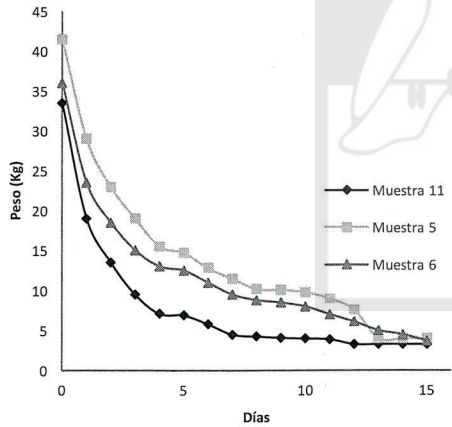


Fig. 7. Comparación de muestras con 40 cm de altura con y sin volteo. La muestra 11 era con volteo.

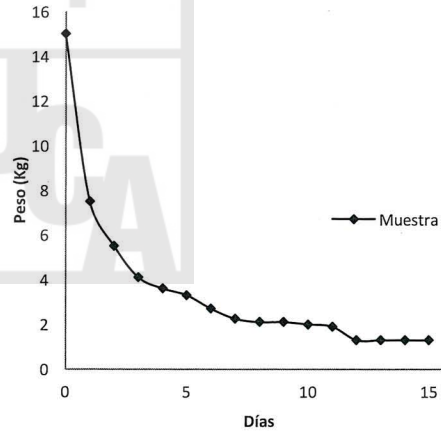


Fig. 9. Pérdida de peso para muestra con una altura de 25 cm sin raíz ni volteo diario.

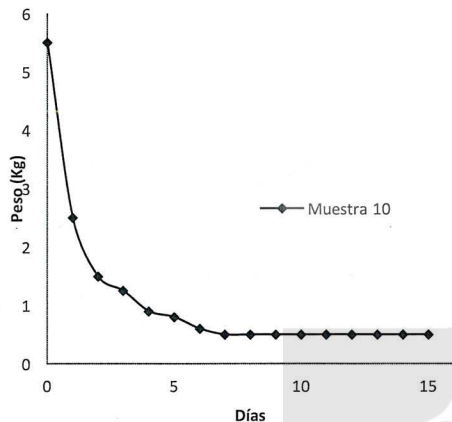


Fig. 10. Pérdida de peso para muestra con una altura de 10 cm sin raíz ni volteo diario.

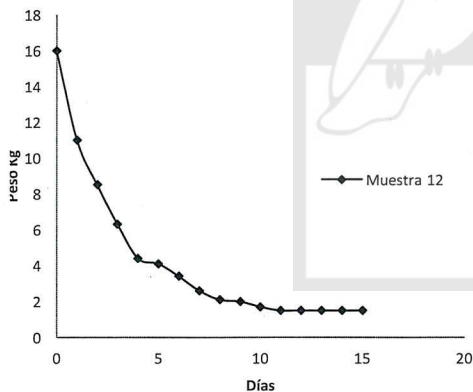


Fig. 11. Pérdida de peso para muestra compuesta sólo de raíz.

A partir de lo anterior se determinó:

En general, se puede afirmar que la pérdida de peso del jacinto de agua sigue una tendencia de decrecimiento exponencial, perdiendo mucha agua los primeros cinco días (entre 65-85%) y luego perdiendo gradualmente cantidades pequeñas en el resto de los días.

La altura es un factor que influye de tal forma que a menor altura el secado es más rápido y viceversa. Esto se puede apreciar al observar el tiempo de secado de las muestras 7, 8 y 10 que fueron colocadas a una altura de 10 cm, las cuales tomaron 13, 10 y 7 días respectivamente y siendo la primera muestra muy afectada por la presencia de rocío del 9^{no} al 11^{vo} día. Con respecto a las muestras 1, 2, 3, 4 y 9 dispuestas a 25 cm, estas se tardaron en secar 13, 12, 12, 12 y 12 días respectivamente, mientras que las muestras 5, 6 y 11 dispuestas a 40 cm se secaron en 13, 15 y 11 días (gracias al uso de volteado) respectivamente y demostrando así la influencia de la altura en el secado.

El volteo de la muestra solo es un factor que afecta considerablemente a alturas arriba de 25 cm; efecto que se pudo comprobar con las muestras dispuestas 5, 6 y 11 a una altura de 40 cm, de las cuales a la última se le dio un tratamiento de volteo, y logró secarse en 11 días, permitiéndole superar por 2 y 4 días a las muestras 5 y 6. Por otra parte, las muestras 1, 2, 3 y 4 dispuestas a 25 cm, de las cuales las de número impar no se voltearon y las de número par sí, se tardaron en secarse en orden numérico 13, 11, 12 y 11 días, con lo cual solo

se observó una mejora de 1-2 días en el secado al usar el volteado.

El corte de raíz sólo es efectivo para muestras pequeñas de 10 cm como evidencian los resultados registrados por la muestra 10 la cual se dispuso a una altura de 10 cm sin raíz; tardó 10 días en secarse superando por 6 y 3 días a las muestras 7 y 8 (siendo estas dispuestas siempre a una altura de 10 cm pero con raíz); mientras que la muestra 9 de 25 cm de altura sin raíz tardó 12 días, siendo el mismo tiempo en el cual se secaron las muestras 2,3 y 4 y solo superando a la muestra 1 por 1 día, todas dispuestas a 25 cm de altura y con raíz.

A 25 cm de altura, tanto la ausencia de raíz como el volteo no afectan de forma significativa la pérdida de peso de las muestras, obteniéndose como resultado curvas muy similares y tiempos de secado parecidos siendo 12 días una tendencia muy común para esta altura establecida independientemente de la variación realizada.

Con respecto a los datos meteorológicos, la TABLA III muestra algunos datos que fueron recopilados por el Departamento de Electrónica e Informática de la UCA (DEI) durante el periodo de prueba de las curvas de secado.

Tabla 3
Datos recopilados por el dei.

Fecha	Temperatura Promedio (°C)	Humedad Relativa (%)	Presión Atmosférica (Bar)	Densidad del aire (g/mL)
7/12/2015	23.4	74	1011.8	0.0719
8/12/2015	23.8	73.3	1011.6	0.0717
9/12/2015	23.2	76.1	1012	0.0718
10/12/2015	23.8	73.5	1011.7	0.0718
11/12/2015	23.4	77.7	1011.1	0.0717
12/12/2015	23.6	79.6	1011	0.0716
13/12/2015	23.9	86.4	1010.5	0.0713
14/12/2015	23.5	84.8	1010.2	0.0715

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la tabla anterior, la temperatura promedio con la cual se contempló los días de prueba fue alrededor de los 23-24°C, una temperatura que ayuda a visualizar también que esos fueron días más frescos y con viento ocasional; además, en términos generales, la presión atmosférica y la densidad del aire se mantuvieron estables y en términos globales, si se deseara repetir dichas curvas de secado se debería de hacer en días los cuales se puedan simular las mismas condiciones reportadas. En términos de mejora de eficiencia, las pruebas de secado deberían realizarse en épocas del año en donde la humedad relativa sea más baja, ya que seguramente se pudiera observar que los tiempos se acortan ya que el estudio se realizó para el caso menos favorable.

B. Resultados del poder calorífico del Jacinto de agua

La TABLA IV muestra el poder calorífico obtenido para los diferentes componentes del jacinto de agua, mientras que la TABLA V muestra el poder calorífico de la planta completa y de la combinación tallo y hoja.

Tabla 4
Poder calorífico para los diferentes componentes de la planta.

Componente	Muestra	Peso (g)	Poder Calorífico (J/g)
Hoja	1	0.5787	15,831.00
	2	0.6307	15,434.00
	Promedio	0.6047	15,632.50
Tallo	1	0.5024	13,482.00
	2	0.5197	12,829.00
	Promedio	0.5111	13,155.50
Raíz	1	0.5492	13,039.00
	2	0.5701	13,522.00
	Promedio	0.5597	13,280.50

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5
Poder calorífico de la planta completa y la mezcla tallo-hoja.

Componente	Muestra	Peso (g)	Poder Calorífico (J/g)
Planta Completa	1	0.6796	13,142.00
	2	0.5542	13,322.00
	Promedio	0.6169	13,232.00
Tallo y hoja	1	0.5548	12,803.00
	2	0.5604	12,773.00
	Promedio	0.5576	12,788.00

Fuente: Elaboración propia

La TABLA IV muestra que en ausencia de humedad, cada componente del jacinto de agua posee un alto poder calorífico, teniendo el tallo y la raíz un valor similar (el cual ronda por los 13,000 J/g) mientras que la hoja supera a ambos por una cantidad aproximada de 2000 J/g. La TABLA V muestra que el poder calorífico de la planta completa es muy similar al del tallo y la raíz, por lo que el aporte de cada componente al poder calorífico total depende mucho de la composición másica, lo cual se puede visualizar al ver el valor del poder calorífico de una mezcla tallo-hoja, el cual posee un valor muy similar al poder calorífico de solo el tallo. Con respecto a si el jacinto de agua posee un poder calorífico que sea similar a la de biomasa que se use en calderas, la TABLA VI muestra diversos materiales con sus respectivos poderes caloríficos.

Tabla 6
Poder calorífico de algunas biomásas.

Material	PC (kJ/kg)	Referencia
Gasoil	44,048.08	[9]
Butano	49,896.00	[9]
Propano	50,688.00	[9]
Pellets	20,916.00	[9]
Bagazo	17,782.00	[10]
Café (cascarilla)	16,700.00	[11]
Switchgrass	18,580.50	[12]
King Grass	18,000.00	[13]

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar, para materiales de carácter líquido y gaseoso como lo son el gasoil, butano y propano respectivamente, su poder calorífico es muy superior con respecto al del jacinto de agua (su poder calorífico es superado por más de 31,000 J/g en comparación de estas sustancias). Sin embargo, al compararlo con biomásas como lo son el bagazo, la cascarilla de café, switchgrass y King grass, el jacinto de agua posee un poder calorífico muy cercano a estos con una variación de 5,000-6,000 J/g, lo cual se puede nivelar agregando más de este tipo de biomasa que no tiene limitaciones en cuanto a su crecimiento (tomando en cuenta que se trata de una planta invasora y de crecimiento rápido). Así se puede afirmar que el jacinto de agua posee un potencial biomásico moderado para ser utilizado en una caldera industrial

para que genere una buena cantidad de energía en forma de calor.

Conclusiones

Se determinaron curvas de secado al natural del jacinto de agua con diferentes variantes y a diferentes alturas. En general, las plantas dispuestas a una altura de 10 cm tardaron menos en secarse (alrededor de 7-13 días), seguidas por las de 25 cm (12-13 días) y por último las de 40 cm (11-15 días), confirmando que en efecto la altura influye en el tiempo de secado. De forma similar, se determinó que el corte de raíz solo fue relevante para la altura de 10 cm, puesto que se registró un secado en 7 días al cortar la raíz. Además, se determinó que el secado de la planta dispuesto a una altura de 25 cm, no requiere del uso de volteo ni corte de raíz, ya que el tiempo de pérdida de humedad con volteo y sin raíz fue similar al obtenido para las pilas de secado de la misma altura si esas variantes.

Se determinó el poder calorífico del jacinto de agua siendo el tallo el componente que más poder calorífico aporta, debido a que típicamente compone el 67% de la planta. Adicionalmente, se comparó el poder calorífico del jacinto de agua frente a otras biomásas como el bagazo de caña de azúcar, la cascarilla de café, switchgrass y King grass, con los cuales se determinó que el jacinto de agua posee un poder calorífico muy cercano a éstos con una variación de 5,000-6,000 J/g, por lo que demuestra potencial para ser utilizado como combustible en calderas de biomasa.

Referencias

- [1] Jafari, N. (Junio de 2010). *Ecological and socio-economic utilization of water hyacinth (Eichhornia crassipes Mart.* Obtenido de JASEM ISSN: www.bioline.org.br/ja
- [2] Consejo Nacional de Energía. (2011). *Plan Maestro para el Desarrollo de la Energía Renovable en El Salvador*. San Salvador.
- [3] Koutika, L. S., & Rainey, H. J. (27 de Agosto de 2014). *A review of the invasive, biological and beneficial characteristics of aquatic species eichhornia crassipes and salvinia molesta.* Obtenido de Applied Ecology and Environmental Research: <http://www.sciencedirect.com/>
- [4] Bhattacharya, A., & Kumar, P. (2010). *Water hyacinth as a potential biofuel crop.* Obtenido de Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry: www.cabi.org
- [5] Güereña, D., Neufeldt, H., Berazneva, J., & DUBY, S. (2015). *Water hyacinth control in Lake Victoria: Transforming an ecological catastrophe into economic, social, and environmental benefits.* Artículo Científico de la Revista Elsevier.
- [6] B. Karki, A. (Noviembre de 2010). *Biogas as renewable energy from organic waste.* Obtenido de Encyclopedia of life support systems: <http://www.eolss.net>
- [7] Keith, L., & Hans-Martin, H. (Enero de 2000). *A Practical Handbook of Uses for Water Hyacinth from Across the World.* Obtenido de ANAMED: <http://www.anamed.net/>
- [8] Mukherjee, R., & Nandi, B. (2004). *Improvement of in vitro digestibility through biological treatment of water hyacinth biomass by two Pleurotus species.* Artículo científico publicado por la revista Elsevier.
- [9] Petromercado. (Enero de 2016). *Petromercado.* Obtenido de Poder calorífico en kw del gasoleo C, butano y pellet: <http://www.petromercado.com/>
- [10] Díaz, R. (2008). *Caracterización Energética del Bagazo de Caña de Azúcar del Ingenio Valdez. Ecuador.*
- [11] MTAS, M. d. (2015). *Poder calorífico (q) de diversas sustancias.*
- [12] CTA, C. f. (2015). *Heat Content Ranges for Various Biomass Fuels.*
- [13] A. Flores, R., Urquiaga, S., R. Alves, B. J., Collier, L. S., & Boddey, R. M. (2012). *Yield and quality of elephant grass biomass produced in the cerrados region for bioenergy.*