

**Artículo Original**

**COMPORTAMIENTO DE LA HUMEDAD, LA MASA ORGÁNICA Y  
EL CALOR ESPECÍFICO DE COMBUSTIÓN  
DEL MARABÚ ALMACENADO**

**BEHAVIOR OF MOISTURE, ORGANIC MASS AND HEAT VALUE  
OF STORED MARABOU**

Angel Rubio-González <sup>1\*</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0890-5475>

<sup>1</sup> Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales. Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Carretera a Camajuaní, km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Junio 28, 2022; Revisado: Julio 13, 2022; Aceptado: Septiembre 14, 2022

**RESUMEN**

**Introducción:**

En la etapa de puesta en marcha de la bioeléctrica Ciro Redondo, ubicada en Ciego de Ávila, Cuba, se ha presentado un comportamiento no previsto en las propiedades como combustible del marabú, *Dichrostachys cinera* (L.), utilizado para su operación en períodos de no zafra azucarera. Esto ha estado relacionado con la humedad, la masa y el calor específico de combustión, lo que ha creado dificultades en la operación de las calderas.

**Objetivo:**

El presente trabajo tiene como objetivo determinar el comportamiento de la humedad, la masa orgánica y el calor específico de combustión del marabú cosechado con máquinas, con el tiempo de almacenamiento, para prever su impacto en la operación de las calderas.

**Materiales y métodos:**

El estudio se basó en la conformación de tres pilas de marabú que permanecieron almacenadas durante 41 días y semanalmente se tomaron muestras para evaluaciones de humedad, contenido de ceniza y calor específico de combustión.

**Resultados y discusión:**

Se encontró la forma en que disminuyen la humedad y la masa orgánica y la forma en que se incrementa el calor de combustión con el tiempo de almacenamiento, así como el tiempo tope de su aumento y comienzo de su disminución.



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

\* Autor para la correspondencia: Angel Rubio, Email: [arubio@uclv.edu.cu](mailto:arubio@uclv.edu.cu)



**Conclusiones:**

Se determinó el comportamiento de la humedad, la masa orgánica y el calor específico de combustión inferior (bs) del marabú cosechado con máquinas, con el tiempo de almacenamiento. Estos nuevos conocimientos permiten predecir efectos en el trabajo de las calderas para tomar previsiones y garantizar su correcta operación.

**Palabras clave:** almacenamiento de biomasa; biomasa combustible; marabú.

**ABSTRACT**

**Introduction:**

In the commissioning stage at Ciro Redondo bioelectric power plant, located in Ciego de Ávila, Cuba, an unforeseen behavior has occurred with the properties of marabou, *Dichrostachys cinera* (L.), used for its operation in periods of no sugar harvest. This has been related to moisture, mass and heat value, which has created difficulties in boiler operation.

**Objective:**

The objective of this work is to determine the behavior of the moisture, the organic mass and the heat value of the marabou harvested with machines, in its storage time, to predict its impact the performance of the boilers.

**Materials and methods:**

The study was based on the arrangement of three piles of marabou that remained stored for 41 days and from which samples were taken weekly for evaluating its humidity, ash content and heat value.

**Results and Discussion:**

The way in which the humidity and the organic mass decrease and the way in which the heat value increases with storage time, as well as the top time of its increase and the beginning of its decrease, were found.

**Conclusions:**

The behavior of the moisture, the organic mass and the lower heat value of the marabou harvested with machines, after being stored for a time, were determined. This new knowledge makes it possible to predict effects on the work of the boilers in order to take precautions and guarantee their correct operation.

**Keywords:** biomass storage; fuel biomass; marabou.

## **1. INTRODUCCIÓN**

En la etapa de puesta en marcha de la bioeléctrica Ciro Redondo ubicada en Ciego de Ávila, Cuba, se ha presentado un comportamiento no previsto en las propiedades del marabú, *Dichrostachys cinera* (L.), utilizado como combustible para su operación en períodos de no zafra azucarera. Esto ha estado relacionado con la humedad, la masa y el calor específico de combustión del marabú almacenado.

Es conocido que toda biomasa almacenada sufre un proceso de secado. La masa de agua (humedad), como resultado de su evaporación y del intercambio de masa con el aire, disminuye durante el tiempo de almacenamiento. Esta disminución de la humedad

incrementa el calor específico de combustión de la masa de trabajo del combustible (base húmeda).

Por otro lado, como resultado del accionar de los microorganismos que posee la biomasa, esta sufre un proceso de descomposición biológica (Anerud y col., 2019, Towey y col., 2019 y Lara y col., 2020). Ese proceso de descomposición provoca una pérdida de masa orgánica (masa seca), y esto tiende a provocar una disminución del calor específico de combustión (base seca). Además, provoca incrementos del contenido de ceniza y mayor cantidad de partículas finas en la composición granulométrica de la biomasa. Todo esto modifica sus propiedades combustibles con el tiempo de almacenamiento. La pérdida de masa orgánica disminuye la masa total (masa de trabajo) del combustible disponible, lo que deberá ser tenido en cuenta en las plantas térmicas que utilizan biomasa como combustible. Todo esto ocurre también en el marabú por ser una biomasa que tiene un elevado contenido de microorganismos (Alvarado y col., 2022).

Los fenómenos apuntados han sido estudiados en muchas biomásas empleadas como materia prima en diferentes procesos, pero no han sido estudiados en el marabú cosechado con máquinas para su empleo como combustible en plantas térmicas. El presente trabajo tiene como objetivo determinar el comportamiento de la humedad, la masa orgánica y el calor específico de combustión del marabú cosechado con máquinas, con el tiempo de almacenamiento, para prever su impacto en la operación de las calderas.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

La biomasa combustible (masa total o de trabajo) está formada por una masa orgánica (es la que aporta el calor de combustión al quemarse), una masa de agua (que da la humedad y que se evapora durante la combustión provocando una pérdida de calor para la caldera) y una masa inorgánica o mineral (que da origen a la ceniza al quemarse).

La masa orgánica disminuye con el tiempo de almacenamiento por el accionar de los microorganismos y la masa de agua disminuye por el proceso de secado, mientras que la masa inorgánica se considera que se mantiene constante (como masa) pues no sufre procesos degenerativos durante el almacenamiento, pero como disminuye la masa orgánica, el porcentaje de ceniza (base seca) se incrementa.

A partir de lo expresado anteriormente y con la finalidad de determinar la pérdida de masa orgánica, puede considerarse que ésta es la diferencia entre la pérdida de masa total y la pérdida de la masa de agua (humedad).

El comportamiento de la humedad del marabú almacenado en función del tiempo (pérdida de humedad), se determinó mediante un experimento con pilas similares a las empleadas en su almacenamiento (ver Tabla 1). El experimento duró seis semanas y se tomaron muestras el día cero y en cada una de las semanas siguientes. Las muestras se tomaron a una profundidad de 0,7 m desde la superficie de la pila y a una altura media. Adicionalmente, diariamente (mañana y tarde) se controlaron las variables meteorológicas principales en el entorno de las Pilas B y C: temperatura ambiente, lluvia y humedad relativa. Las condiciones de las pilas responden a los tres tipos de almacenes empleados, por los que el marabú pasa secuencialmente (C, B y A).

**Tabla 1.** Datos de las pilas del experimento. Día 0. Fecha: 29-10-2021

<i>Información</i>	<i>Pila A</i>	<i>Pila B</i>	<i>Pila C</i>
Condición de almacenamiento	Bajo techo, con paredes y sobre piso de hormigón	Intemperie y sobre piso de hormigón	Intemperie y piso de rocoso y tierra
Masa (kg)	12 940	12 580	12 940
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	379	389	405
Máquina utilizada	BMH-480-0250	BMH-480-0250	BMH-480-0250
Cabezal de corte	Modelo H600	Modelo H600	Modelo H600
Altura de corte de la máquina	Baja	Baja	Baja
Densidad de campo	Baja-Media	Baja-Media	Baja-Media
Edad del marabú	18 – 26 meses	18 – 26 meses	18 – 26 meses

La determinación de la pérdida de masa total se obtuvo mediante la diferencia de peso el día cero y el último día del experimento. Con la finalidad de no afectar físicamente las pilas sometidas a evaluación para no alterar el proceso natural de secado, se decidió no pesarlas cada semana. Para mayor precisión en el cálculo de la pérdida de masa total se tuvo en cuenta la masa extraída a cada pila al tomar las muestras para las diferentes pruebas. El experimento permitió la evaluación de otras propiedades cuyo comportamiento será reportado en otros artículos.

Con la finalidad de evaluar el comportamiento del calor específico de combustión inferior (CECI), (base seca) con el tiempo de almacenamiento, se tomaron muestras del interior de cada pila de marabú (0,70 m de profundidad y altura media) y se determinó su valor en el laboratorio de la planta, con la bomba calorimétrica isoperibólica SDACM4000; se utilizó la norma ISO 1928, (2020).

Para conocer la influencia en el CECI (base húmeda) de la pérdida de humedad y de la masa orgánica, se procedió a su cálculo utilizando los modelos obtenidos para la humedad y la masa orgánica, el CECI (bs) promedio de las tres pilas el día cero (15 817 kJ/kg) determinado y el CECI (base seca) de la masa orgánica (CECI MO), este último determinado con el contenido de ceniza (CC) promedio general obtenido durante el experimento (7,70 %).

El material para todas las evaluaciones de laboratorio se trituró y se obtuvieron las muestras mediante el sistema de cuarteo.

A los efectos del procesamiento de la información al tiempo de almacenamiento en lo sucesivo se le denominará tiempo de secado.

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

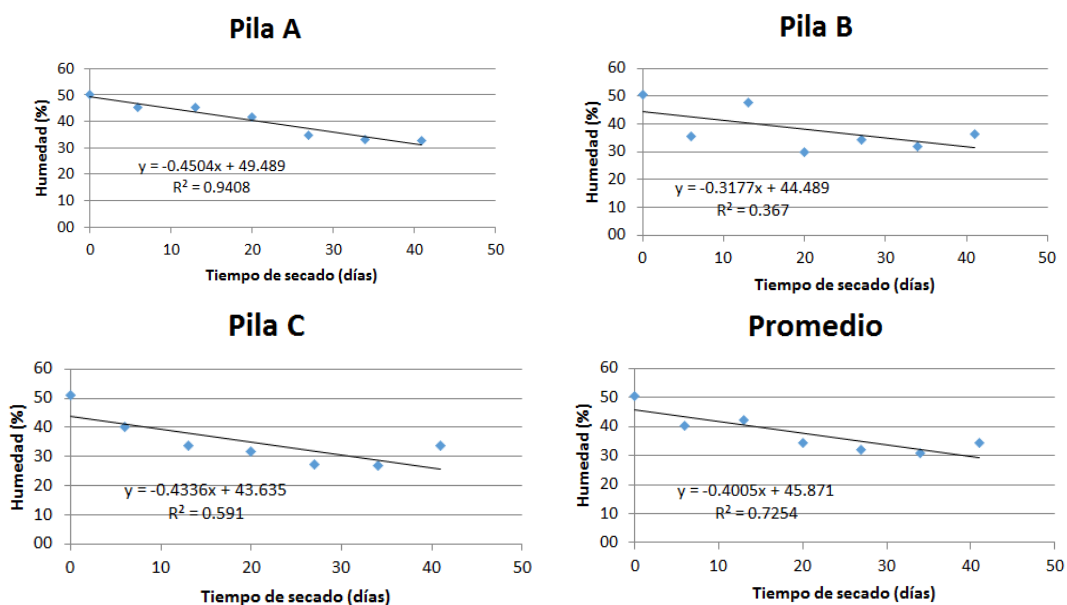
#### **3.1 Comportamiento de la humedad (masa de agua)**

El comportamiento de la humedad durante el tiempo de secado para cada una de las pilas y el promedio de las tres se puede ver en la Tabla 2. En la Figura 1 se han graficado estos resultados para valorar las tendencias.

**Tabla 2.** Comportamiento de la humedad durante el tiempo de secado

Día	Humedad interior				Lluvias		
	Pila A	Pila B	Pila C	Promedio	Período	Pila B	Pila C
0	50,1	50,4	51,0	50,5	-	-	-
6	45,5	35,8	40,1	40,4	0 al 6	Moderadas	Moderadas
13	45,2	47,6	33,9	42,2	7 al 13	Moderadas	
20	41,5	29,9	31,6	34,4	14 al 20	Ligeras	
27	34,6	34,4	27,2	32,0	21 al 27	Ligeras	
34	33,3	32,1	26,8	30,7	28 al 34	Moderadas	Moderadas
41	32,7	36,6	33,8	34,4	35 al 41	Moderadas	Moderadas

La tendencia general, como era de esperar, es a disminuir la humedad con el tiempo de secado. En el caso de la Pila A lo hace con una mínima dispersión de valores ( $R^2=0,94$ ), mientras que las Pilas B y C lo hacen con valores muy dispersos ( $R^2$  igual a 0,36 y 0,59 respectivamente). La dispersión de valores en B y C se debe a la influencia de las lluvias y el efecto de las condiciones ambientales por estar a la intemperie.



**Figura 1.** Tendencias del comportamiento de la humedad con el tiempo de secado

El comportamiento de la humedad promedio responde al modelo lineal representado por la ecuación (1)

$$H = 45,871 - 0,4005 * TS \tag{1}$$

Donde:

$H$  – Humedad (%).

$TS$  – Tiempo de secado (días).

### 3.2 Comportamiento de la masa total y la orgánica

En la Tabla 3 se muestra el comportamiento de la pérdida de masa total y la orgánica, con el tiempo de secado. Se muestra la pérdida para cada pila y el promedio general. La pérdida de masa orgánica mayor se produce en la Pila A que se encuentra bajo techo y rodeada de paredes (5,63 %) le siguen en orden descendente, y con valores muy

cercanos, las Pilas C y B (2,53 y 1,08 % respectivamente). Estas últimas en condiciones de intemperismo.

En la Figura 2 se ha graficado la tendencia de la pérdida de masa orgánica de cada pila y la del promedio de las tres versus el tiempo de secado. Como era de esperar la pérdida de masa orgánica en todos los casos se incrementa con el tiempo de secado. El modelo lineal del comportamiento promedio se muestra en la ecuación (2).

$$PMO = 0,0756 * TS \tag{2}$$

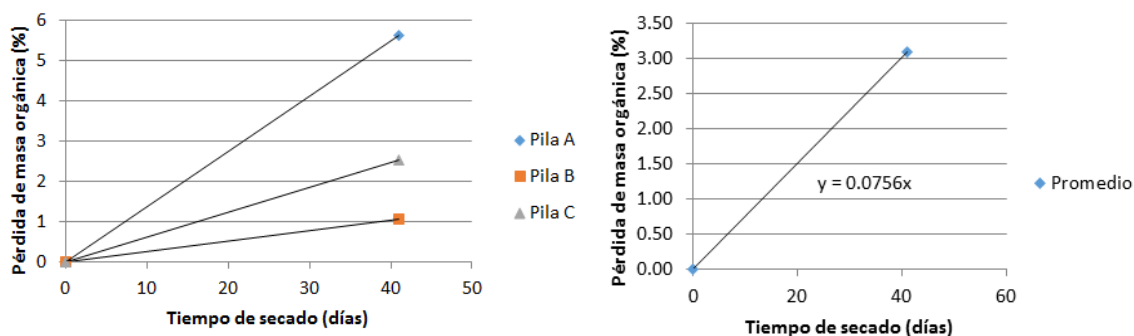
Donde:

*PMO* – Pérdida de masa orgánica (%)

*TS* – Tiempo de secado (días)

**Tabla 3.** Pérdida de masa total y orgánica con el tiempo de secado

<i>Pila</i>	<i>Pérdida de masa total</i>							
	<i>Día cero</i>	<i>Muestras extraídas</i>	<i>Día final</i>	<i>Día final</i>	<i>Pérdida de masa</i>	<i>Pérdida de masa</i>		
	<i>Peso (t)</i>	<i>Peso (t)</i>	<i>Peso (t)</i>	<i>Peso ajustado (t)</i>	<i>total (t)</i>	<i>total (%)</i>		
	a	b	c	d	e	f		
	-	-	-	c-b	a-d	100*e/a		
A	12,94	0,0386	8,48	8,519	4,421	34,17		
B	12,58	0,0369	9,58	9,617	2,963	23,55		
C	12,94	0,0356	9,06	9,096	3,844	29,71		
Total	38,46	0,1111	27,12	27,231	11,229	29,20		
<i>Pila</i>	<i>Pérdida de agua</i>					<i>Pérdida de masa orgánica</i>		
	<i>Día cero</i>	<i>Agua inicial</i>	<i>Día final</i>	<i>Agua final</i>	<i>Agua pérdida</i>	<i>Pérdida masa orgánica</i>	<i>Pérdida masa orgánica</i>	
	<i>Humedad (%)</i>	<i>Peso (t)</i>	<i>Humedad (%)</i>	<i>Peso (t)</i>	<i>Peso (t)</i>	<i>(t)</i>	<i>(%)</i>	
	g	h	i	j	k	l	m	
	-	a*g/100	-	d*i/100	h-j	e-k	100*l/a	
A	50,10	6,483	32,75	2,790	3,693	0,728	5,63	
B	50,40	6,340	36,53	3,513	2,827	0,136	1,08	
C	50,95	6,593	33,82	3,076	3,517	0,328	2,53	
Tot	-	19,416	-	9,379	10,037	1,192		
Promedio	50,48	-	34,37	-	-	-	3,10	



**Figura 2.** Tendencia del comportamiento de la pérdida de masa orgánica con el tiempo de secado

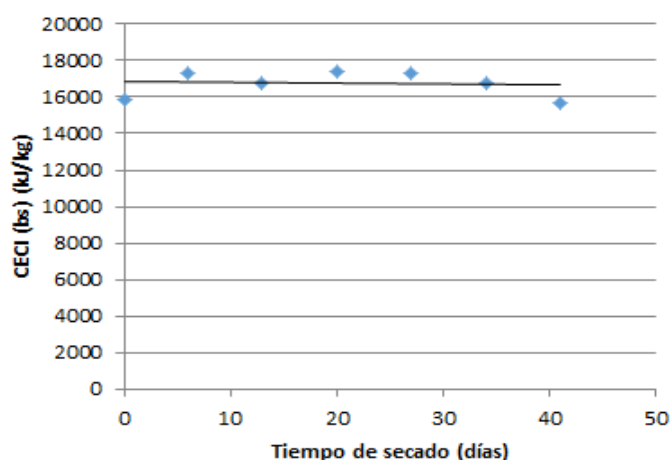
### 3.3 Comportamiento del calor específico de combustión inferior (CECI) y del contenido de ceniza de la masa seca con el tiempo de secado

Los resultados de la determinación del CECI (bs) del marabú se presentan en la Tabla 4, y en la Figura 3 se graficó su comportamiento con el tiempo de secado.

El CECI (bs) presenta un comportamiento casi constante con el tiempo de secado aunque con valores muy dispersos. La dispersión de valores tiene su origen en la poca uniformidad del material cosechado, no obstante el sistema empleado para obtener las muestras. El valor máximo resultó 17 433 kJ/kg y el mínimo 15 700 kJ/kg, para una diferencia de 10 %. Esto indica una baja influencia en el CECI (bs) de la pérdida de masa orgánica en el rango de tiempo estudiado.

**Tabla 4.** Calor específico de combustión inferior (bs) (kJ/kg)

<i>Día</i>	<i>Pila A</i>	<i>Pila B</i>	<i>Pila C</i>	<i>Promedio</i>
0	16081	15457	15913	15817
6	17334	17020	17556	17303
13	16140	17330	16726	16732
20	17242	17946	17112	17433
27	17686	16797	17539	17341
34	17032	16672	16638	16781
41	16249	15377	15473	15700
Promedio	16823	16657	16708	16729



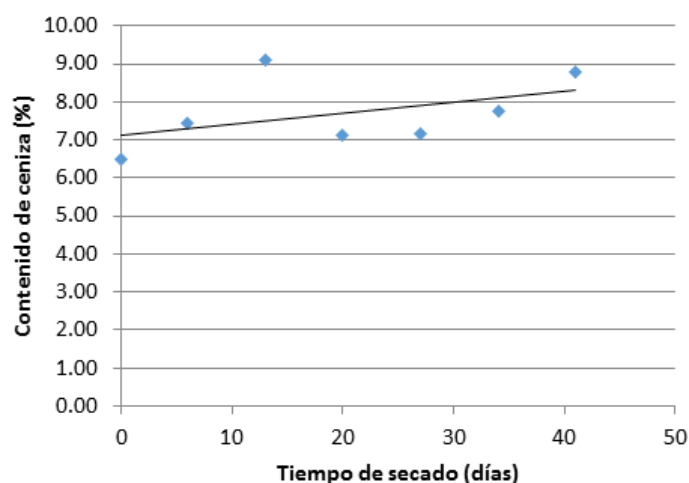
**Figura 3.** CECI (bs) vs Tiempo de secado

Estos valores de CECI (bs) del marabú son inferiores a los reportados en (Rubio-González y col., 2021) pues en el presente estudio el marabú cosechado estaba formado por plantas jóvenes con una edad inferior a los 26 meses, lo que hace que no tuviese troncos robustos que aportan una mayor concentración de fibra.

Los resultados de la determinación del contenido de ceniza se muestran en la Tabla 5, y en la Figura 4 se muestra su tendencia con el tiempo de secado.

**Tabla 5.** Contenido de ceniza (%)

<i>Día</i>	<i>Pila A</i>	<i>Pila B</i>	<i>Pila C</i>	<i>Promedio</i>
0	6,10	6,00	7,30	6,47
6	8,00	9,10	5,20	7,43
13	14,30	7,20	5,80	9,10
20	7,50	5,90	8,00	7,13
27	5,00	7,90	8,60	7,17
34	6,80	7,30	9,20	7,77
41	9,91	7,65	8,84	8,80
Promedio	8,23	7,29	7,56	7,70



**Figura 4.** Contenido de ceniza vs tiempo de secado

El contenido de ceniza presenta una tendencia al incremento con el tiempo de secado, pero los valores tienen una gran dispersión por igual razón que en el caso del CECI. El valor mínimo resultó 6,47 % y el máximo 9,10 %, para una diferencia de 29 %. El promedio general es de 7,70 %.

### **3.4 Influencia de la pérdida de masa orgánica y de humedad en el CECI**

En la Tabla 6 se presenta el cálculo del CECI (bh) teniendo en cuenta la disminución por pérdida de masa orgánica y el aumento por reducción de la humedad con el tiempo de secado. En la Figura 5 se ha graficado el comportamiento.

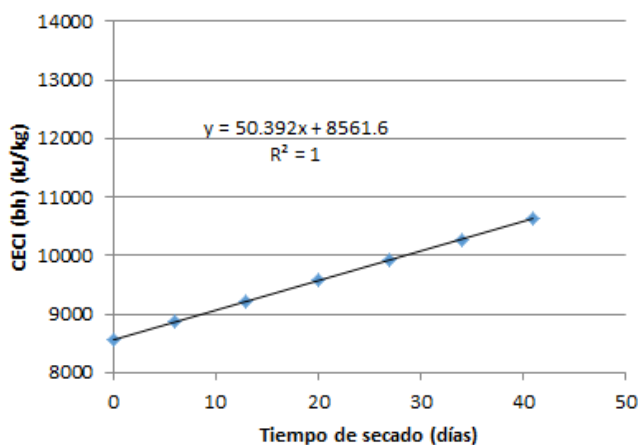
El CECI (bh) aumenta con el tiempo de secado, pues tiene mayor impacto la reducción de la humedad que la pérdida de masa orgánica. Esto ocurre durante el tiempo que duró el experimento. El comportamiento del CECI (bh) teniendo en cuenta la pérdida de masa orgánica y humedad, a partir de estos cálculos, cumple con el modelo de la ecuación (3).



$$CECI (bh) = 8562 + 50,392 * TS \tag{3}$$

**Tabla 6.** Comportamiento del CECI (bh) con el tiempo de secado

Día	Pérdida de masa orgánica Promedio calculado (%)	Disminución del CECI por pérdida de masa orgánica (kJ/kg)	Disminución del CECI por pérdida de masa orgánica (%)	CECI (bs) con pérdida de masa orgánica (kJ/kg)	Humedad promedio calculada (%)	CECI (bh) sin pérdida de masa orgánica (kJ/kg)	Aumento del CECI por secado (kJ/kg)	Aumento del CECI por secado (%)	CECI (bh) con pérdida de masa orgánica (kJ/kg)
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
	0,0756*a	m*b/100	100*c/k	k-c	45,871-0,4005*a	k*(100-f)/100	g-8562	100*h/k	8562-c+h
0	0,00	0,0	0,00	15817	45,87	8562	0,00	0,00	8562
6	0,45	77,7	0,49	15739	43,47	8942	380,08	2,40	8864
13	0,98	168,4	1,06	15649	40,66	9385	823,51	5,21	9217
20	1,51	259,1	1,64	15558	37,86	9829	1266,94	8,01	9569
27	2,04	349,8	2,21	15467	35,06	10272	1710,37	10,81	9922
34	2,57	440,5	2,78	15377	32,25	10715	2153,80	13,62	10275
41	3,10	531,2	3,36	15286	29,45	11159	2597,23	16,42	10628
84	6,35	1088,2	6,88	14729	12,23	13883	5391,16	33,64	12795
CECI (bs)		15817	(kJ/kg)	Dato	k				
CC		7,70	(%)	Dato	l				
CECI MO (bs)		17132	(kJ/kg)	k*(100/(100-l))	m				



**Figura 5.** CECI (bh) vs Tiempo de secado

Haciendo una extrapolación se determinó un aspecto de mucha importancia (ver Tabla 6). A los 84 días de secado se alcanzaría una humedad de 12,23 %, muy cercana a la humedad de equilibrio en Cuba, por lo que a partir de ese momento la humedad del marabú no disminuiría más, cesando el incremento del CECI (bh) que provoca su reducción; pero como la pérdida de masa orgánica continua el CECI (bh) comenzaría a disminuir. Este aspecto merita nuevas investigaciones.

#### **4. CONCLUSIONES**

1. Los modelos estadísticos de humedad, masa orgánica y calor específico de combustión, en función del tiempo de almacenamiento, permiten predecir sus efectos en la operación de las calderas.
2. Se puede estimar que a partir de los 84 días de almacenamiento el CECI (bh) del marabú comenzará a disminuir, lo que merita nuevas investigaciones.

#### **AGRADECIMIENTOS**

El autor agradece la colaboración prestada por la dirección de la Bioeléctrica Ciro Redondo y en particular el apoyo brindado por la jefatura y técnicos de su Laboratorio.

#### **REFERENCIAS**

- Alvarado, Y., Cruz, M., Acosta, M., Pichardo, T., Rodríguez, T., Roque, B., y Freire, M., Contenido microbiano de biomasa de marabú., Informe Final Contrato No 3-2022 SICTE S.A. y Biopower S.A. Documento Interno del Instituto de Biotecnología de las Plantas, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, entregado a Biopower S.A., 2022, pp. 1-25.
- Anerud, E., Krigstin, S., Routa, J., Brännström, H., Arshadi, M., Helmeste, C., Bergström, D., & Egnell, G., Dry matter losses during biomass storage. Measures to minimize feedstock degradation., IEA Bioenergy Task 43, 2019, Rome. [https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/01/EIA-Dry-Matter-Loss\\_Final.pdf](https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/01/EIA-Dry-Matter-Loss_Final.pdf)
- ISO 1928., Coal and coke. Determination of gross calorific value., 2020. <https://www.iso.org/standard/75883.html>
- Lara, P.J., Terrados, J., Gallego, F.J., & Hermoso, M., Influence of moisture, temperature and microbial activity in biomass sustainable storage. Special Focus on Olive Biomasses., Int J Environ Sci Nat Res. Vol. 25, No. 3, 2020, 556165. <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2020.25.556165>
- Rubio-González, A., Iturria, P., Rodríguez-Machín, L. y Palmero, D., Propiedades del marabú (*Dichrostachys cinera* L.) cosechado con máquinas como combustible para la generación de electricidad (Primera Parte)., Centro Azúcar, Vol. 48, No 1, 2021, pp. 93-104. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2223-48612021000100093](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612021000100093)
- Towey, R., Webster, K., & Darr, M., Influence of storage moisture and temperature on lignocellulosic degradation. AgriEngineering, Vol. 1, No. 3, 2019, pp. 332-342. <https://doi.org/10.3390/agriengineering1030025>

#### **CONFLICTO DE INTERÉS**

El autor declara que no existen conflictos de interés.

#### **CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES**

- Dr.C. Angel Rubio-González. Realizó el diseño del experimento, análisis de resultados y escritura del artículo.