



CARACTERIZACIÓN DEL POTENCIAL TÉRMICO RSU, PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA, UTILIZANDO CARBONIZACIÓN HIDROTÉRMICA

CHARACTERIZATION OF THE RSU THERMAL POTENTIAL, FOR THE GENERATION OF ELECTRIC ENERGY, USING HYDROTHERMAL CARBONIZATION

Aníbal Salazar^{1,*}

Recibido: 10-08-2022, Recibido tras revisión: 15-11-2022, Aceptado: 28-11-2022, Publicado: 01-01-2023

Resumen

El cenit del petróleo y el efecto invernadero son las razones que justifican la necesidad de utilizar energías renovables no convencionales (ERNC). Los residuos sólidos urbanos constituyen una de esas fuentes, por lo que la determinación de las principales características, incluido el poder calorífico, fue el primer objetivo de la presente investigación, así como la utilización de los modernos procedimientos de carbonización hidrotérmica (CHT) y licuefacción hidrotérmica (LHT), para la generación de energía y potencia eléctrica. Se trabajó con los datos de muestreo de los residuos sólidos urbanos del área de Chiclayo metropolitano. Se empleó una bomba calorimétrica para la medición del poder calorífico y la simulación numérica del potencial de generación eléctrica. Además, se obtuvo como resultado el cumplimiento del objetivo principal, y el hecho de que es posible obtener energía y potencia firme, que ayude a evitar las emisiones de gases efecto invernadero, contribuyendo a los compromisos firmados con tal efecto y a seguir el camino a una nueva matriz energética sostenible; a la vez se da una posible solución al problema del manejo de residuos sólidos urbanos, principal problema ambiental de la ciudad de Chiclayo, Perú.

Palabras clave: residuos, sólidos, poder calorífico, carbonización, licuefacción, generación

Abstract

The zenith of oil and the greenhouse effect are the main reasons why it is necessary to use nonconventional renewable energy (NCRE) sources. Solid urban waste is one of these sources, and the main objective of this research is to determine its main features, including calorific value, as well as the use of modern hydrothermal carbonization (HTC) and hydrothermal liquefaction (HTL) procedures for the generation of energy and electrical power. For this purpose, it was used the sampling data of urban solid waste from the metropolitan Chiclayo area. A calorimetric bomb was employed for measuring its calorific value and the electrical generation potential was simulated. In addition, the main objective was fulfilled, and it was also possible to steadily generate energy and power. This will help to avoid greenhouse gas emissions, and thus contribute to meet the commitments signed by Peru to reduce greenhouse gases, and follow the path to a new sustainable energy matrix, while simultaneously providing a potential solution to the problem of managing solid urban waste, which is the main environmental problem of the city of Chiclayo Peru.

Keywords: Solid, Waste, calorific value, carbonization, liquefaction, generation

^{1,*} Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lampayeque, Perú.
 Autor para correspondencia ✉: asalazar@unprg.edu.pe

Forma sugerida de citación: Salazar, A. "Caracterización del potencial térmico RSU, para la generación de energía eléctrica, utilizando carbonización hidrotérmica," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 29, pp. 58-65, 2023. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n29.2023.05>.

1. Introducción

En la actualidad, ante la crisis del petróleo o efecto cenit, el cual predice que el planeta Tierra ha llegado a su límite de producción de petróleo, por lo que la humanidad ha comenzado a utilizar cada vez de manera más intensa, los biocombustibles, tanto de manera tradicional en procesos de combustión, como en procesos termoquímicos, donde destacan la carbonización hidrotérmica (CHT) y la licuefacción hidrotérmica (LHT) [1], así mismo, el incremento de los residuos sólidos urbanos, en el Perú y el mundo, lo podemos apreciar en la Figura 1.

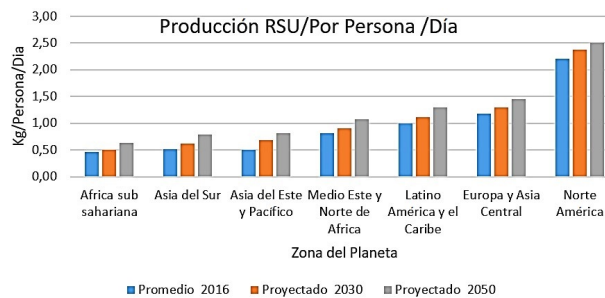


Figura 1. Proyección de incremento de la producción de residuos sólidos en el mundo [2]

También debemos de resaltar que, en la región norte del Perú, los biocombustibles se proyectan como uno de los principales recursos de producción del hidrógeno en su variante verde, pues su producción es estacional y, por lo tanto, es necesario su acumulación en forma gaseosa y su posterior distribución por redes de gasoductos, asegurando de esta manera el horizonte energético del norte del Perú, durante todo el siglo XXI.

Estos residuos sólidos (residuos sólidos urbanos, cascarilla de arroz, bagazo de la caña de azúcar, rastrojos de la cosecha mecanizada de la caña de azúcar, afrecho de café, entre otros principales tipos de biomasa) tienen una utilización energética, mediante varios procedimientos que, a su vez, los podemos clasificar como bioquímicos, en donde destacan la fermentación, digestión (aeróbica y anaerobia en tanques de reacciones controladas) y los termoquímicos secos, en donde destacamos la combustión simple, combustión compleja, gasificación, torrefacción y la pirólisis, de manera adicional y formando parte del presente estudio, tenemos a los termoquímicos húmedos, en donde destacan la gasificación, la licuefacción y la carbonización hidrotérmicas [3]. Esto determina que la participación de la energía proveniente de los residuos sólidos urbanos esté en crecimiento a nivel mundial, y a nivel local en el norte del Perú, tal como se observa en la Figura 2.

La mayor parte de esta energía térmica se utiliza para la generación de energía y potencia eléctrica y para vender a los sistemas interconectados o sistemas aislados (siendo esta una de las principales maneras

es que se expande la energía distribuida). También se utiliza para la producción de calor industrial, calefacción y acondicionamiento del aire. En el pasado siglo XIX, se utilizó como combustible para las máquinas y procesos fabriles, los combustibles sólidos, [4] luego en el siglo XX se pasó a la utilización de combustibles líquidos, por su fácil distribución logística, su alta concentración energética, permitiendo autonomía de desplazamiento, hasta que a finales del siglo pasado se comenzó a evidenciar lo predicho por el ingeniero Hubbert y sus modelos logísticos de agotamiento de las reservas de petróleo de un pozo, cuenca petrolera, país, continente y el mundo entero.

Participación de tipos de energía

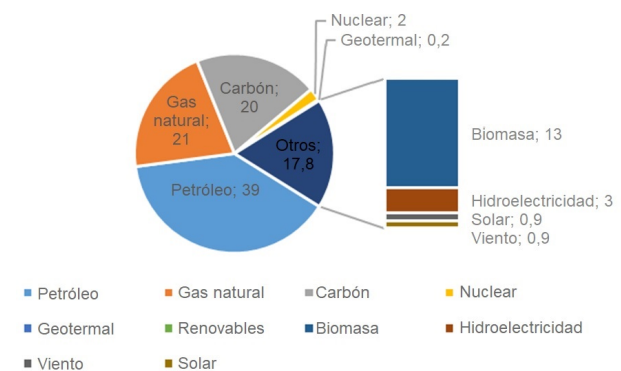


Figura 2. Participación mundial de la biomasa en la generación de energía [5]

Esto ha ocasionado que el siglo XXI se vislumbre como la era del combustible gaseoso y que, a mediados y finales del presente siglo, se transformará al vector energético hidrógeno, de preferencia en su presentación verde, el cual no será combustionado, sino transformado a electricidad, mediante la utilización de máquinas de hidrólisis y pilas de combustible, evitando también de esta manera la emisión de gases de efecto invernadero y su alta concentración en la atmósfera, causa principal de las perturbaciones atmosféricas, conocidas como efecto invernadero [6].

A su vez, esta generación de energía se clasifica en renovable, de acuerdo con la información mostrada en la Figura 3, en donde se visualiza su importancia en la matriz energética mundial. También se aprecia la disminución de la trascendencia de los hidrocarburos fósiles, sometidos a un proceso de cenit, que hace que cada vez sea menor el descubrimiento de nuevas reservas de cuencas petroleras, así como su producción, cada vez sean más remotos los lugares donde se extraen, como los mares profundos, la profundidad de la selva virgen, donde los impactos ambientales son cada vez mayores y cuesta más remediarlos o mitigarlos. Todo esto trae su correspondiente encarecimiento, lo cual provoca procesos inflacionarios en todos los países del mundo, pero con mayor énfasis en aquellos dependientes de

estos y el aumento del uso de las energías renovables no convencionales, tales como la eólica *on* y *off shore*, la fotovoltaica en zonas desérticas, y zonas urbanas de edificios de generación distribuida, la solar térmica con sales térmicas, pero también la biomasa urbana, la biomasa agrícola rural, dándole valor agregado a los productos, generando trabajo y riqueza en el sector rural [7].

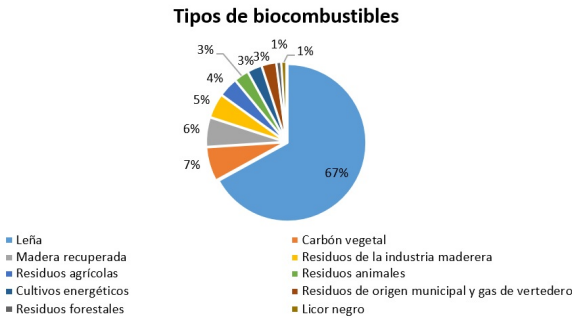


Figura 3. Composición de la producción energética por tipo de biocombustible [8]

En donde se pueden apreciar combustibles de biomasa tradicional, pero con un fuerte componente de impacto ambiental, tales como la leña, cuya producción significa deforestación de bosques secos en el norte del Perú.

Así mismo, se esquematiza, de manera sistemática, todas las posibilidades de aprovechamiento de la biomasa – residuos sólidos urbanos, que existen; en la Figura 4 se observa la posición que ocupan los procesos hidrotérmicos.

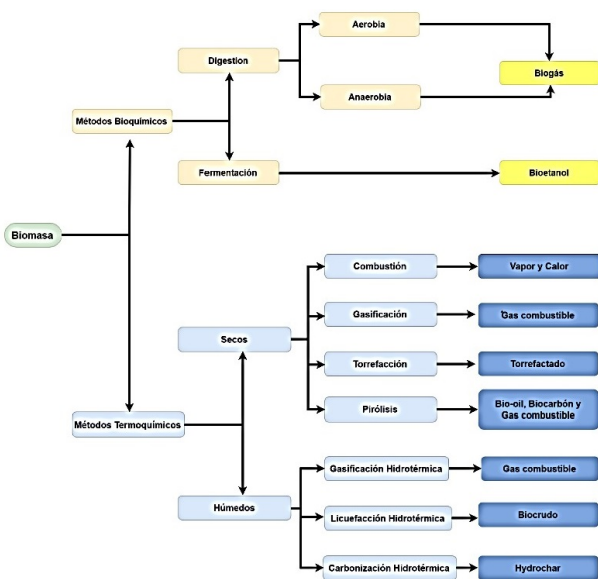


Figura 4. Diferentes métodos de aprovechamiento de los biocombustibles

Es decir, la región norte del Perú tiene un largo historial de utilización de la biomasa (en especial la

del bagazo de la caña de azúcar), con los procesos de combustión en hornos de calderos bagaceros en las empresas agroindustriales del azúcar, de gasificación de la cascarilla del arroz en los más de cien molinos grandes de arroz existentes en la región, así como los procesos a nivel prototipo de pirólisis anaeróbica para la generación de energía eléctrica y calor en procesos industriales, logrando ahorros en los costos de producción y mitigación de los impactos ambientales a la calidad del aire tanto en la concentración de cuerpo receptor como la concentración en los puntos emisores (chimeneas y otros), y de paso acabar con el problema de la disposición de la cáscara de arroz sobrante, los cuales son vertidos en botaderos que contaminan el aire, el agua de los cursos de agua lénticos y el suelo mismo, que pierde sus propiedades agrícolas superiores [9].

Además, debemos de tener en cuenta, que la carbonización hidrotérmica (CHT) es un proceso que ocurre en el rango de 200 a 300 °C, a la presión de vapor correspondiente, con tiempos de reacción que van de dos a varias horas. El principal objetivo de la carbonización hidrotérmica (CHT) es producir un sólido rico en carbono conocido como hydrochar [10].

De manera general, durante este proceso los carbohidratos hidrolizan y se disuelven completamente en la fase líquida para luego repolimerizar dando lugar al hydrochar y algunos subproductos como ácidos orgánicos y agua [11].

Todos estos trabajos se realizaron bajo el control y supervisión de los entes ambientales, encargados del procesamiento de los residuos sólidos orgánicos de la ciudad de Chiclayo, con perspectivas a utilizar los residuos de las actividades agrícolas, tales como el bagazo de la caña de azúcar, que tiene un uso energético por más de 140 años en la zona por la actividad azucarera industrial.

2. Materiales y métodos

Se procedió a la determinación del poder calorífico inferior de los RSU, para lo cual describimos los equipos e instrumentos, con los cuales calcularemos los poderes caloríficos de los residuos sólidos muestreados.

Bomba calorimétrica de volumen constante. Consta de un cilindro de acero inoxidable que se introduce en un balde isotérmico de una capacidad de más de dos litros de agua. También la integra un mezclador que se acciona por medio de un motor eléctrico de jaula de ardilla, que uniformiza temperaturas, [12] y así evitar la fuga de calor al exterior por conducción, convección o radiación. Se deben evitar los errores al ajustar la temperatura de la chaqueta durante las pruebas para mantener la alta precisión en las mediciones. La bomba sella con una cabeza con rosca mecanizada a precisión, la cual se cierra de manera manual y el sellado de

manera automática, lo cual permite el incremento de presiones [13].

En cuanto al montaje, este se realizará en etapas, y será en el siguiente orden:

El balde de un volumen mínimo de dos litros, del cual se comprueba que la temperatura inicial, sea de 25 °C, de acuerdo con la norma ASTM D240 – 09. En el caso de la ciudad de Chiclayo no se necesita un calentamiento previo, por ser esa la temperatura promedio anual, luego se prepara el pellet de los RSU, mediante un proceso de compactado a presión en máquinas fabricadas de manera especial por la universidad, de los cuales se calcula el poder calorífico, y se coloca el alambre térmico, que se conectara a los electrodos eléctricos. La bomba una vez cerrada se llena con oxígeno al 99 % con la supervisión debida por los riesgos del trasvase y se procede a conectar a una fuente eléctrica, provocando la combustión completa del material de prueba.

También se utilizó un termómetro de precisión, resolución de 0,01 °C, una balanza electrónica de precisión, marca OHAUS, de una resolución de 0,00001 gramos.

La masa de combustible es de 0,9 gramos a 1,1 gramos, a una presión de 380 psi, que se obtiene bombeando oxígeno y la presión de operación será de 380 psi.

La toma de datos debe realizarse cada cinco minutos, para luego de producirse la ignición del combustible, tomarse cada 15, 30, 45, 60, 75, 90 y 115 segundos.

Se deben tomar todas las medidas de seguridad pertinentes, expresadas en las respectivas matrices IPERC, como la presencia de extintores de fuego, sistemas de ventilación para evitar la concentración de gases explosivos y control de riesgos biológicos.

Como método de caracterización del poder calorífico de los residuos sólidos orgánicos de Chiclayo metropolitano, período 2016 a 2020, se realizó, un muestreo de sus residuos sólidos, consistente en obtener 100 kg de residuos sólidos, en la siguiente proporción, que se muestra en la Tabla 1, coincidiendo con lo determinado por Rodríguez [14].

Tabla 1. Producción porcentual de residuos sólidos

Ítem	Ciudad	Porcentaje
1	Chiclayo	52,85%
2	José Leonardo Ortiz	22,93%
3	La Victoria	9,27%
4	Pimentel	2,93%
5	Reque	1,71%
6	Pomalca	3,46%
7	Monsefú y Eten	6,85%
Total		100,00%

El segundo objetivo de esta investigación fue la demostración de la viabilidad técnica, a nivel experimental, de carbonizar biomasa húmeda y hacer combustión con carbón mineral para producir energía. Debemos de tener en cuenta, que la carbonización hidrotérmica es el proceso por el cual se somete al material a altas temperaturas, sumergido en un medio húmedo, sin permitir que exista ebullición.

Se ha detectado que por este tipo de reacción es posible carbonizar materiales lignocelulósicos sólidos, pero también polisacáridos disueltos en agua, obteniendo materiales carbonosos nanoestructurados como productos [15].

La particularidad de requerirse un medio acuoso resulta de gran utilidad para su aplicación a residuos que, justamente, tienen un alto contenido de agua, y que de no ser por este método requerirían de varios pasos de secado para poder ser carbonizados en seco y directamente.

Así mismo, debemos de indicar, que el desarrollo de la tecnología HTC (carbonificación hidrotermal) y su aplicación a nivel industrial fue al inicio posible gracias a la labor científica realizada por Friedrich Bergius hace aproximadamente cien años y complementado por posteriores desarrollos realizados, entre otros por Max Planck [16], indicando que también es objetivo el diseño y construcción de una planta de carbonización hidrotermal de biomasa a escala industrial, como parte de las labores de I + D del proceso.

La gran fortaleza y oportunidad que plantea el proceso HTC es que el proceso ocurre en medio acuoso, por lo que la humedad de biomasa de origen no resulta ningún problema. Por lo tanto, se consigue agregar el poder calorífico de la originaria biomasa de origen en un sólido biocombustible y, por otro lado, poder generar un agua fertilizada que puede ser reutilizada en las labores de riego [17].

Para el caso ideal de producción de biochar, seguiremos los procedimientos realizados, con varias alternativas de residuos sólidos procesados en la ciudad de Chiclayo metropolitano, los cuales procedemos a graficar y que nos servirá para medir la eficiencia del proceso de producción del hydrochar. Se pesó la biomasa húmeda a la entrada del proceso y luego del proceso de autoclave y escurrimiento y finalmente después de su pase por el horno.

Se procedió a limpiar y preparar la balanza de precisión para el pesaje de la biomasa, cuyo poder calorífico se procederá a medir.

Se produjo por compactación un pellet de biomasa de residuos sólidos urbanos de acuerdo con las muestras tomadas.

Se purgó con oxígeno la bomba calorimétrica, se limpió sus electrodos y se colocó el hilo de ignición calibrado.

Se colocó el pellet de biomasa dentro de la bomba calorimétrica, los electrodos eléctricos se conectaron

a la fuente de poder, para producir la chispa y la correspondiente combustión.

Se llenó con agua la chaqueta isotérmica y se habilitó el agitador para uniformizar temperaturas.

Se colocó la bomba en la chaqueta isotérmica; se conectó el termómetro que medirá el aumento de temperatura en el agua.

Se llenó la bomba calorimétrica con oxígeno, a una presión de 20 bar y a eliminar el exceso.

Se procedió a conectar eléctricamente los electrodos a la respectiva combustión y mediciones periódicas de temperatura, las cuales quedan registradas.

Se desconectaron los electrodos, se purgaron los restos de oxígeno, se desmontaron los electrodos y se limpió la bomba calorimétrica.

3. Resultados y discusión

3.1. Resultados

Como resultados, se tomaron cuatro submuestras, dos de Chiclayo, uno de José Leonardo Ortiz y otro de La Victoria, se efectuaron cinco ensayos calorimétricos por submuestra. Se obtuvieron los resultados, cuya media aritmética y desviación estándar de cada uno de los ensayos realizados, a condiciones normales (temperatura: 20 °C, presión: 1 atmósfera), podemos apreciar en la Tabla 2.

Tabla 2. Estadísticas descriptivas de poderes caloríficos inferiores – KJ/kg

Lugar	N.º de Muestra – Poder					Media	Desviación
	Calorífico Inferior Seco						
	1	2	3	4	5		
Chiclayo 1	7,150	6,970	7,210	7,145	7,110	7,117	0,090
Chiclayo 2	7,230	7,150	7,190	7,230	7,240	7,208	0,038
JLO 1	6,970	6,890	7,050	7,040	7,050	7,000	0,070
Victoria 1	7,070	7,030	7,050	6,950	6,940	7,008	0,059

La pregunta que se debe hacer, es que si la composición y, por lo tanto, el poder calorífico de las muestras es igual, para lo cual formulamos la hipótesis, que las poblaciones de RSU de los diversos centros son iguales en poder calorífico, por lo que trabajamos con la hipótesis $\mu_x = \mu_y$, con cinco grados de libertad ($n = 5$), lo cual de acuerdo con las tablas y un margen de confianza del 95 %, nos determina un nivel de significancia $\alpha = 1,8595$. Utilizando la ecuación (1).

$$t = \frac{(\bar{X} - \bar{Y}) - (\mu_X - \mu_Y)}{\sqrt{\frac{S_x^2 + S_y^2}{n}}} \quad (1)$$

De donde, reemplazando valores, se obtiene $0,9315 < 1,8595$, por lo que la hipótesis se rechaza, y se determina que las muestras de diferentes poblaciones de RSU son distintas en poder calorífico.

En cuanto a la viabilidad técnica, a nivel experimental de carbonizar biomasa húmeda y hacer combustión

con carbón mineral para producir energía, de acuerdo con los resultados verificados en la bibliografía, se ha obtenido biomasa densificada energéticamente, biocarbón (polvo negro homogéneo), teniendo materia prima biomasa de residuos sólidos urbanos, con rendimientos energéticos superiores al 40 %. El biocarbón que se obtuvo tiene un poder calorífico superior al de la original biomasa (> 15 %), y una humedad de magnitud del 3 % después de un filtrado. La reducción de la higroscopicidad es visible (disminución de hasta un 50 %), concordando con lo afirmado por Peng [18].

Habría que agregar que, los ensayos de combustión con carbón mineral, a nivel de laboratorio, pusieron en evidencia bajas interesantes de las emisiones de NO_x y SO_2 de 10 % y 30 %, de manera respectiva. Los resultados obtenidos se describen en la Tabla 3.

Tabla 3. Factores de conversión de RSU húmedos por etapas del proceso

Etapa/Muestra	1 (kg)	2 (kg)	3 (kg)	4 (kg)	5 (kg)
Peso inicial	8	8	8	8	8
Peso después de autoclave y prensado	0,6	0,62	0,59	0,6	0,61
Peso después de secado en horno	0,56	0,57	0,56	0,57	0,57

Con un poder calorífico promedio del material secado en horno:

Poder calorífico inferior de biochar, 29 200 KJ/kg, con lo cual podemos estimar el potencial energético de la ciudad de Chiclayo metropolitano, mediante la ecuación (2), y resumida en la Tabla 4.

$$PC \text{ Biochar } (TJ/día) = P \text{ RSU } (Tm/Día) \cdot PCIBiochar \quad (2)$$

Tabla 4. Producción de biochar por zona de Chiclayo metropolitano

Ítem	Ciudad	Producción de RSU Tm/Día	Potencial calorífico del Biochar TJ/Día
1	Chiclayo José	211,40	6172,88
2	Leonardo Ortiz	91,72	2678,22
3	La Victoria	37,08	1082,74
4	Pimentel	11,72	342,23
5	Reque	6,84	199,73
6	Pomalca	13,84	404,13
7	Monsefú y Eten	27,40	800,08
Total		400,00	11 688,01

Este biochar, mediante un ciclo termodinámico Rankine, y con una eficiencia promedio del 40 %, así mismo, previamente obtenemos una eficiencia de combustión del orden del 30 %, lo cual nos permite obtener los siguientes promedios de energía y potencia utilizable.

Energía: 16,23 GWhr, un factor de planta de 0,90
 Potencia: 591 MW base
 1,000 MW punta

Por ser la potencia entregada al sistema de generación eléctrica, totalmente modulable, es que se prioriza la entrega de energía en horas punta, por tener estas una mayor remuneración tanto como energía y como potencia y maximizar el ingreso y la rentabilidad de los emprendimientos a realizarse.

Produciendo energía, con emisión mínima de gases de efecto invernadero, azufre y compuestos peligrosos y tóxicos, como los furanos, etc., y ayudando a eliminar peligrosas costumbres desde el punto ambiental, tal como la quema de los residuos sólidos urbanos al aire libre, en el actual botadero municipal, donde la existencia de los cerros denominados siete techos, salvan a la ciudad de Chiclayo, de la contaminación ambiental y, de esta manera, erradicar el botadero municipal al aire libre, existente en las pampas de Reque, en la zona sur de la ciudad de Chiclayo metropolitano.

Las proyecciones de producción de energía por biochar en el tiempo, que tienen implícitos las variaciones por crecimiento vegetativo y composición de los RSU, en los diferentes sectores de Chiclayo metropolitano, se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Proyección de la producción de biochar de los distintos sitios de Chiclayo metropolitano

Año	Producción de Biochar en el mediano plazo (TJ/día)						
	Chiclayo	JL Ortiz	La Victoria	Pimentel	Reque	Pomalca	Monsefu
2023	6172,88	2678,22	1082,74	342,23	199,73	404,13	800,08
2024	6271,65	2671,52	1100,06	347,71	202,93	410,60	812,88
2025	6371,99	2664,85	1117,66	353,27	206,17	417,17	825,89
2026	6473,94	2658,18	1135,55	358,92	209,47	423,84	839,10
2027	6577,53	2651,54	1153,72	364,66	212,82	430,62	852,53
2028	6682,77	2644,91	1172,18	370,50	216,23	437,51	866,17
2029	6789,69	2638,30	1190,93	376,43	219,69	444,51	880,03
2030	6898,33	2631,70	1209,99	382,45	223,20	451,62	894,11
2031	7008,70	2625,12	1229,35	388,57	226,77	458,85	908,41
2032	7120,84	2618,56	1249,01	394,79	230,40	466,19	922,95

El creciente aumento de la proyección del aumento en el distrito de Chiclayo, la disminución en el distrito de José Leonardo Ortiz y el estancamiento en el distrito de La Victoria. Estas tendencias también las podemos visualizar en la Figura 5.

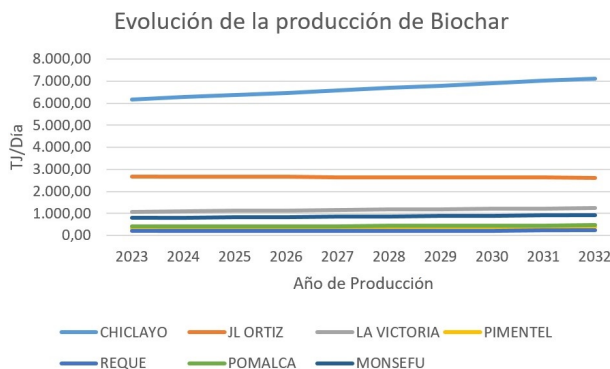


Figura 5. Evolución de la producción de Biochar en el tiempo

La producción de biochar en el proceso de carbonificación depende de una serie de factores, entre los cuales podemos mencionar la temperatura promedio del horno de secado, durante las diferentes, fases de secado del mismo, (ver Figura 6).

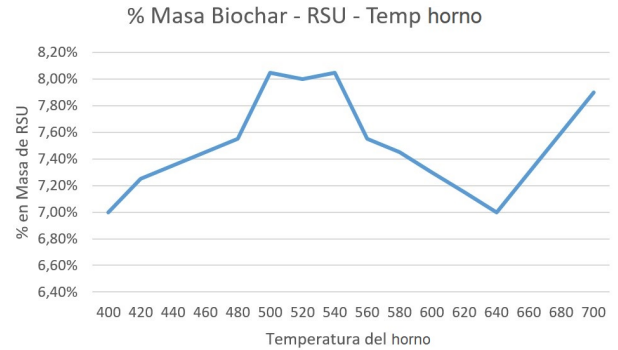


Figura 6. Producción de biochar (a partir de RSU), en función de la temperatura del horno

Existe también un interés académico cada vez mayor en los procesos de hidrotérmica, que se expresan en un crecimiento de las publicaciones acerca del tema. El interés en la CHT se percibe que ha aumentado con el objetivo de crear materiales carbonosos de última generación, por encima de la finalidad de producir biocombustibles sólidos [19].

3.2. Discusión

Del desarrollo del presente trabajo de investigación, se detectó la importancia de los RSU, en la ciudad metropolitana de Chiclayo, así como su potencial energético, para lo cual se procedió a su caracterización térmica, mediante el muestreo, de residuos sólidos urbanos, y la correspondiente determinación de su poder calorífico inferior. También se revisó la producción de carbón mediante el proceso de carbonización hidrotermal, con rangos de producción de 0,56 kg de biochar, por cada 8 kilos de RSU, concentrando su poder calorífico de 7100 KJ/kg a 29 200 KJ/kg, evitando la emisión de gases efecto invernadero y de furanos y demás gases venenosos, así como genera trabajo de manera directa e indirecta, coincidiendo con lo expresado por DosSantos [20].

También sobre la base de experiencias realizadas en otros ámbitos, [21], con resultados coincidentes, con el hecho que la producción de biochar, a partir de los RSU, por el método de la carbonización hidrotermal, depende de factores como la temperatura del horno (con resultados variables de aumento y disminución de la producción), tiempo de permanencia o retención, velocidad de calentamiento, relación solución-biomasa, presión a la cual se trabaja, uso de catalizadores homogéneos y no homogéneos, velocidad de los gases de combustión, entre otros. Solo se procederá al aná-

lisis del primer criterio, es decir, la temperatura del horno, de donde podemos apreciar que la producción de biochar, es variable con respecto a la temperatura, llegando a su máxima producción a las temperaturas de 520 °C y 600 °C, [22].

Resulta de importancia el análisis de eficiencia térmica de estos productos, análisis de cenizas residuales, esto en comparación con los resultados obtenidos por Trujillo [23], que nos indica que el rendimiento del biochar de gallinaza es constante con respecto a la temperatura. Y, por último, y no por eso menos importante, es la disponibilidad energética, que la podemos resumir en el orden de los 16,23 GWh, por día de trabajo del sistema de recolección de residuos sólidos en el área metropolitana de la ciudad de Chiclayo.

4. Conclusiones

Se confirma la necesidad de aprovechar energéticamente los RSU y demás residuos de la producción agrícola en la generación de energía eléctrica, para lograr una matriz energética sostenible y un sistema eléctrico peruano confiable y estable.

El poder calorífico inferior de los residuos sólidos urbanos húmedos de Chiclayo Metropolitano (en los distritos de Chiclayo, Leonardo Ortiz, La Victoria, Pimentel, Pomalca, Reque, Monsefú y Eten, ciudad y puerto), y con la ayuda de una bomba calorimétrica, es posible obtener mediante el procedimiento termoquímico, de carbonización hidrotérmica, la producción de biochar, el cual no solo tiene un potencial térmico y de generación de electricidad del orden de los 16,23 GWh por día y una potencia entre un rango de 591 a 1000 MWh, sino, además, tiene utilidades diversas en la industria bioquímica.

La temperatura óptima de mayor rendimiento en la obtención de biochar está en el rango de 520 a 700 °C, obteniéndose a la vez todo el potencial energético.

El potencial energético no es igual para los residuos sólidos urbanos de diferentes procedencias.

Como recomendaciones se indica, que se deben continuar los análisis, esta vez centrados en el análisis de la calidad ambiental de las cenizas (menor presencia de azufre y metales pesados), así como implementar el diseño y construcción de una planta de carbonización hidrotermal de biomasa a escala industrial.

Referencias

- [1] G. Garrote, H. Domínguez, and J. C. Parajó, "Hydrothermal processing of lignocellulosic materials," *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. 57, no. 3, pp. 191–202, 1999. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s001070050039>
- [2] BBC. (2018) Los 10 países que más y menos basura generan en América Latina (y cómo se sitúan a nivel mundial). [Online]. Available: <https://bbc.in/2NygIzo>
- [3] M. J. Antal and M. Gronli, "The art, science, and technology of charcoal production," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 42, no. 8, pp. 1619–1640, 2003. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/ie0207919>
- [4] Y. Pastor Férez, M. M. Martínez Segado, and R. Valdez Illán, *Construcción de una planta de producción de biochar*. Departamento de Ingeniería de Alimentos y del Equipamiento Agrícola, Área de Ingeniería Agroforestal. Universidad Politécnica de Cartagena, 2019.
- [5] WBA, *Global Bioenergy Statistics 2019*. World Bioenergy Association, 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/3VnXILC>
- [6] F. Bedussi, "Valutazione delle potenzialità del biochar come componente dei substrati di coltivazione," Ph.D. dissertation, 2015. [Online]. Available: <https://bit.ly/3irUnwk>
- [7] D. Mohan, C. U. J. Pittman, and P. H. Steele, "Pyrolysis of wood/biomass for bio oil: A critical review," *Energy & Fuels*, vol. 20, no. 3, pp. 848–889, 2006. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/ef0502397>
- [8] A. Brown, *Bioenergy roadmap 2017*. Agencia Internacional de la Energía, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3FePrUu>
- [9] M. C. Cueva Díaz, J. L. Rosaldo Santiago, and J. López Luna, "Evaluación de la toxicidad de los suelos mediante bioensayos con semillas," *INECC*, pp. 87–105, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3gLD9K7>
- [10] Y. Matsumura, "Chapter 9 - hydrothermal gasification of biomass," in *Recent Advances in Thermo-Chemical Conversion of Biomass*. Elsevier, pp. 251–267. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63289-0.00009-0>
- [11] L. Yang, C. Lu, Y. Gao, Y. Lin, J. Xu, H. Xu, X. Zhang, M. Wang, Y. Zhao, C. Yu, and Y. Si, "Hydrogen-rich gas production from the gasification of biomass and hydrothermal carbonization (HTC) aqueous phase." [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01197-9>
- [12] E. P. Stambaugh, "Hydrothermal processing – an emerging technology," *Materials & Design*, vol. 10, no. 4, pp. 175–185, 1989. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(89\)80003-2](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(89)80003-2)

- [13] D. Shoemaker, *Bomba calorimétrica de mediciones*. Wiley, 1996.
- [14] J. Rodríguez, *Caracterización de los residuos sólidos de la ciudad de Chiclayo*. Limusa, 2010.
- [15] N. Baccile, M. Antonietti, and M.-M. Titirici, "One-step hydrothermal synthesis of nitrogen doped nanocarbons: Albumine directing the carbonization of glucose," *ChemSusChem*, vol. 3, no. 2, pp. 246–253, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/cssc.200900124>
- [16] T. Wang, Y. Zhai, Y. Zhu, C. Li, and G. Zeng, "A review of the hydrothermal carbonization of biomass waste for hydrochar formation: Process conditions, fundamentals, and physicochemical properties," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 90, pp. 223–247, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.071>
- [17] C. W. Garland, J. W. Nibler, and D. P. Shoemaker, *Experiments in Physical Chemistry*. McGraw-Hill Higher Education, 2016. [Online]. Available: <https://bit.ly/3irVOen>
- [18] C. Peng, Y. Zhai, Y. Zhu, B. Xu, T. Wang, C. Li, and G. Zeng, "Production of char from sewage sludge employing hydrothermal carbonization: Char properties, combustion behavior and thermal characteristics," *Fuel*, vol. 176, pp. 110–118, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.02.068>
- [19] R. Conti, "Sintesi e caratterizzazione di carboni ottenuti dalla pirolisi di biomasse," 2012. [Online]. Available: <https://bit.ly/3GWKJMD>
- [20] J. V. dos Santos, L. G. Fregolente, M. J. Laranja, A. B. Moreira, O. P. Ferreira, and M. C. Bisinoti, "Hydrothermal carbonization of sugarcane industry by-products and process water reuse: structural, morphological, and fuel properties of hydrochars," *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 12, no. 1, pp. 153–161, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01476-z>
- [21] S. Mazumder, P. Saha, K. McGaughy, A. Saba, and M. T. Reza, "Technoeconomic analysis of co-hydrothermal carbonization of coal waste and food waste," *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 12, no. 1, pp. 39–49, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00817-8>
- [22] Z. Liu and R. Balasubramanian, "Hydrothermal carbonization of waste biomass for energy generation," *Procedia Environmental Sciences*, vol. 16, pp. 159–166, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.022>
- [23] E. Trujillo, C. E. Valencia A., M. C. Alegría-A, Alejandrina, and M. F. Césare-C., "Producción y caracterización química de biochar a partir de residuos orgánicos avícolas," *Revista de la Sociedad Química del Perú*, vol. 85, pp. 489–504, 2019. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.37761/rsqp.v85i4.262>