

RESIDUOS SÓLIDOS DOMICILIARIOS: CARACTERIZACIÓN Y ESTIMACIÓN ENERGÉTICA PARA LA CIUDAD DE CHIMBOTE

Serapio A. Quillos Ruiz^{a*}, Nelver J. Escalante Espinoza^a, Daniel A. Sánchez Vaca^a,
Luis G. Quevedo Novoa^b, Ronal A. De La Cruz Araujo^a

RESUMEN

El manejo y la disposición final de los Residuos Sólidos Domiciliarios (RSD) presentan desafíos y, a la vez, oportunidades para los países en vías de desarrollo y con poco progreso científico-tecnológico en este ámbito. En este trabajo se evaluó la caracterización de los RSD para realizar la estimación del potencial energético contenido en los Residuos Sólidos Orgánicos Domiciliarios (RSOD) de la ciudad de Chimbote. La muestra de estudio consistió en 60 viviendas, distribuidas en tres niveles socioeconómicos, tal como establece la metodología estadística del Ministerio del Ambiente del Perú. Así, entonces, se obtuvo una generación per cápita de RSD de 0,425 *kg/hab./día*, donde los RSOD representan el 69,03 % (0,297 *kg/hab./día*) de los RSD. Basado en estos resultados, el total de los RSOD alcanza el 69,8 *Tn/día*. Finalmente, se realizó una evaluación para estimar la recuperación energética contenida en los RSOD a través de la incineración, obteniéndose una generación de 15,33 *MW* al año 2017, situación que representaría un aumento del 8 % durante la década 2017-27. Al recuperar la energía contenida en los RSOD se puede contribuir a la reducción del consumo de combustibles fósiles, así como también a la disminución del impacto ambiental, evitando principalmente las emisiones de metano.

Palabras clave: residuo sólido domiciliario, energía renovable, metano, biogás

SOLID DOMICILIARY RESIDUES: CHARACTERIZATION AND ENERGY ESTIMATION FOR THE CITY OF CHIMBOTE

ABSTRACT

The management and final disposal of Residential Solid Waste (RSD) present challenges and, at the same time, opportunities for the developing countries, and with little scientific-technological progress in this area. In this work, the characterization of the RSD was evaluated to estimate the energy potential contained in the Residential Solid Organic Residues (RSOD) of the city of Chimbote. The study sample consisted of 60 dwellings, distributed into three

^{a*} Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional del Santa. Nuevo Chimbote. Ancash, Perú. Código postal 02710. squillos@uns.edu.pe

^b Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo. Perú. Código postal 13007.

socioeconomic levels, as established by the statistical methodology of the Ministry of the Environment of Peru. Thus, a per capita generation of RSD of 0.425 *kg/person/day* was obtained, where the RSOD represent 69.03 % (0.297 *kg/person/day*) of the RSD. Based on these results, the total of the RSOD reaches 69.8 tons/day. Finally, an evaluation was carried out to estimate the energy recovery contained in the RSOD through incineration, obtaining a generation of 15.33 *MW* by 2017, a situation that would represent an increase of 8 % during the decade 2017-27. Recovering the energy contained in the RSOD can contribute to the reduction of the fossil fuel consumption, as well as the reduction of the environmental impact therein, mainly avoiding methane emissions.

Key words: Residential solid waste, renewable energy, methane, biogas.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la fuente principal para la obtención de energía es a partir de los combustibles convencionales como el petróleo, carbón y gas natural. En consecuencia, sus reservas son altamente explotadas, generando una elevación en sus precios, un posible agotamiento, vulnerabilidad del suministro y un incremento del calentamiento global causado por las emisiones de CO₂ debido al alto consumo de los mismos¹. Además, el continuo crecimiento de la población mundial incrementa la demanda energética a niveles no proyectados en el pasado². Esto obliga a buscar nuevas fuentes de generación de energía, las cuales se encontrarían en el desarrollo de las energías renovables^{2,3}. La tecnología necesaria para el aprovechamiento de estas últimas se encuentra en pleno desarrollo, pero aún presenta problemas financieros para su implementación³. Los estudios indican que estas formas de generación cada vez se vuelven más eficientes, económicas y autosostenibles para las diversas necesidades (confort, transporte, cocina, industria y electricidad)¹.

El Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables (PEAER)⁴ de México, señala las principales áreas para un sistema energético sostenible y establece que el mayor potencial teórico se encuentra en la energía solar, eólica, recursos geotérmicos y la biomasa. Esta última está compuesta por bagazo de caña, licor negro y biogás, el cual se encuentra conformado por lodos residuales, residuos agropecuarios, residuos industriales y residuos sólidos municipales (RSM). Los RSM son la mayor fuente de producción de biogás y la segunda fuente de generación eléctrica de la biomasa⁴. Por lo tanto, los RSM son una fuente potencial de energía renovable.

En los países sudamericanos los procesos de recolección, tratamiento, aprovechamiento y disposición final de los RSM son realizados con tecnologías inadecuadas, pues la participación de los sectores informales es muy frecuente debido a que representa su principal sustento económico³.

La ciudad de Chiclayo representa uno de los puntos más críticos con RSM en el Perú, debido a que su disposición final es un botadero a cielo abierto, albergando animales carroñeros

que son una fuente de transmisión de enfermedades para la población cercana. El botadero municipal se ubica entre los límites urbanos de Chimbote y Coishco, con un área de 16 hectáreas, donde son depositados 1 060,23 *Tn* semanalmente. La generación diaria *per cápita* (en adelante referido sólo como generación *per cápita* o GPC) de RSM fue de 0,64 kg/hab./día al año 2015, que es cercana al promedio nacional⁵.

Los RSM son un grave problema de contaminación que afecta el medio ambiente y la vida humana. Por esta razón, para la optimización de la recuperación energética desde los residuos se debe tener una adecuada caracterización para cada una de las fuentes que contribuyen a estos RSM, tales como residuos sólidos domiciliarios (RSD), residuos sólidos comerciales, residuos sólidos agrícolas, etc⁶. Adicionalmente, otro factor es el estudio de la relación entre el nivel de vida (clasificación socioeconómica) y el promedio de residuos generados por cada persona⁷.

Los esfuerzos por resolver el problema actual son pocos. Sólo se conoce una institución que desea invertir en los RSM con el fin de obtener productos a través del reciclaje. Del mismo modo, se tendría el efecto contaminante porque lo que se puede reciclar típicamente es menos del 50%³. Para aprovechar de alguna forma la fracción de RSD que no se puede reciclar (principalmente componente orgánico), se deben evaluar dos aspectos básicos: la cantidad que se genera y su contenido energético⁶. El grado de aprovechamiento de este contenido energético depende del proceso de conversión de la energía química contenida en la basura a energía útil; esos procesos son, por ejemplo, los de tipo biológico y los de tipo térmico⁶.

La caracterización de la composición de los RSD nos permite determinar la cantidad de residuos sólidos orgánicos domiciliarios (RSOD) que serán convertidos a biogás por fermentación anaeróbica o por incineración para generar energía útil y así poder determinar su potencial energético⁶. Al conocer la caracterización de los RSD se puede establecer el mercado de reciclaje y el potencial energético⁵. Además, es necesario aclarar que las fuentes de RSD forman la mayor parte de RSM y son más homogéneas en generación *per cápita* comparadas con otras fuentes que son fluctuantes según el rubro (por ejemplo, hoteles, industrias o mercados)⁵. Es importante mencionar además que la disposición de los RSM se presenta como un problema político y tecnológico, debido a falta de decisión para establecer el relleno sanitario en el lugar apropiado, donde se debe complementar con un marco legal proporcionado por las entidades involucradas (MINAM, Sigersol, municipalidades)³. También se requiere estudios consistentes de los RSM para tener claro los conceptos de generación *per cápita* y caracterización de residuos. De esta manera, poder desarrollar proyectos destinados a corregir las ineficiencias en el manejo y disposición final de los RSM, con el objetivo de que a mediano y a largo plazo se pueda establecer programas educativos ambientales³.

SIGERSOL reporta, a través de su portal web, la caracterización de los RSM de la ciudad de Chimbote, de los años 2011 al 2015, en base a la ley N° 1278 Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos y su Reglamento N° 174-2017-MINAM, pero no expone de manera explícita la metodología usada. Esto indica que es necesario tener la información actualizada y, sobre todo, particularizada para los RSD⁵.

En la presente investigación se ha realizado la caracterización de los RSD de la ciudad de Chimbote, para luego realizar una estimación del potencial energético contenido en los RSOD. Para esto se ha determinado la población actual, con la cual se ha obtenido el tamaño de la muestra (cantidad de viviendas). Se ha calculado la generación *per cápita* diaria global (evaluada por una semana); así como el porcentaje de cada uno de los componentes de los RSD. Con la información previa y las propiedades físico-químicas de los RSOD, hemos realizado una estimación energética para la década 2017-27.

Este artículo está organizado como sigue. En la sección de materiales y métodos se describe la metodología seguida para caracterizar los RSD y realizar la estimación energética de los RSOD. En la sección de resultados mostramos la caracterización realizada en una semana y los valores promedio de GPC, así como valoración porcentual de energía a obtener. Resumimos nuestros principales hallazgos en la sección de conclusiones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio

La ciudad de Chimbote está situada en la costa norte del Perú ($9^{\circ}05'07''$ S, $78^{\circ}34'41''$ O) y tiene una superficie de 1 467 km² (figura 1). En el año 2007 tenía una población de 215 817 habitantes, con una tasa de crecimiento de 0,8 % anual, reportado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) del Perú; la población urbana comprende el 96,13 % y la rural el 3,87 %, contando con un total de 49 903 viviendas al año 2007⁸. Es la ciudad de mayor superficie de la provincia del Santa (46,2 %); ha tenido un rápido crecimiento demográfico y económico dado por el desarrollo de la pesca, la cual contribuye con el 18,1 del PBI sectorial (3,3 PBI nacional) y es una de las 10 ciudades más importantes del país. Pero, a la vez, con alta contaminación, por no tener implementada una gestión aceptable para los RSM que genera⁸.

Tamaño de muestra

La proyección de la población para un año requerido se determina en función de la ecuación⁹

$$P_F = P_i(1+r)^t \quad (1)$$

donde P_F es la población final proyectada, P_i representa la población inicial del último censo nacional, r es la tasa de crecimiento anual inter censal y t es el número de años que se desea proyectar a la población, a partir de la población inicial.



Figura 1. Mapa de la ciudad de Chimbote (Fuente: mapa tomado con autorización de la Municipalidad Provincial del Santa)

Para la caracterización de los RSD se usa una metodología en función del procedimiento estadístico, donde la muestra representativa de viviendas es obtenida por la siguiente ecuación⁹:

$$n = \frac{Z_{1-\alpha/2}^2 N \sigma^2}{(N-1) E^2 + Z_{1-\alpha/2}^2 \sigma^2} \quad (2)$$

siendo n es el tamaño de la muestra, N el número de viviendas de la ciudad (49 903)⁸, σ la desviación estándar (0,250 kg/hab./día) esperada⁹, es decir, en cuánto se espera que varíe la GPC de los RSD. $Z_{1-\alpha/2}$ representa el nivel de confianza (1,96), se considera este valor para obtener un confianza del 95 % en los valores de generación de RSD. E es el error permisible del 10 % la estimación de la GPC nacional de RSM (0,70 kg/hab./día)¹⁰, resultando $E = 0,07$ kg/hab./día⁹. La toma de muestras se realiza cumpliendo con los procedimientos y lineamientos internacionales aceptados por la legislación ambiental peruana⁹. La aplicación del método de análisis de residuos sólidos y la metodología para el desarrollo del estudio, determina la eficiencia de separación y permite la recuperación de los RSD generados⁹, que comprenden: papel y cartón, plásticos, madera, textil, orgánicos, metales, vidrio y otros. Al año 2017 Chimbote tuvo una población de 238 396 habitantes obtenida mediante la ecuación (1) y el tamaño de la muestra (cantidad de viviendas) se calculó usando la ecuación (2), adicionando un 15 % para las muestras no consistentes⁹. La cantidad de muestras resultantes fue 60 y se repartió en tres estratos socioeconómicos alto (A), medio (B y C) y bajo (D)^{8,9} representando cada estrato, por su porcentaje de contribución al total⁹. Esto en cumplimiento a lo establecido por la norma nacional y que es de aplicación frecuente en la literatura revisada⁹. Como es recomendado en las normas, la tarea de caracterización es realizada durante ocho días consecutivos en las viviendas seleccionadas aleatoriamente en cada estrato, descartando la data del primer día y siendo útil solo los datos de siete días⁹. En la tabla 1 se evidencia la

distribución de muestras por niveles socioeconómicos^{9,10}. En esta se observa que la mayoría de viviendas fueron seleccionadas en el estrato socioeconómico bajo (D) debido a que es el estrato mayoritario de la ciudad (43,5 %).

Tabla 1. Distribución de las muestras de RSD en los tres niveles socioeconómicos.

Estrato socioeconómico	Población (%)	N° de muestras
Alto <i>A</i>	24,1	14
Medio <i>BC</i>	32,4	19
Bajo <i>D</i>	43,5	27
Total		60

Para calcular la GPC de cada domicilio y por estratos socioeconómicos utilizamos las ecuaciones:

$$GPC_i = 1/7N_h \sum_{p=1}^{p=7} mRSD_p \quad (3)$$

$$GPC_e = 1/N_v \sum_{i=1}^{i=N_v} GPC_i \quad (4)$$

donde GPC_i representa GPC en $kg/hab./día$ de RSD por vivienda sin importar el estrato socioeconómico, $mRSD_p$ representa la masa de los residuos de la vivienda (en kg) para el día p , N_h representa el número de habitantes de la vivienda; GPC_e es el resultado del *per cápita* del estrato socioeconómico, para el número de viviendas (muestras), N_v , correspondientes al estrato e ($e=A, BC, D$) según la tabla 1.

Finalmente, para evaluar la generación *per cápita* de la ciudad de Chimbote, GPC_d , usamos la ecuación:

$$GPC_d = \sum_{e=1}^{e=3} GPC_e Po_e \quad (5)$$

donde la GPC_d se mide en $kg/hab./día$ y Po_e es el porcentaje poblacional del estrato. La ecuación (5) determina la GPC de los RSD de Chimbote. De la misma forma las ecuaciones (3), (4) y (5) determinan los *per cápita* de los RSOD, utilizando solamente los componentes orgánicos en lugar del total.

La labor de campo comprendió la recolección de los residuos de las viviendas seleccionadas en forma aleatoria para cada estrato socioeconómico, luego los residuos son llevados al laboratorio para la caracterización y pesado de cada componente en la balanza electrónica marca *Aro* de 5 kg de capacidad. Realizándose seguidamente la evaluación de las características físico-químicas de los residuos tal como se describe a continuación.

Análisis físico-químico

En el Laboratorio de Físicoquímica de la Universidad Nacional del Santa (UNS), se determinó el poder calorífico superior (*PCS*) de los RSOD, donde se pesó 1g de muestra seca (pulverizada

y homogénea), llevándose en forma de pastilla al crisol de la bomba calorimétrica marca PARR, modelo 3115, adicionando el oxígeno a 18 atm para la combustión de la muestra. Para calcular el poder calorífico inferior (PCI) usamos la relación¹¹.

$$PCI = PCS - \frac{w}{100} 600 \quad (6)$$

Donde ambos el PCS y el PCI están en kJ/kg y w es la humedad en (%). Se tomó 10 muestras independientes provenientes de los diferentes estratos y los valores promedio obtenidos se reportan en la sección de resultados.

Potencial energético

Los RSOD son una fuente de energía, la cual se puede obtener por incineración o digestión anaeróbica, principalmente. En la figura 2 representamos los dos procesos principales de transformación de los RSOD a energía útil.

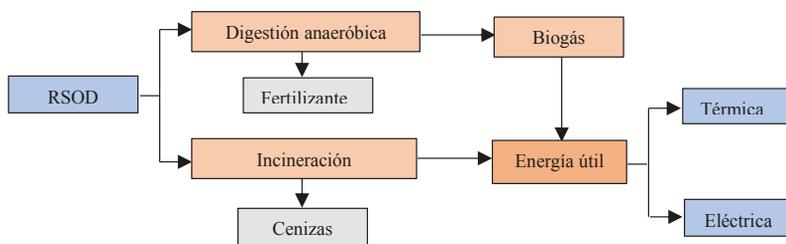


Figura 2. Procesos para la transformación de los RSOD a energía útil

La producción de energía secundaria de los RSOD se realiza por medio de procesos tecnológicos que permiten transformarla a energía útil (térmica o eléctrica), lo cual se viene aplicando en ciudades medias y grandes metrópolis como sucede en Europa, Asia y Estados Unidos. Esto se presenta como una opción de aprovechamiento de energía renovable¹². Entonces, es necesario determinar el potencial energético en MW para tener una estimación del recurso renovable en los próximos años de los RSD y RSOD utilizando las mejores tecnologías disponibles¹². Para este fin utilizamos las relaciones:

$$GD = (GPC_{org})(P_F) \quad (7)$$

$$Pe = (PCI)(GD) \quad (8)$$

donde GD es la generación diaria de RSOD en kg/día de la ciudad, GPC_{org} es la generación per cápita de los residuos orgánicos domiciliarios en kg/hab./día. El Pe es el potencial energético en kJ/día. Para la generación de energía útil por incineración usando el método de cogeneración se puede producir energía eléctrica con eficiencia de aprovechamiento que está entre 20-30 % y energía térmica de alrededor de 50 % con pérdidas del proceso que varían entre 20-25 %¹³.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de los RSD

La caracterización diaria de RSD de la ciudad de Chimbote se muestra en la figura 3. En esta, la generación diaria *per cápita* de RSD, GPC_d , y la generación diaria *per cápita* de RSOD, GPC_{org} , durante los siete días de estudio se muestran en las figuras 3a y 3b, respectivamente. En la figura se observa los cambios diarios del promedio de GPC al igual que los cambios en sus desviaciones estándar, pero estas fluctuaciones no tienen tendencia notable a crecer o a disminuir. Esto implica que las muestras diarias son estadísticamente independientes entre sí, justificando la obtención de un promedio semanal. La desviación estándar máxima obtenida para GPC_d fue de 0,241 kg/hab./día (ver día 6 en figura 3a) y para GPC_{org} fue de 0,203 kg/hab./día (ver día 5 en figura 3b). Estas desviaciones obtenidas son menores a la asumida (0,250 kg/hab./día) para calcular el tamaño de la muestra, indicando que no es necesario recalcular el tamaño de esta para actualizar la caracterización. Estas desviaciones estándar están en el rango observado, por ejemplo, en el distrito de Ate en Lima ($\sim 0,318$ kg/hab./día)¹⁴.

Es importante notar que la GPC_{org} representa más del 50 % de la GPC_d (figura 3), indicando el alto contenido de componente orgánico que se puede aprovechar para generar energía útil. Porcentajes más detallados de cada uno de los componentes de los RSD son mostrados más adelante como valores promedio de los siete días de caracterización.

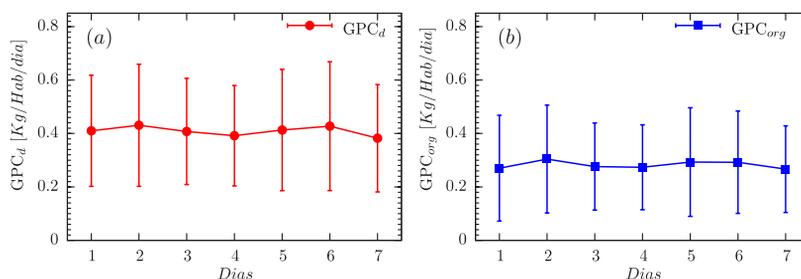


Figura 3. Caracterización diaria de RSD para la ciudad de Chimbote para el año 2017. (a) Generación *per cápita* total de RSD, GPC_d , y (b) generación *per cápita* de RSOD, GPC_{org} , contenidos en los RSD.

La tabla 2 muestra la producción *per cápita* ponderada, GPC_p , con ponderación dada por la contribución porcentual de cada estrato socioeconómico, Po_e , para la ciudad de Chimbote. Estos resultados son valores promedio de los siete días de caracterización. El estrato A con nivel socioeconómico alto muestra una mayor generación *per cápita* (0,532 kg/hab./día) respecto a los otros, pero como su contribución porcentual es menor respecto a los estratos medio BC y bajo D, el promedio *per cápita* global ($GPC_d=0,425$ kg/hab./día) es predominado por el estrato medio ($GPC_{BC} = 0,429$ kg/hab./día). Esto indica que el aumento de la GPC_d depende principalmente del nivel socioeconómico medio, mientras que la distribución porcentual de estratos no cambia. Los resultados son cercanos a los reportados para el distrito

de Ate, Lima, con per cápita por estratos de 0,530 0,710 y 0,665 *kg/hab./día* en los niveles *A*, *B* y *C*, respectivamente¹⁴. Estos resultados son ligeramente mayores a los que hemos obtenido y se justifican por tener un mejor nivel socioeconómico. Esto confirma que los residuos aumentan con la calidad de vida⁷.

Tabla 2. Generación *per cápita* ponderada de residuos sólidos domiciliarios de Chimbote.

Estrato Socioeconómico		GPC_e (<i>kg/hab./día</i>)	Po_e (%)	GPC_d (<i>kg/hab./día</i>)
Alto	<i>A</i>	0,532	24,10	0,425
Medio	<i>BC</i>	0,429	32,40	
Bajo	<i>D</i>	0,363	43,50	

El GPC_d mostrado en la tabla 2 está por encima de los reportados para los distritos de Pachacámac (0,37 *kg/hab./día*), Punta Negra (0,26 *kg/hab./día*); pero cercanos a los de Lurigancho (0,44 *kg/hab./día*), Puente Piedra (0,49 *kg/hab./día*) y Santa Rosa (0,47 *kg/hab./día*); pero mucho menores que en los distritos de San Miguel (1,23 *kg/hab./día*), Santiago de Surco (1,15 *kg/hab./día*) y otros distritos de la ciudad de Lima de mayor poder adquisitivo, como reporta el Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA) del Perú. Esta comparación refuerza lo enunciado anteriormente.

El promedio *per cápita* nacional es de 0,7 *kg/hab./día*¹⁰. Chimbote se encuentra en un valor menor al nacional pero superior a los valores reportados para Amazonas (0,3 *kg/hab./día*) y Huancavelica (0,2 *kg/hab./día*)¹⁰. Indicando todavía un alto grado de generación de RSD.

La tabla 3 muestra por separado la generación *per cápita* del componente en mayor porcentaje contenido en los RSD, nos referimos al componente orgánico (RSOD). Esta muestra que los RSOD representan un 69 % ($100\% GPC_{org} / GPC_d$) de los RSD. Una distribución detallada de los componentes del RSD se reporta en la tabla 4.

Tabla 3. Generación *per cápita* de residuos sólidos orgánicos domiciliarios de Chimbote.

Estrato Socioeconómico		$GPC_{e,org}$ (<i>kg/hab./día</i>)	Po_e (%)	GPC_{org} (<i>kg/hab./día</i>)
Alto	<i>A</i>	0,374	24,10	0,293
Medio	<i>BC</i>	0,315	32,40	
Bajo	<i>D</i>	0,233	43,50	

Tabla 4. Caracterización de los RSD

Nº	Subproducto	%
1	Orgánico	69,03
2	Papel y cartón	12,70
3	Plásticos	10,58
4	Madera	0,23
5	Textil	0,47
6	Metales	1,18
7	Vidrio	2,82
8	Otros	2,99
		100,00

En la tabla 4 se observa que los RSOD representan el 69 % del total de RSD. El material potencialmente reciclable (papel y cartón, plásticos, madera, textil, metales y vidrio) representa el 28 % y el 3 % es material no reciclable y no orgánico (denominado como “otros” en la tabla 4). A nivel nacional, estos porcentajes son: 55 % material orgánico, 20 % materiales reciclables y 25 % materiales no reciclables¹⁵; pero incluye residuos sólidos de otras fuentes que en total forman los RSM. El elevado porcentaje de componente orgánico lo atribuimos a que solo estamos caracterizando los residuos sólidos domiciliarios, donde el material orgánico es el principal componente (restos de alimentos, frutas y plantas). Este valor alto de componente orgánico es similar a lo reportado para el distrito de Ate en Lima (60,58 %)¹⁴ y Limoncocha en Ecuador (73 %)¹¹. Además, es comparable con altos porcentajes reportados para otros países en los cuales el componente orgánico puede superar el 70 % de los RSM^{2,3}. Por consiguiente, es importante conocer el porcentaje del RSOD, para lo cual se requiere realizar la caracterización con bastante precisión, de esta manera determinar la estimación del aprovechamiento de la energía. La ciudad de Chimbote cuenta con una fracción orgánica de ~70 %, que es altamente representativa y atractiva para proyectos de inversión con objetivos de recuperación energética y al cuidado del medio ambiente.

Estimación del aprovechamiento energético de los RSOD

Se requiere aprovechar los RSOD aplicando la recuperación de energía contenida en los residuos, proceso conocido como basura a energía o *Waste to Energy* (WTE)^{2,12}. Solamente usamos el componente orgánico porque los otros elementos energéticos son aprovechados para el reciclaje, cuya actividad es sustento para las familias de bajo recursos y además regulada por la ley peruana No 29419. En la tabla 5 tenemos las propiedades físico-químicas promedio de los RSOD para 10 muestras independientes.

Tabla 5. Poder calorífico superior (*PCS*) y poder calorífico inferior (*PCI*) de los RSOD. Se muestra valores promedio evaluados para 10 muestras independientes.

<i>PCS</i> (kJ/kg)	<i>PCI</i> (kJ/kg)	Humedad (%)	Densidad (g/ml)
19 414	18 956	76,258	1,031

Los valores de *PCS* y *PCI* de los RSOD son superiores al valor recomendado (13 000 kJ/kg) para lograr una eficiencia energética de ~30% en un incinerador de residuos para producir electricidad y de ~50% para aprovechar como energía térmica¹¹. La generación nacional de RSM es en promedio 22 390 Tn/día (Año 2015), que se recogen en las municipalidades del país¹⁰. Al año 2017 la cantidad de RSD obtenida para la ciudad de Chimbote resultó en 101,13 Tn-RSD/día calculadas usando la GPC_d mostrado en la tabla 2 y usando la ecuación 7. Este total diario de RSD de la ciudad de Chimbote corresponde al 0,5 % del promedio nacional. De la misma forma, aplicamos las ecuaciones 1, 7 y 8 para obtener los resultados mostrados en la tabla 6. En esta tabla, se observa que al 2017 se puede obtener 15,33 MW de potencia de generación (*PG*) usando los RSOD.

La WTE que se puede estimar para los próximos años (2017-2027), depende de los factores que afecten a la generación *per cápita* de RSOD. Estos factores son el aumento de la

población, calidad de vida y gestión de los residuos, principalmente. Aclaremos que para los próximos años solamente podemos realizar una estimación, debido a que el periodo de evaluación no es suficiente para realizar una proyección.

Tabla 6. Potencial energético (*PE*) y potencia de generación (*PG*) de los RSOD estimada para el año 2017

Población (hab.)	GPC_{org} (kg/hab./día)	RSOD (kg/día)	<i>PE</i> (MJ/día)	<i>PG</i> (MW)
238 394	0,293	69 849,44	1 324 141	15,33

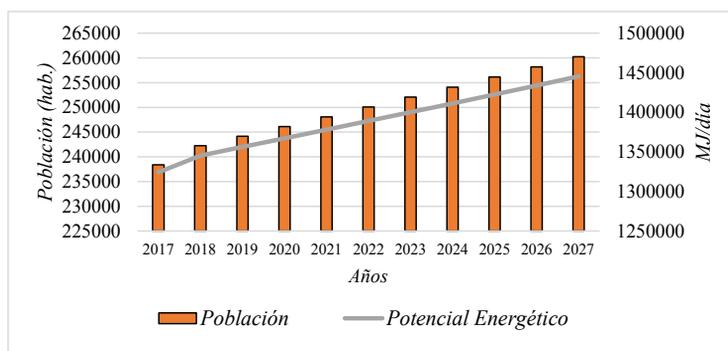


Figura 4. Estimación energética de los RSOD, desde el año 2017 hasta el año 2027, para la ciudad de Chimbote. Las barras verticales representan la cantidad de habitantes para cada año, mientras que la línea continua representa el potencial energético en *MJ/día*.

En la figura 4 se muestra la estimación del potencial energético evaluado con el incremento poblacional (según ecuación 1) y asumiendo un valor constante de generación *per cápita* ($GPC_{org} = 0,293 \text{ kg/hab./día}$). Además, mostramos el crecimiento poblacional, el cual es el factor que causa el incremento del potencial energético. Se observa que a 10 años el potencial energético puede aumentar desde $1\,324\,141 \text{ MJ/día}$ ($15,33 \text{ MW}$) hasta $1\,433\,968 \text{ MJ/día}$ ($16,60 \text{ MW}$), lo que representa un incremento de 8 % respecto al potencial actual (al 2017). Obviamente, este valor puede ser modificado si cambia la generación *per cápita* de la ciudad. Pensando en aprovechar la energía obtenida por incineración y utilizando cogeneración, la figura 5 muestra la variación para la energía térmica y eléctrica estimada para 10 años. En esta se muestra que mediante la cogeneración se ofertaría una potencia de generación térmica de $7,66 \text{ MW}$ y eléctrica de $4,60 \text{ MW}$ al 2017, ambas con un incremento leve pero continuo hasta alcanzar un 8 % de incremento dentro de 10 años. La primera opción de WTE lo tiene la incineración, cuya tecnología está más desarrollada que otros métodos; además reduce grandemente el volumen inicial y en el futuro permitiría procesar los residuos reciclables de ser el caso². Estimaciones similares se podrían realizar en caso de usar el método de digestión anaeróbica (figura 2) para generar biogás. El estudio de este método está fuera del alcance de este trabajo. El lector interesado podría revisar los modelos europeos y americanos para realizar una estimación energética razonable con este método².

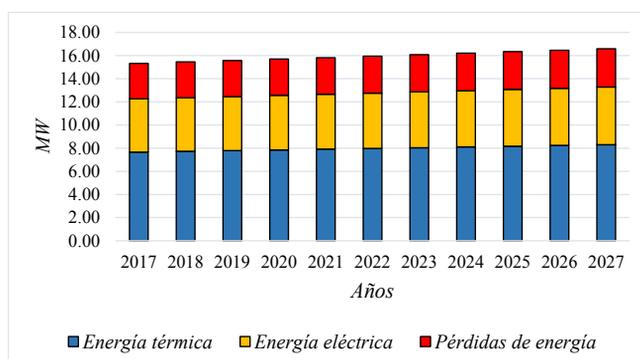


Figura 5. Estimación energética de generación de los RSOD para la ciudad de Chimbote usando cogeneración. Las barras azules representan el estimado de energía térmica que se produciría (50 % del PE), las amarillas la energía eléctrica (30 % del PE) mientras las rojas representan el estimado de las pérdidas que siempre estarían presentes (20 % del PE).

El proceso de incineración se ha desarrollado bastante a diferencia de la digestión anaeróbica, la cual tiene como producto intermedio el biogás, para luego llegar a la combustión. Pero en ambos procesos persiste el problema de la polución, porque toda combustión genera emisiones de CO_2 , causantes del efecto invernadero, cuando la combustión es completa. En la combustión incompleta, produce además emisiones de CO, que afectan al ser humano y, en caso extremo, causar la muerte. Una importante ventaja de ambos procesos es que evitan las emisiones de metano (gas de efecto invernadero) y permiten la recuperación energética, dando utilidad a los residuos domiciliarios considerados inútiles.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha caracterizado los residuos sólidos domiciliarios de la ciudad de Chimbote y se ha estimado la energía que se podría recuperar del componente orgánico contenido en estos. Nuestras muestras fueron separadas por componentes como típicamente se hace en otras ciudades y/o países, tales como materia orgánica, papel y cartón, metales, plásticos, madera, textiles, vidrio y otros. Se obtuvo una alta producción *per cápita* del componente orgánico (69,03 % en peso de los RSD) respecto al promedio nacional (55 % en peso de los RSM)¹⁵, resultados cercanos a los obtenidos por otras ciudades.

Los plásticos, juntos con el papel y cartón, son los otros componentes que presentan un alto porcentaje (~12 %), mientras que los demás componentes no superan el 10 % de la generación *per cápita* global, que resultó en 0,425 kg/hab./día. Claramente, si evaluáramos otros RSM tales como provenientes de restaurantes, mercados, industrias metalmecánicas, hoteles, etc., obtendríamos diferentes composiciones. Esto muestra una necesidad apremiante de tener una caracterización específica de los RSD y actualizada para cada ciudad del Perú, de tal manera que se pueda realizar una estimación más razonable del potencial energético nacional proveniente de estos residuos.

En nuestros países en vías de desarrollo la recuperación “energética” del papel, cartón, plásticos, metales y vidrio se realiza a través del reciclaje, el cual es sustento de vida de una población considerable. Por lo tanto, la estimación energética realizada ha sido solamente en base al componente orgánico, RSOD. La generación de energía usando los RSOD, al año 2017, resultó en 15,33 *MW* aproximadamente y se estimó que aumentaría a 16,60 *MW* en 10 años (incremento de 8 %). De ser implementada la generación de energía a partir de los RSOD a través de la incineración, esta representaría aproximadamente el 8,66 % (al 2017) de la producción energética por biomasa en el Perú¹⁵.

El beneficio de transformar los RSOD en energía, va a permitir reemplazar porcentualmente el uso de los combustibles fósiles. Asimismo, se evitaría las enfermedades de efecto biológico por el inadecuado manejo de estos. Además, se disminuiría las emisiones de metano al medio ambiente y se aumentaría la vida útil de los botaderos municipales al disminuir la cantidad de residuos depositados.

AGRADECIMIENTOS

A la UNS, por su apoyo a través del Fondo Especial de Desarrollo Universitario (FEDU) para la ejecución de esta investigación. A los estudiantes del curso de Ingeniería Ambiental de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UNS, por contribuir en la recolección de los RSD, en especial a André Rodríguez Baltazar, Encarnación Ocaña Sánchez y a Luis Cabanillas Castillejo. Expresamos también nuestro agradecimiento al Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) – Chimbote, en especial al Ing. Edwin Flores Castillo, por sus fructíferas discusiones en el análisis de los resultados. Agradecemos también al Laboratorio de Físicoquímica de la UNS por contribuir con las mediciones del poder calorífico de los RSOD.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Romero A. Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles. *Rev R Acad Cienc Exact Fis Nat.* 2010; 104(2): 331-345.
2. Kumar A, Samadder SR. A review on technology options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. *Waste Manage.* 2017; 69: 407-422.
3. Vásquez OC. Gestión de los residuos sólidos municipales en la ciudad del Gran Santiago de Chile: Desafíos y oportunidades. *Rev Int Contam Ambie.* 2011; 27(4): 347-355.
4. PEAER. Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018: El programa especial para el aprovechamiento de energías renovables. [Internet] Estados Unidos Mexicanos. [Consultado el 17 de noviembre del 2017]. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/249/PEAER-2014.pdf>.
5. MINAM-Sigersol. Sistema de información para la gestión de residuos sólidos: Informe anuario 2011-2015.

6. Arvizu Fernández JL. La basura como recurso energético: situación actual y prospectiva en México. *Rev Ing Civil*. 2011; 496: 36-44.
7. Topanou N, Domeizel M, Fatombi J, Josse RG, Aminou T. Characterization of household solid waste in the town of Abomey-Calavi in Benin. *J Environ Prot*. 2011; 2(6): 692-699.
8. Miyashiro L, Mazuelos G, Toledo E, Vega R. Estudio de mercado de la vivienda social en la ciudad de Chimbote. Fondo Mivienda. 2009; 74 pp.
9. MINAM. Guía metodológica para el desarrollo del Estudio de Caracterización para Residuos Sólidos Municipales (EC-RSM). [Internet]. MINAM. [Consultado el 18 de diciembre del 2017]. Disponible en: <http://redrrss.minam.gob.pe/material/20150302182233.pdf>.
10. Registro Nacional de Municipalidades 2016. Informe técnico 2. [Internet]. INEI. [Consultado el 14 de febrero del 2018]. Disponible en: <https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/informe-tecnico-n-2-registro-nacional-de-municipalidades-2016.pdf>.
11. Oviedo J, Coral K, Cifrian E, Andrés A. Valorización energética de los RSU de la parroquia Limoncocha-reserva biológica ecuador. 2015-2016. VII Simposio de Iberoamericano en Ingeniería de Residuos. 13-14 de julio de 2017; Santander, España. 745-750.
12. Tugov AN. Experience of Using Municipal Solid Waste in the Energy Industry (An Overview). *Therm Eng*. 2015; 62(12): 853-851.
13. Romero Salvador A. La incineradora de residuos: ¿está justificado el rechazo social? *Rev R Acad Cienc Exact Fis Nat*. 2010; 104(1): 175-187.
14. Municipalidad de Ate. Estudio de caracterización de residuos sólidos domiciliarios del distrito de Ate. Ate: ECI, IPES; 2011. 84 pp.
15. MINEM. Anuario ejecutivo de electricidad 2014. Dirección de Estudios y Promoción Eléctrica.[Internet]. MINEN. [Consultado el 23 de febrero del 2018]: http://www.minem.gob.pe/_publicaSector.php?idSector=6.