

Aprovechamiento y potencial energético de los desechos sólidos urbanos generados en el cantón Guayaquil

David Lindao C., Elvis Quisnancela C.
Carrera de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador
gdavidlindao@gmail.com, elvisquisnancela@gmail.com

Palabras Claves: *Caracterización, Residuos sólidos municipales, Características de residuos, Gestión, Reciclaje, Energía.*

Resumen

Guayaquil es una ciudad de dos millones de personas, quienes generan una alta producción de residuos sólidos que va en aumento a lo largo de los años. Sin embargo parte de estos residuos podrían ser reutilizados. El presente estudio analizó seis rutas de recolección representando los niveles socioeconómicos bajo, medio y alto de la ciudad de Guayaquil. Este estudio también estima el potencial energético y reciclable de los residuos sólidos. Se analizaron los desechos sólidos residenciales y comerciales recolectados en la ciudad de Guayaquil, excluyendo los desechos industriales, de construcción y los desechos peligrosos.

Los resultados mostraron que 58,68% de los desechos sólidos generados en las seis rutas son residuos orgánicos. En un escenario de 100.000 toneladas de residuos sólidos, este porcentaje podría generar KWH 14'382,692.9 a través de procesos de incineración. Esta es suficiente energía eléctrica para abastecer a 946.178 hogares al año. Si la producción de biogás a partir de residuos sólidos orgánicos fuera la alternativa, se podría generar 7'424,136 KWH, lo cual es suficiente energía eléctrica para abastecer la demanda de viviendas 484,864.98 anuales.

Otro hallazgo es que 32.78% de los residuos sólidos generados en las seis rutas analizadas se consideran recuperables.

Abstract

Guayaquil is a city of two million people, who generate a high production of solid waste that is increasing over the years. However part of this waste could be reused. The present study analyzed six collection routes representing the low, medium and high socioeconomic levels of Guayaquil city. This study also estimates the energy and recycling potential of solid waste. It is analyzed the residential and commercial waste collected in Guayaquil city, excluding industrial, construction and hazardous waste.

The results showed that 58.68% of solid wastes generated in the six routes are organic waste. In a 100,000 tons of solid waste scenario, this percentage could generate KWH 14'382,692.9 through incineration processes. This is enough electricity energy to supply 946.178 households per year. If biogas production from this organic solid waste were the alternative, it might generate 7'424,136 KWH, which is enough electric power to supply the demand for 484,864.98 homes annually.

Another finding is that 32.78% of solid wastes generated in the six routes analyzed are considered recoverable.

Keywords: *Characterization, Municipal Solid Waste, Waste composition, Disposal, Recycling, Energy.*

1. Introducción y Antecedentes

El crecimiento acelerado de la población, su crecimiento económico y su consecuente crecimiento de los estándares de vida han traído aumento a la generación de desechos sólidos, de ahí que supone un desafío para los países en desarrollo el manejo adecuado de estos desechos (Seo et al., 2004). Según el Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos (PNGIDS), en la actualidad la generación de residuos en el Ecuador es de 4,06 millones de toneladas métricas al año y una generación per cápita de 0,74 kg. Se estima que para el año 2017 el país generará 5,4 millones de toneladas métricas anuales. Sumado a que en Ecuador, desde el año 2002 hasta el 2010, de un total de 221 municipios 160 disponían sus desechos en botaderos a cielo abierto. Los restantes 61 municipios, presentaban un manejo de sus desechos con insuficientes criterios técnicos, en sitios de disposición final parcialmente controlados, según el PNGIDS. De ahí surge la necesidad de cuantificar los desechos que se podrían aprovechar mediante la caracterización de los mismos ya sea para darles un nuevo uso o incluso para la generación de energía eléctrica disminuyendo así el uso de materia prima virgen y ahorrando espacio en rellenos sanitarios en el caso de que se contara con uno.

El presente proyecto muestra un análisis sectorizado, en base a una caracterización sistemática de los residuos generados en un espacio muestral de la ciudad de Guayaquil, para el cual se ha considerado los residuos sólidos urbanos (RSU), como objeto para su respectivo análisis. Los RSU representan todos los residuos generados en la comunidad, sin considerar los industriales y agrícolas. Otras definiciones mencionan que todo tipo de desecho provenientes de oficinas, complejos de infraestructuras, áreas verdes, etc, pero que estén relacionados a desechos domésticos, en tanto no sean peligrosos, se puede tomar como desechos sólidos urbanos (Den Boer et al., 2009).

Nuestra área de estudio está dentro del cantón Guayaquil el cual se encuentra ubicado en la parte suroccidental de la provincia del Guayas, entre los 2°3' y 2°17' de latitud sur; y los 79°59' y 79°49' de longitud oeste (CempEcuador, 2014). Como información general es importante conocer la generación de residuos sólidos del área de estudio. La Ciudad de Guayaquil tiene una producción de RSU de 1600 t/día, con una generación per cápita de 0.70 kg./hab/día (Guido Acurio, 1997).

Según el Consorcio Puerto Limpio en el periodo de Enero a Mayo del 2012 se recolectaron en promedio 99,636 toneladas (Consorcio Puerto Limpio, 2014) de

desechos no peligrosos en el área servida de la zona urbana de la ciudad.

Tabla 1. Desechos recolectados de Enero a Junio del 2012 (Consorcio Puerto Limpio, 2014).

Mes	Peso (Ton.)
Enero	99,114.30
Febrero	95,080.14
Marzo	104,830.25
Abril	97,454.88
Mayo	101,701.73
Junio (1 al 21)	67,731.78

4. Metodología

4.1. Elección de los sectores a analizar

Con el objetivo de llevar a cabo la recolección y transporte de los desechos sólidos residenciales a cargo del consorcio puerto limpio, la M.I. Municipalidad de Guayaquil a sectorizado a el área urbana servida de la ciudad en dos zonas de servicio, denominadas Zona A y Zona B. Dentro de estas zonas, se han establecido áreas denominadas sub-zonas y a su vez dentro de estas constan unidades espaciales más pequeñas llamadas micro-rutas las cuales corresponden a las áreas recolección a cargo de los camiones. Actualmente Guayaquil cuenta con 24 sub-zonas, y 174 micro-rutas de recolección (Consorcio Puerto Limpio, 2014).

A fin de elegir las micro-rutas con tales características socioeconómicas se utilizó un indicador que muestra el consumo de energía eléctrica de los hogares de Guayaquil construido a partir de Censo Nacional de Población y vivienda del 2010 (Villa G., 2013). Este indicador divide a gran parte de la zona urbana de la ciudad en polígonos cuyos colores van de acuerdo a una escala de generación del 1 (mínimo consumo eléctrico) al 7 (máximo consumo eléctrico).

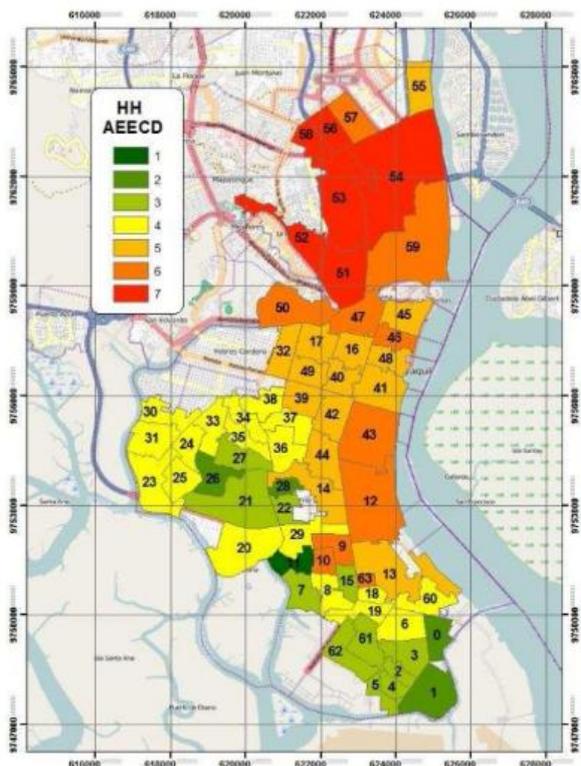


Figura 1. Indicador de consumo de energía eléctrica en la ciudad de Guayaquil (Villa G., 2013)

A partir de la información de gasto eléctrico de varias áreas urbanas de Guayaquil, se estableció llamar estratos bajos a los sectores que presentan un bajo gasto eléctrico, mientras que a los que presentan un alto gasto de energía se les denominó como estratos altos. También constan niveles medios de consumo de energía, para los cuales les corresponde un estrato medio.

Tabla 2. Micro-rutas elegidas

Estrato	Sector	Código de micro-ruta
Alto	Ceibos	11B-7R
	Alborada	10A-1R
Medio	Centenario	14A-2R
	Centro	1A-3R
Bajo	Sergio Toral	Sin código
	Trinitaria	16A-2R

Camiones adecuados se encargan de la recolección de los desechos dispuestos por la población en cada micro-ruta a una frecuencia y horario establecidos por el consorcio puerto limpio. A continuación se muestra el recorrido que realiza el camión recolector para cada micro-ruta.



Figura 2. Mapa de las micro-rutas seleccionadas para el muestreo.

La mayoría de las micro-rutas fueron muestreadas en dos ocasiones, la primera durante el mes de abril del 2013 y la segunda durante mayo del mismo año.

4.2. Muestreo

Para cada micro-ruta de recolección se establecieron 10 puntos de muestreo y se tomaron 4 muestras en cada uno de ellos, es decir 40 muestras por cada micro-ruta. Para tomar las muestras se utilizaron sacos pintados de color reflectivo y enumerados del 1 al 40, para facilitar su identificación. Además se elaboraron formularios para registrar información referente a la ruta de recolección y pesos de las muestras. Para efectos del muestreo de cada una de las micro-rutas se usó el siguiente protocolo;

Luego de llegar al inicio del recorrido, dándole delantera al camión recolector se identificaron uno a uno los puntos de muestreo. La distribución a lo largo de la micro-ruta y la cantidad de desechos fueron los criterios para seleccionar cada uno de los 10 puntos de muestreo. Una vez identificado el punto de muestreo se tomaron 4 muestras, considerando como una muestra a un saco llenado con desechos presentes en cada punto. Estas muestras fueron pesadas en el sitio con la ayuda de una balanza y dejadas en el mismo lugar en donde se encontraban para que sean recogidas por el camión al momento que este hacia su paso.

Las muestras (sacos) fueron recogidas por el camión recolector, el cual las transportaba al relleno sanitario

Las Iguanas junto con los demás desechos de la micro-ruta. Una vez en el relleno sanitario y luego de la descarga del camión en un espacio adecuado se procedía a buscar las 40 muestras de desechos que el camión había recolectado en ruta, al momento de haber encontrado las muestras se registraba el peso de cada una de ellas. Finalmente, se realizó la caracterización de desechos de cada muestra, este procedimiento consistía en abrir el saco y clasificar los desechos por su tipo; orgánico, plástico, papel, vidrio, metal, y misceláneos, para luego registrar su peso.

5. Resultados

5.1. Residuos Aprovechables

Se analizaron los datos recolectados considerando las variabilidades que presentaban los mismos, por lo consiguiente se realizaron dos análisis, el primero considerando la variabilidad por punto de muestreo, es decir teniendo en cuenta la variabilidad de los valores recolectados con respecto a su ubicación, y el siguiente análisis que se realizó fue en el que se consideró la variabilidad temporal por micro-ruta de recolección, es decir considerando la variación de los datos recolectados en la primera salida de muestreo con respecto a los que se obtuvieron un mes después en la segunda salida, sin importar la ubicación de cada punto de muestreo.

Tabla 3. Porcentajes estimados de aprovechamiento por punto

Micro- Rutas	% Orgánicos	% Recuperables
Ceibos	59,49	34,84
Alborada	55,16	39,49
Centenario	52,80	39,73
Centro	34,59	63,66
Sergio Toral	58,15	32,08
Trinitaria	59,26	18,74
Promedio	53,24	38,09
Desv. Est.	9,50	14,69

Tabla 4. Porcentajes estimados de aprovechamiento por micro-ruta

Micro- Rutas	% Orgánicos	% Recuperables
Ceibos	66,73	28,92
Alborada	58,43	36,47
Centenario	55,29	36,81
Centro	52,26	46,80
Sergio Toral	60,38	29,80
Trinitaria	58,97	17,87
Promedio	58,68	32,78
Desv. Est.	4,91	9,72

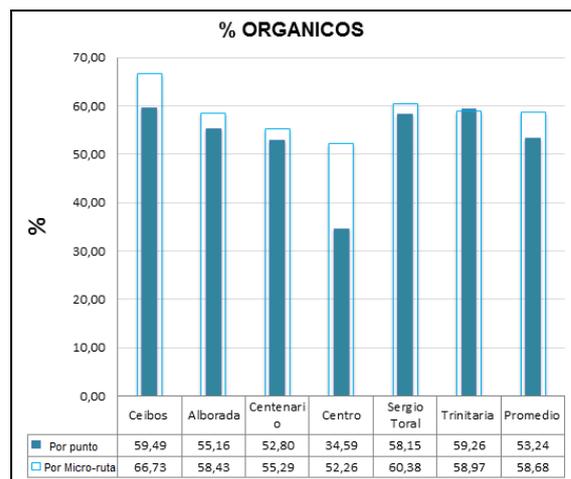


Figura 3. Porcentajes estimados de contenido orgánico

En el primer análisis, un punto promedio está compuesto en más del 50% por material orgánico, a excepción de los puntos pertenecientes a la micro-ruta del sector Centro, que revelan un valor menor cuando se la analiza su porcentaje orgánico, y esto es razonable debido a que esta micro-ruta presentó hacimientos con grandes porcentajes de papel, plásticos, etc.

Paralelamente en el análisis por micro-ruta, se puede observar un resultado similar en todos los sectores, en donde las micro-rutas analizadas presentan en promedio más del 50% de contenido orgánico.

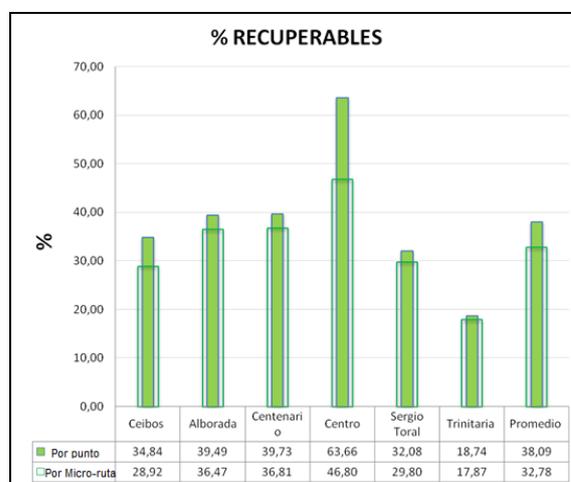


Figura 4. Porcentajes estimados de residuos recuperables

Los porcentajes de residuos recuperables por otra parte, tienen diferentes valores por sector, siendo el más notable la micro-ruta del sector Centro que sobrepasa el 60% en contenido por punto, y a nivel de micro-ruta contiene 46.8%, siendo en ambos, la micro-ruta con mayor porcentaje de residuos reciclables.

5.2. Potencial Energético de los residuos orgánicos

Para el cálculo del potencial energético, únicamente se consideró el valor promedio de muestras de residuos recolectados en Guayaquil, además los porcentajes de residuos orgánicos por micro-ruta hallados en el presente trabajo.

Guayaquil generó un promedio de 99,636 toneladas de desechos, de los cuales el 97% son desechos de tipo urbano, es decir aproximadamente 96,647 Ton. Al haber muestreado las micro-rutas en dos ocasiones tenemos como resultado que en promedio el 58,68% de los desechos en cuestión son de tipo orgánico, si bien es cierto es un dato que no puede ser tomado como un porcentaje mensual, por tanto se lo considera una estimación en base a lo encontrado.

Tabla 5. Porcentaje de contenido orgánico mensual estimado

	%	Ton
Producción mensual	100	96,647
Porcentaje Orgánico	58,68	56,712.46

El 5% (Tchobanoglous, Theisen, & y Vigil, 1994) de las 56,712.46 Ton corresponden a cenizas, esta cantidad no se considera para el cálculo de potencial energético, es así que para la estimación de energía se considera 53,876.84 Ton.

Tabla 6. Composición estequiométrica de fracción orgánica (Tchobanoglous, Theisen, & y Vigil, 1994)*.

Porcentaje Orgánico	% (100)	Ton (56,712.46)
Carbono	48*	27,221.98
Hidrógeno	6,4*	3,629.60
Oxígeno	37,6*	21,323.88
Nitrógeno	2,6*	1,474.52
Azufre	0,4*	226.85
Cenizas	5*	2,835.62

5.2.1. Potencial energético mediante procesos termoquímicos

Los procesos termoquímicos de aprovechamiento de energía tales como la incineración usan la energía calorífica de los desechos orgánicos, para hallar el potencial energético en calorías estimado por mes a partir del peso se usó la siguiente equivalencia; 1Kg de desechos orgánicos = 998 Kcal (Tchobanoglous, Theisen, & y Vigil, 1994). Y para hallar el potencial energético en kWh estimado por mes se usó; una Kcal equivale a 0,001163 KWh.

Para convertir la energía total a energía eléctrica se debe considerar la eficiencia del incinerador, La eficiencia energética de una incineradora es como máximo 23% para la generación de electricidad (Murphy, J. D. and E. McKeogh, 2004).

Tabla 7. Producción mensual estimada de energía eléctrica por incineración

Residuos orgánicos (ton/mes)	Calorías (Kcal/mes)	Potencial energético (kWh/mes)	Energía eléctrica (kWh/mes)
53,876.84	5.376 *10 ¹⁰	62'533,447.39	14'382,692.9

5.2.1. Potencial energético mediante el aprovechamiento del biogás

Para estimar el potencial energético del biogás, se realizaron las siguientes consideraciones; una tonelada de RSU en reactores es capaz de producir 60 m³ (Rolando C., 2007) de biogás (60% metano (CH₄)) con un poder calorífico de 6 kWh/m³. Tomando en cuenta toda la fracción orgánica de desechos generada en la ciudad de Guayaquil durante el periodo de Abril a Mayo del 2011 se calculó la cantidad teórica de biogás y gas metano generado así como su potencial energético.

Para aprovechar la energía del biogás existen varias tecnologías, una de las más empleadas, son los motores de combustión interna, para este cálculo se consideró el motor CAT 3520C (Rolando C., 2007), uno de los más utilizados en Europa, el cual alcanza un eficiencia del 38% para la conversión de la energía contenida en el metano a energía eléctrica.

Tabla 8. Producción mensual estimada de energía eléctrica por aprovechamiento de biogás

Residuos orgánicos (ton/mes)	Biogás (m ³ /mes)	Potencial energético (kWh/mes)	Energía eléctrica (kWh/mes)
53,876.84	3'232,610.4	19'395,662.4	7'370,351.7

6. Conclusiones

- En un periodo promedio de generación mensual estimado, el 58,68 % de los desechos sólidos Guayaquil, tratados en una planta de aprovechamiento energético por incineración de residuos sólidos con un 23% de eficiencia, representan 14'382,692.9

KWH, energía eléctrica suficiente para abastecer 78,848 viviendas en un mes por lo consiguiente 946,178 viviendas al año. Lo cual representa un ahorro de \$ 24'260,001.9 al año en gastos de energía eléctrica.

- En un periodo promedio de generación mensual estimado, el 58,68 % de los desechos sólidos Guayaquil, tratados en una planta de aprovechamiento energético por la utilización de biogás producido por los residuos sólidos con un 38% de eficiencia, representan 7'424,136 KWH, energía eléctrica suficiente para abastecer 40,405 viviendas en un mes, por lo consiguiente 484,864.98 viviendas al año. Lo cual representa un ahorro de \$12'431,938 al año en gastos de energía eléctrica.

7. Recomendaciones

- Estadísticamente 2 únicos muestreos mensuales no permiten hacer extrapolaciones a promedios mensuales. Por lo que deben considerar calcular la muestra mínima que represente el universo
- Realizar el estudio de caracterización de los desechos considerando también aquellos meses en los que se produce menos desechos, y también los meses de máxima generación.
- Realizar el estudio de caracterización en meses en los cuales se presentan lluvias, para determinar la influencia de la humedad en el peso de los residuos sólidos.

8. Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro de Agua y Desarrollo Sustentable (CADS), por el financiamiento de este trabajo de investigación, así como también al Doctor Luis Domínguez por ayudar con la investigación.

9. Referencias

- George Tchobanoglous ,1998 *Gestión Integral de Residuos sólidos* , Volumen I, 3-4, 90-91, 93-94
- (PNGIDS) Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos – PNGIDS ECUADOR 2012, <http://www.ambiente.gob.ec/programa-pngids-ecuador/>

- CempEcuador. (2014). Información General de Guayaquil. Obtenido de http://cempecuador.com/guiaturistica/prov_guayas_1-guayaquil.html

- Consorcio Puerto Limpio. (2014). Recolección de Desechos Domiciliarios. Obtenido de <http://www.puertolimpio.com/>

- Den Boer Emilia, Jecdrzak Andrzej, Kowalski Zygmunt, Kulczycka Joanna, Szpadt Ryszard, 2010. A review of municipal solid waste composition and quantities in Poland. *Waste Management* 30, 369–377

- Guerrero, L.A., Maas, G., Hogland, W., 2013. Solid waste management challenges for cities in developing countries. *Waste Management* 33, 220–232. [http:// dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.008](http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.008).

- Guido Acurio, A. R. (1997). Diagnóstico de la Situación del Manejo de Residuos Sólidos Municipales en América Latina y el Caribe. Washington, D.C.

- Magrinho, A., Didelet, F., Semiao, V., 2006. Municipal solid waste disposal in Portugal. *Waste Manage. (Oxford)* 26 (12), 1477–1489.

- Methods in Korea. *Journal of Environmental Engineering Div., ASCE* 130 (1), 81–89.

- Metin, E., Erozturk, A., Neyim, C., 2003. Solid waste management practices and review of recovery and recycling operations in Turkey. *Waste Manage. (Oxford)* 23 (5), 425–432.

- Murphy, J. D. and E. McKeogh ,2004. "Terchnical, economic and environmental analysis of energy production from municipal solid waste")

- Rolando Chamy, E. V. (2007). Identificación y Clasificación de los Distintos Tipos de Biomasa para la Generación de Biogás. Santiago de Chile. ISBN: 978-956-7700-08-0

- Seo, S., Aramaki, T., Hwang, Y., Hanaki, K., 2004. Environmental impact of solid waste treatment

- Sujauddin, M., Huda, M.S., Rafiqul Hoque, A.T.M., 2008. Household solid waste characteristics and management in Chittagong, Bangladesh. *Journal of Waste Management* 28, 1688–1695.

- Tavares-Campos, H. K. Recycling in Brazil: Challenges and prospects. *Resources, Conservation and Recycling* 85 (2014) 130– 138.

- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & y Vigil, S. (1994). Gestión Integral de Residuos Sólidos. Madrid: McGraw-Hill.
- Villa G., V. R. (2013). Estimating the Relationship Between Socioeconomic Determinants and Solid Waste Production for the Simulation of Waste Production Patterns: The Guayaquil, Ecuador Case Study. Sardinia.
- White PR, Franke M, Hindle P. Integrated solid waste management: a life cycle inventory. Gaithersburg: Aspen Publishers, Inc; 1999 [New York: Chapman and Hall,1995].