

Producción de lixiviados, comparación del método de Tchobanoglous con experimentos en lisímetros

Lixivate production, comparison of the method of Tchobanoglous with experiments in lysimeters

Federico Von Buchwald de Janon ¹, Pablo Fausto Martínez Neira ²

Recibido: Setiembre 2018 - Aprobado: Noviembre 2018

RESUMEN

Los métodos más utilizados para disponer de los residuos sólidos urbanos son los rellenos sanitarios, su mayor impacto ambiental lo generan los lixiviados; existe un criterio generalizado que cuando no hay lluvias no se generan lixiviados. El libro Gestión Integral de residuos sólidos de Tchobanoglous 1998, es la mayor referencia de manejo de residuos sólidos urbanos y tiene un procedimiento para el cálculo de la producción de lixiviados, el mismo que se aplicó considerando una sola capa, sin influencia de aguas lluvias, y se lo comparó con resultados experimentales de lisímetros con diferentes combinaciones de componentes de residuos, encontrándose coincidencias en combinaciones con bajos contenidos de materia orgánica pero diferencias en combinaciones con altos contenidos de materia orgánica.

Palabras clave: Rellenos sanitarios; lixiviados; lisímetros.

ABSTRACT

Sanitary landfills are the most widely used methods to dispose urban solid waste, its greatest environmental impact is generated by leachate, and there is a generalized criterion that when there are no rains, leachate is not generated. The book Integral Management of solid waste by Tchobanoglous is the greater reference of urban solid waste management and has a procedure for the calculation of leachate production, this was implemented considering a single layer without rainwater influence, which was compared with experimental results of lysimeters with different residue components combinations, finding coincidences in combinations with low content of organic matter but differences in compositions with high contents of organic matter.

Key words: Sanitary landfill; leachate; lysimeters.

¹ Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Lima, Perú. Doctorando en Ciencias Ambientales. Profesor en la Universidad Católica Santiago de Guayaquil, Facultad de Ingeniería, director del Departamento Técnico del Relleno Sanitario Las Iguanas (ILM), Guayaquil, Ecuador. E-mail: fritzvb25@icloud.com

² Ingeniero Civil, Representante Legal del Relleno Sanitario Las Iguanas (ILM), Guayaquil, Ecuador. E-mail: pablo_martinez_n@hotmail.com

I. INTRODUCCIÓN

En el mundo se generan anualmente 1.9 billones de toneladas de residuos sólidos urbanos (RSU), el 30% no se recolectan. El 70% de las ciudades utilizan como sistema de disposición final, por su bajo costo, botaderos a cielo abierto y rellenos sanitarios (RS) (Waste Atlas Report, 2013); países industrializados como EE. UU mantienen el 22% de su disposición final de RSU en rellenos sanitarios (Environmental Protection Agency EPA, 2006).

Gran parte de la literatura menciona que la materia orgánica de los RSU, se descompone en fracción no biodegradable y fracción biodegradable en líquidos, vapor y gases, los que no producen lixiviados a menos que estén influenciados por lluvias (Stegmann, Heyer & Cossu, 2005; Melo, Ferreira & Paixao, 2015; Orth, 1981; LaGrega, Buckingham, & Evans, 1996; Qasim & Chiang, 1994; Röben, 2002). En esta investigación comparamos la producción de lixiviados calculada con el método desarrollado por George Tchobanoglous en el libro Gestión integral de residuos sólidos, GIRS (Tchobanoglous et al., 1998), sin considerar la incidencia de las lluvias, situación que es común en ciudades de la costa del Perú, regiones del Ecuador, Argentina, Chile, etc., con los resultados obtenidos en Guayaquil, Ecuador mediante proceso experimental en lisímetros, basándose en la hipótesis de que la aplicación del método de Tchobanoglous et al. (1988), da resultados semejantes a los obtenidos por métodos experimentales en lisímetros.

Determinar la producción de lixiviados es de vital importancia, ya que éstos son potenciales contaminantes de los medios acuáticos, por tener concentraciones de 15 a 300 veces mayores que lo permisible en el parámetro (demanda química de oxígeno DQO) (Tchobanoglous, Theisen & Vigil, 1998) para vertido en cuerpos de agua (Ministerio del Ambiente, 2015 Ecuador; MINAM decreto supremo 015-205, Perú), de igual forma lo son los metales pesados que ocasionalmente se presentan en los lixiviados (González, et al., 2018), o cuando disponen residuos hospitalarios en los rellenos sanitarios (Pérez, Iraizoz, & Chávez, 2017).

Para el cálculo de la generación de lixiviados, el ejercicio publicado en el libro GIRS (Tchobanoglous et al. 1998) considera que el contenido de humedad de los RSU es el 20%, esto corresponde principalmente a un 29% de residuos de comida, siendo que el contenido de humedad de este componente oscila entre el 50 y 80% (consideraremos un promedio de 70%). Considera adicionalmente que la generación de gases consume agua de los residuos sólidos, la duración del periodo de generación de los principales gases del vertedero depende de la distribución de los componentes orgánicos; en las condiciones de los residuos típicos de los EEUU se llega a la fase de maduración (la última fase de evolución de los gases en un relleno sanitario) en 48 meses, clasifica los componentes de residuos orgánicos en: rápidamente y lentamente biodegradables, incorporando en los rápidamente biodegradables además de los residuos de comida a los papeles, cartones y residuos de jardín, aunque el contenido de humedad de papeles y cartones está entre el 6 y 7%, mientras que el de los residuos de comida es de alrededor del 70% y el de jardín alrededor del 60%. Los componentes considerados lentamente biodegradables

tienen contenido de humedad entre el 2 y el 10%. En el desarrollo de la generación de los gases considera que, los de rápida descomposición, se inician a partir del primer año llegando al máximo al quinto año; y los gases de lenta descomposición, tienen producciones de menor volumen y duran hasta 50 años.

Para determinar la cantidad de agua que se requiere para generar los gases, se hace un análisis de la composición química de los componentes biodegradables (CHONS y cenizas).

El procedimiento de cálculo de producción de lixiviados (Tchobanoglous et al. 1998) utiliza el peso medio (W) de los residuos colocados en el nivel que se analiza, considerando el peso seco más la humedad y se adiciona el peso de la cobertura, con esta suma se determina la capacidad de campo para almacenar los líquidos o lixiviados, cuya ecuación (Huitric, 1979; Huitric et al. 1980) es:

$$FC = 0,6 - 0,55(W/4536 + W) \quad \text{Ecuación 01}$$

Donde

FC: factor de capacidad de campo

W: peso medio

Multiplicando este factor de capacidad de campo (FC) por el peso seco de los residuos se determina la capacidad de retención de líquidos. El lixiviado producido es la suma de la humedad de los residuos, la incidencia de lluvias, descontando la pérdida de agua por generación de vapor y gases y la capacidad de retención.

Otros autores definen FC en función de la densidad, como lo menciona (Orta, et al., 1991), donde para densidades de residuos de 0.2 ton/m³, obtiene FC=1.95 litros por kilo de residuos; para 0.356 ton/m³, FC= 1.17 l/kg; para 0.5 ton/m³, FC=0.76 l/kg, para 0.75 ton/m³, FC=0.55 l/kg; en el mismo artículo hace referencia a capacidades de carga determinadas por (Ugoccioni & Zeiss, 1997) para 0.6 ton/m³, FC= 0.2 l/kg; (Zeiss & Ugoccioni, 1995), para 0.14 ton/m³, FC= 0.71 l/kg; (Sánchez & López, 1991) para 0.538 ton/m³, FC= 0.43 l/kg, para 0.58 ton/m³. FC= 0.38 l/kg y para 0.684 ton/m³, FC=0.23 l/kg. Demostrando de esta forma una gran variedad de resultados que no toman en cuenta la composición de los residuos, es por esto que se optó por el método utilizado por Tchobanoglous.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

Comparamos los resultados del procedimiento cálculo de producción de lixiviados de Tchobanoglous et al. 1998, presentando en su libro Gestión Integral de Residuos Sólidos, sin considerar aporte de aguas lluvias ni lodos, con los resultados experimentales medidos en 6 lisímetros que tienen características similares a las de un relleno sanitario (2.9 m de altura), diámetro 0.90 m, con una capa inferior de piedra triturada de 15 cm (drenaje), un dren de 2" para recolectar los lixiviados y una cobertura superior de 30 cm de arcilla implementada sobre los desechos (Figura 1).

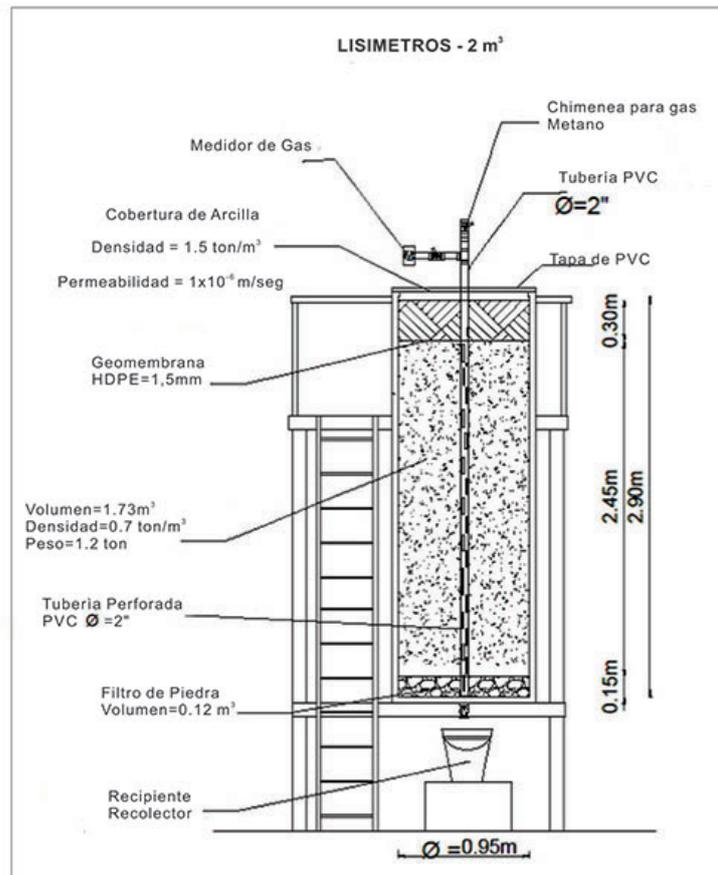


Figura 1. Estructura de lisímetro

Se experimentó con 4 combinaciones de componentes de residuos variando la materia orgánica, en 33, 50, 60 y 100%, las producciones de lixiviados se registraron en secuencias longitudinales diarias sin presencia de agua adicional, con estos resultados se determinaron curvas de producción de lixiviados con diferentes contenidos de materia orgánica y finalmente se compararon los resultados con los presentados por Tchobanoglous.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Considerando que existen muchas regiones que tienen muy poca o ninguna lluvia, tales como la costa de Perú, regiones de Ecuador, Chile, Argentina, etc., y tienen contenidos altos de materia orgánica en sus residuos (61%) (Bardales, De la Cruz, Cabrera, 2015) hemos desarrollado el método del libro GIRS (Tchobanoglous et al. 1998), sin incidencia de lluvia, pero respetando la tabla de generación de gases y los valores asumidos en esa publicación (20% de humedad total, que es el resultado de 28.57% de MOP con 70% de humedad).

En la tabla de datos generales (1) se han presentado los valores comunes en todos cálculos que se aplican en el método planteando por Tchobanoglous et al. 1998, con las particularidades de la densidad del material de cobertura que es 1,770 kg/m³, con un espesor de 50 cm; densidad de vapor de agua y gas, en este caso a corrida corresponde al 20% de contenido de humedad.

Tabla 1. Datos generales para ecuación de producción de lixiviados, vapor de agua y consumo por producción de gas para 28.57% de MOP y 20% humedad total (HT)

Contenido de materia orgánica putrescible	%	28.57%
Humedad de la materia orgánica putrescible	%	70.00%
Contenido de humedad de los RSU	%	20.00%
Densidad material de cobertura	kg/m ³	1,770.00
Espesor de material de cobertura	m	0.5
Area de material de cobertura	m ²	1
Peso de material de cobertura	kg	885
Densidad de RSU	kg/m ³	590
Espesor de capa de RSU	m	2.5
Area de RSU	m ²	1
Densidad de agua lluvia	kg/m ³	1,000.00
Lluvia anual	m	0
Peso de agua de lluvia	kg	0
Densidad de vapor de agua	kg/m ³	0.016
Peso de vapor de agua	kg	9.44
Densidad gas	kg/m ³	1.34
Consumo de agua por producción de gas	kg/m ³	0.16

Tabla 2. Primera parte Producción de lixiviados, vapor de agua y consumo por producción de gas para 28.57% de MOP y 20% humedad total (HT). Años 1 a 6

Balace de aguas nivel 1 al final del año	Unidad	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6
Peso RSU	kg	1,475.00	1,475.00	1,358.47	1,169.30	1,050.31	984.21
Peso total (RSU+cobertura)	kg	2,360.00	2,360.00	2,243.47	2,054.30	1,935.31	1,869.21
Contenido de humedad de los RSU al inicio del año	kg	295	295	279.68	254.82	239.18	230.49
PESO SECO DE RSU	kg	1,180.00	1,180.00	1,078.79	914.48	811.13	753.72
Peso total incluido lluvia nivel 1	kg	2,360.00	2,360.00	2,243.47	2,054.30	1,935.31	1,869.21
Factor de producción de gas del año	m ² kg	0.00	0.06	0.10	0.08	0.05	0.02
Volumen gas producido al año	kg	0.00	87.03	141.28	88.87	49.36	18.70
Peso gas producido en el año	kg	0.00	116.53	189.18	118.99	66.10	25.04
Peso de agua consumida por producción de gas	kg	0.00	13.92	22.60	14.22	7.90	2.99
Peso total de líquidos en los RSU en nivel 1	kg	295.00	279.68	254.82	239.18	230.49	227.20
Peso seco de RSU restantes en nivel 1 al final de año	kg	1,180.00	1,078.79	914.48	811.13	753.72	731.97
Peso medio RSU nivel 1	kg	1,622.50	1,564.24	1,469.65	1,410.15	1,377.10	1,364.58
Factor de capacidad de campo FC=0,60 - 0,55 (W/(4536+W))		0.46	0.46	0.47	0.47	0.47	0.47
Capacidad de retención de agua en los RSU nivel 1 del año	kg	537.02	495.13	425.61	380.88	355.69	346.08
Cálculo de lixiviados producidos nivel 1 en el año	kg	-242.02	-215.45	-170.79	-141.70	-125.20	-118.88
Producción de lixiviados en nivel 1 en el año	kg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Agua restante en nivel 1 al final del año	kg	295.00	279.68	254.82	239.18	230.49	227.20
Peso total nivel 1=RSU+agua restante+cobertura	kg	2,360.00	2,243.47	2,054.30	1,935.31	1,869.21	1,844.17
Consumo de agua por producción de gas en 1 ton RSU	kg/ton	0.00	9.44	15.33	9.64	5.35	2.03
Acumulado consumo de agua por producción de gas en 1 ton RSU	kg/ton	0.00	9.44	24.77	34.41	39.76	41.79
Peso de vapor de agua en 1 ton RSU	kg/ton	0.00	0.94	1.53	0.96	0.54	0.20
Acumulado peso de vapor de agua en 1 ton RSU	kg/ton	0.00	0.94	2.48	3.44	3.98	4.18
Producción de lixiviados para 1 ton RSU	kg/ton	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Acumulado producción lixiviados para 1 ton RSU	kg/ton	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Acumulado consumo de agua por producción de gas+vapor de agua+lixiviado en 1 ton RSU	kg/ton	0.00	10.38	27.24	37.85	43.74	45.97
Agua restante al final del año en 1 ton RSU		200.00	189.62	172.76	162.15	156.26	154.03

Tabla 2. (continuación) Producción de lixiviados, vapor de agua y consumo por producción de gas para 28.57% de MOP y 20% humedad total (HT). Años 7 a 17

Balace de aguas nivel 1 al final del año	Unidad	Año 7	Año 9	Año 11	Año 13	Año 15	Año 17
Peso RSU	kg	959.17	947.64	938.78	933.76	931.26	928.77
Peso total (RSU+cobertura)	kg	1,844.17	1,832.64	1,823.78	1,818.76	1,816.26	1,813.77
Contenido de humedad de los RSU al inicio del año	kg	227.20	224.52	224.52	223.86	223.53	223.20
Peso seco de RSU	kg	731.97	714.96	714.26	709.90	707.73	705.57
Peso total incluido lluvia nivel 1	kg	1,844.17	1,832.64	1,823.78	1,818.76	1,816.26	1,813.77
Factor de producción de gas del año	m ² kg	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Volumen gas producido al año	kg	4.80	3.79	1.88	0.93	0.93	0.00
Peso gas producido en el año	kg	6.42	5.08	2.51	1.25	1.25	0.00
Peso de agua consumida por producción de gas	kg	0.77	0.61	0.30	0.15	0.15	0.00
Peso total de líquidos en los RSU en nivel 1	kg	226.35	222.02	224.19	223.70	223.37	223.20
Peso seco de RSU restantes en nivel 1 al final de año	kg	726.39	717.55	712.08	708.81	706.65	705.57
Peso medio RSU nivel 1	kg	1,361.37	1,356.28	1,351.25	1,351.25	1,350.01	1,349.38
Factor de capacidad de campo fc=0,60 - 0,55 (w/(4536+W))		0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47
Capacidad de retención de agua en los RSU nivel 1 del año	kg	343.61	339.69	337.26	335.81	334.85	334.37
Cálculo de lixiviados producidos nivel 1 en el año	kg	-117.25	-114.67	-113.07	-112.11	-111.48	-111.16
Producción de lixiviados en nivel 1 en el año	kg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Agua restante en nivel 1 al final del año	kg	226.35	225.02	224.19	223.70	223.37	223.20
Peso total nivel 1=RSU+agua restante+cobertura	kg	1,837.75	1,827.57	1,821.27	1,817.51	1,815.01	1,813.77
Consumo de agua por producción de gas en 1 ton RSU	kg/ton	0.52	0.41	0.20	0.10	0.10	0.00
Acumulado consumo de agua por producción de gas en 1 ton RSU	kg/ton	42.31	43.13	43.64	43.95	44.15	44.25
Peso de vapor de agua en 1 ton RSU	kg/ton	0.05	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00
Acumulado peso de vapor de agua en 1 ton RSU	kg/ton	4.23	4.31	4.36	4.39	4.42	4.43
Producción de lixiviados para 1 ton RSU	kg/ton	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Acumulado producción lixiviados para 1 ton RSU	kg/ton	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Acumulado consumo de agua por producción de gas+vapor de agua+lixiviado en 1 ton RSU	kg/ton	46.54	47.45	48.01	48.34	48.57	48.68
Agua restante al final del año en 1 ton RSU		153.46	152.55	151.99	151.66	151.44	151.32

Para comparar el método de Tchobanoglous con un lisímetro debe considerarse solo una celda de residuos y determinar su descomposición o comportamiento a lo largo del tiempo, es por esto que se han hecho algunos ajustes sin perder el concepto del método de comparación. La tabla de producción de lixiviados (2), en sus dos partes, demuestra que el peso de residuos sólidos se ha reducido un 37%, de 1.475 kg a 928 kg en el año 17, el contenido de humedad se reduce un 24%; el peso seco, 40%; la capacidad de retención de agua, 38% y finalmente la producción de lixiviados no supera la capacidad de retención.

En las figuras de producción anual y acumulada de lixiviados (2 y 3) de RSU con 8.57% de MOP y 20% de humedad total se resume el desarrollo de la evolución de generación de lixiviado, gases, vapor de agua, y agua retenida en los residuos, presentado en la tabla de producción de lixiviados (Tabla 2, primera y segunda parte), en un período de 17 años, se aprecia que la máxima producción de vapor de agua y consumo de agua por producción de gas ocurre en el cuarto año, y no hay producción de lixiviados; de igual forma en la figura (1) de producción acumulada se demuestra que

no se producen lixiviados, el nivel de agua restante retenida en los residuos se reduce en la medida en que se evapora o se pierde por efecto de generación de gases.

Para determinar una curva o una tendencia de la retención y producción de lixiviados se ha corrido el procedimiento de Tchobanoglous con diferentes porcentajes de materia orgánica altamente putrescible (MOP), manteniendo las mismas condiciones expresadas en la tabla 1.

A continuación se presenta el cuadro de resumen del cálculo de producción de lixiviados, vapor y gases para residuos con 35% de materia orgánica putrescible y 24.5% de humedad total (HT).

Una vez corridas varias alternativas se determinó que el máximo contenido de humedad de los residuos que no genera lixiviados se da con 24,5% de humedad total o 35% de MOP (Tabla 3). En las figuras (4) y (5) de producción anual y acumulada de lixiviados para 35% de MOP y 24.5% HT, obtenido de la tabla 3, se aprecia que el nivel máximo

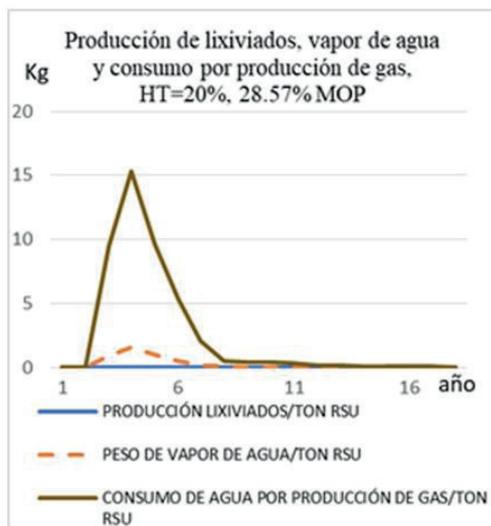


Figura 2. Producción anual de lixiviados, vapor de agua y consumo de agua por producción de gas para 28.57% de MOP y 20% humedad total.

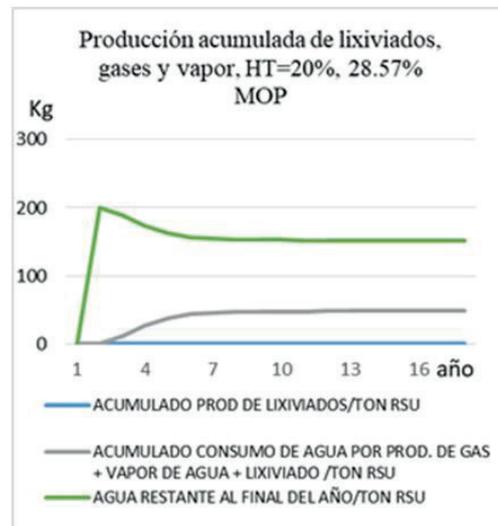


Figura 3. Producción acumulada de lixiviados, vapor de agua, consumo de agua por producción de gas y agua restante para 28.57% de MOP y 20% humedad total (HT)

Tabla 3. Producción de lixiviados, vapor de agua y consumo por producción de gas para 35% de MOP y 24.5% humedad total (HT). Años 1 a 17

Balace de aguas nivel 1 al final del año	Unidad	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 17
Consumo de agua por producción de gas/ton RSU	kg/ton	0.00	9.44	15.33	9.64	5.35	2.03	0.00
Acumulado consumo de agua por producción de gas en 1 ton RSU	kg/ton	0.00	9.44	24.77	34.41	39.76	41.79	44.25
Peso de vapor de agua/ton RSU	kg/ton	0.00	0.94	1.53	0.96	0.54	0.20	0.00
Acumulado peso de vapor de agua en 1 ton RSU	kg/ton	0.00	0.94	2.48	3.44	3.98	4.18	4.43
Producción de lixiviados/ton RSU	kg/ton	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Acumulado producción lixiviados/ton RSU	kg/ton	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Acumulado consumo de agua por producción de gas+vapor de agua+lixiviado/ton RSU	kg/ton	0.00	10.38	27.24	37.85	43.74	45.97	48.68
Agua restante al final del año/ton RSU	kg/ton	245.00	234.62	217.76	207.15	201.26	199.03	196.32

de consumo de agua por producción de gas y por vapor de agua se da en el tercer año, esto guarda relación con el mayor contenido de materia orgánica. También se aprecia que la mayor acumulación de consumo de agua para generación de gases y vapor se da en el sexto año, posteriormente es despreciable, no existiendo producción de lixiviados.

A continuación se presentan los gráficos de producción de lixiviados, vapor y gases para residuos con 50% de materia orgánica putrescible y 35% de humedad total.

Las figuras (6) y (7) de producción anual y acumulada de lixiviados, vapor de agua y consumo de agua por

producción de gas corresponden a la corrida del método de Tchobanoglous con una composición de 50% de MOP y 35% HT, muestran que el mayor pico de producción de lixiviados ocurre en el primer año, siendo el mayor consumo de agua por producción de gas en el tercero. A partir del séptimo año, la producción de lixiviados es despreciable.

A continuación se presentan los gráficos de producción de lixiviados, vapor y gases para residuos con 60% de materia orgánica putrescible y 42% de humedad total.

Las figuras (8) y (9) de producción anual y acumulada de lixiviados, vapor de agua y consumo de agua por producción

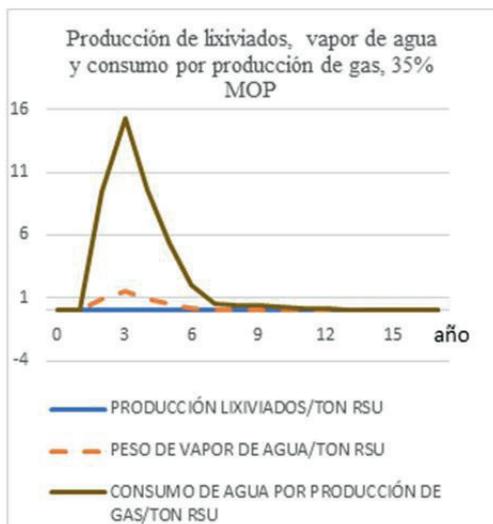


Figura 4. Producción anual de lixiviados, vapor de agua y consumo de agua por producción de gas para 35% de MOP y 24.5% humedad total (HT).

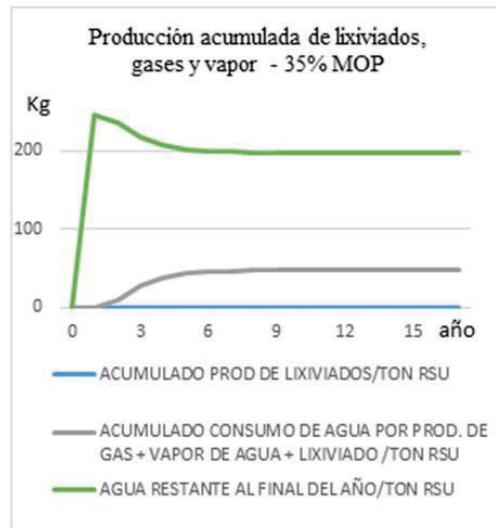


Figura 5. Producción acumulada de lixiviados, vapor de agua, consumo de agua por producción de gas y agua restante para 35% de MOP y 24.5% humedad total (HT).



Figura 6. Producción anual de lixiviados, vapor de agua y consumo de agua por producción de gas para 50% de MOP y 35% humedad total (HT).

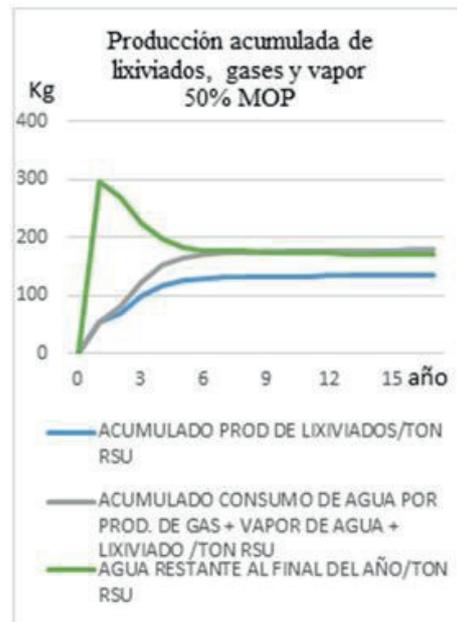


Figura 7. Producción acumulada de lixiviados, vapor de agua, consumo de agua por producción de gas y agua restante para 50% de MOP y 35% humedad total (HT).

de gas para 60% de MOP y 42% HT, demuestran que la máxima producción de lixiviados se da en el primer año y después del quinto año, la producción es mínima.; resultados que guardan proporción con el caso de 50% MOP.

A continuación se presentan los gráficos de producción de lixiviados, vapor y gases para residuos con 100% de materia orgánica putrescible y 70% de humedad total.

En las figuras (10) y (11) de producción anual y acumulada de lixiviados, vapor de agua y consumo de agua por producción de gas para 100% de MOP y 70%

HT, se muestra claramente que la producción máxima de lixiviados es en el primer año; a partir del quinto año, la producción de lixiviados es marginal, así como el vapor de agua y el consumo de agua por producción de gas, y el agua restante se mantiene constante a partir del sexto año.

De acuerdo a este cálculo los volúmenes de lixiviados son los más significativos, y el consumo de agua por producción de gas y vapor, son mínimos.

Para modelar la producción, graficamos los resultados obtenidos anteriormente y generamos la curva de tendencia.

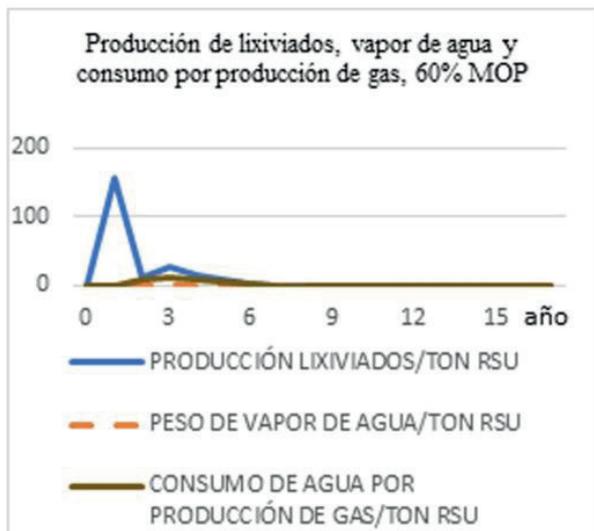


Figura 8. Producción anual de lixiviados, vapor de agua y consumo de agua por producción de gas para 60% de MOP y 42% humedad total (HT).

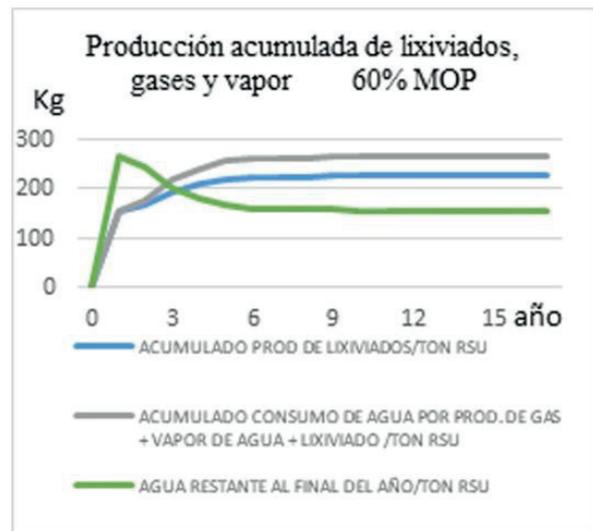


Figura 9. Producción acumulada de lixiviados, vapor de agua, consumo de agua por producción de gas y agua restante para 60% de MOP y 42% humedad total (HT).

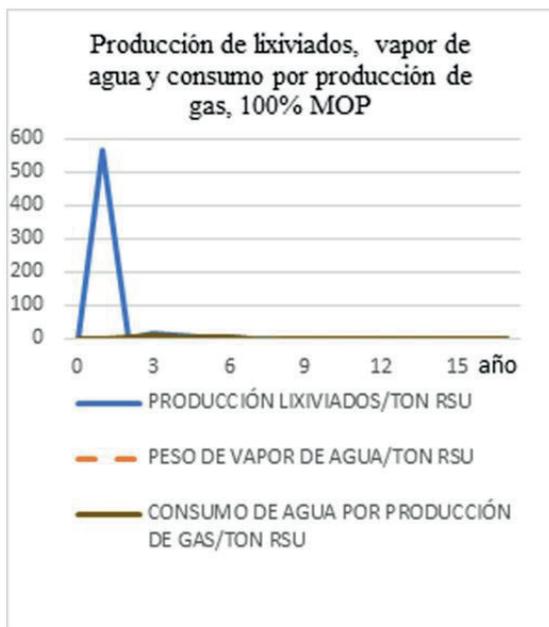


Figura 10. Producción anual de lixiviados, vapor de agua y consumo de agua por producción de gas para 100% de MOP y 70% humedad total (HT).

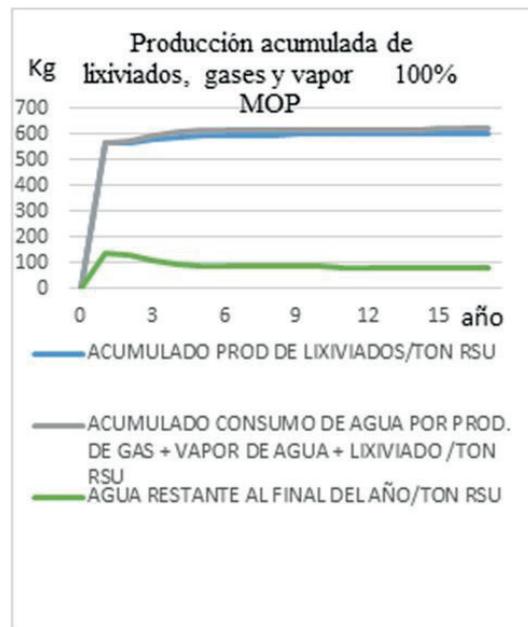


Figura 11. Producción acumulada de lixiviados, vapor de agua, consumo de agua por producción de gas y agua restante para 100% de MOP y 70% humedad total (HT).

Tabla 4. Producción de lixiviados y porcentajes de retención según Tchobanoglous

% MOP	Contenido de humedad total 70% MOP	Contenido de lixiviado teórico máximo (humedad total) (kg/t)	Producción de lixiviado (Tchobanoglous)	Retenido	% retenido
A	B	C	D	E=C-D	F=E/C x 100
35%	24,50%	245	0,00	245,00	100%
50%	35,00%	350	134,32	215,68	62%
60%	42,00%	420	226,71	193,29	46%
100%	70,00%	700	598,24	101,76	15%



Figura 12. Curva de modelación de producción de lixiviados en función del contenido de MOP

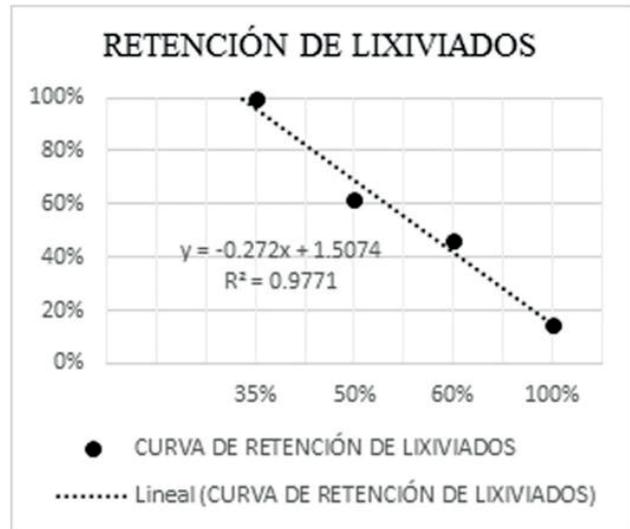


Figura 13. Curva de modelación de retención de lixiviados en función del contenido de MOP



Figura 14. Lisímetros del Relleno Sanitario Las Iguanas (Guayaquil – Ecuador)

La producción de lixiviados se incrementa en la medida que incrementa el contenido de humedad o porcentaje de materia orgánica putrescible (MOP) llegando a niveles máximos de 598.24 kg/ton, este método determina que las retenciones máximas se dan con valores menores del 35% de MOP.

En las figuras (12 y 13) de producción de lixiviados y porcentajes de retención calculados con el método de Tchobanoglous, se proyecta una ecuación de tendencia

(modelación) para cada caso, donde se demuestra que el nivel máximo de retención (100%) se da con el 35% de MOP y con el 100% de MOP, se consigue una retención equivalente al 15%.

Para cotejar los resultados de estos cálculos con datos experimentales, se implementaron seis lisímetros (Figura 14). Se hicieron ensayos con varias combinaciones de materia orgánica putrescible.

En cada tanque se incorporaron 1,2 toneladas de residuos con diferentes composiciones, con las facilidades para el llenado, y registro de la generación de lixiviados.

En la tabla (5) se muestran 10 tanques con diferentes porcentajes de componentes orgánicos.

La Figura (15) de producción diaria de lixiviados en lisímetros presenta los resultados en los diferentes lisímetros, en donde se aprecia que los tanques con mayor producción son los que tienen mayor contenido de MOP, con la coincidencia de que su mayor producción se da en los primeros cinco días; a partir del día 15, la producción es marginal. El resumen de las tendencias de producción acumulada de los lisímetros se presenta en la figura (16) en lisímetros con contenidos de 33, 50, 60 y 100% de MOP, con la particularidad de que el tanque con 33% de MOP, no produce lixiviados.

De igual forma para modelar la producción de lixiviados y nivel de retención, se determinaron las curvas de tendencia, llegando a condiciones de que al 100% de MOP la producción es 368 kg de lixiviado por tonelada de RSU y retiene el 38% del contenido de humedad máximo.

Con los resultados de retención y producción de lixiviados (Figuras 17 y 18), se observa mediante curvas de tendencia de muy alta precisión, que para residuos con 43% de MOP se da el punto máximo de retención y por tanto no se producen lixiviados.

Estos resultados demuestran que no obstante varios autores (Stegmann, Heyer & Cossu, 2005; Melo, Ferreira & Paixao, 2015; Orth, 1981; LaGrega, Buckingham, & Evans, 1996; Qasim & Chiang, 1994; Røben, 2002), aseveran que los residuos sólidos urbanos no producen lixiviados sin presencia de agua o elementos acuosos adicionales, este criterio sólo se aplica en zonas donde los contenidos de

Tabla 5. Composición e identificación de lisímetros

Lisímetro	L1	L2	L3	L5	L6	L7	L12	TQ1	TQ2	TQ6
% MOP	33%	100%	50%	60%	60%	100%	60%	100%	100%	60%
Peso (ton)	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.15	1.2	1.2	1.15
Días de ensayo	152	164	235	199	15	81	40	121	148	105

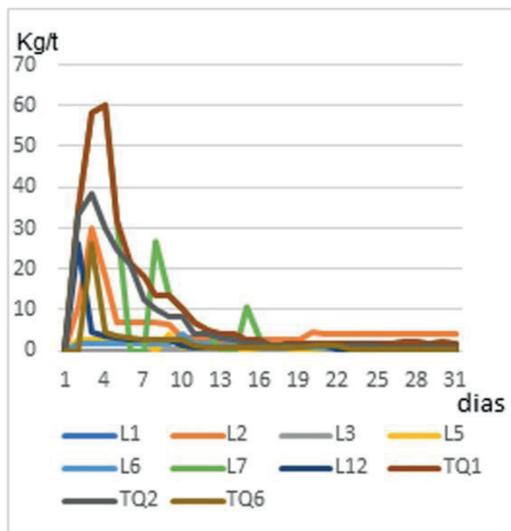


Figura 15. Producción diaria de lixiviados en lisímetros

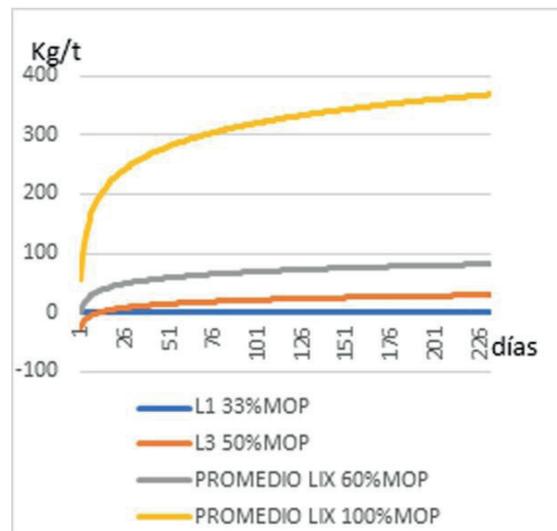


Figura 16. Modelación de producción de lixiviados en lisímetros

Tabla 6. Producción de lixiviados y porcentajes de retención en lisímetros del relleno sanitario Las Iguanas

% Mop	Contenido de Humedad Teórica Máxima (kg)	Producción de Lixiviados en Lisímetros (Modelación) (kg)	Retenido (kg)	% Retenido
33	205.04	-	205.04	100
50	303.56	29.2	274.36	90.38
60	361.51	81.44	280.07	77.47
100	593.32	368	225.32	37.98

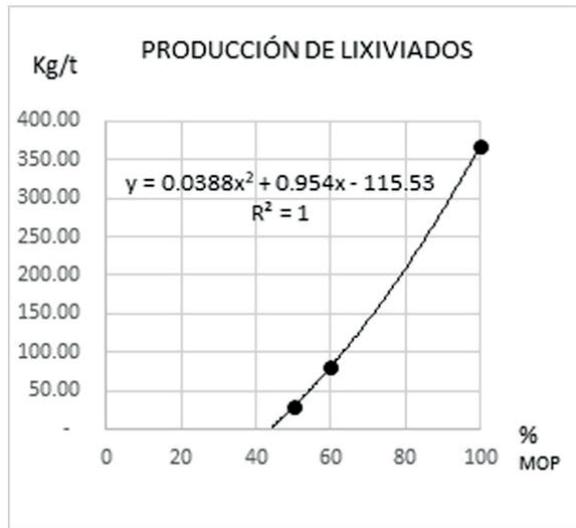


Figura 17. Curva de modelación de producción de lixiviados en función del contenido de MOP en el relleno sanitario Las Iguanas

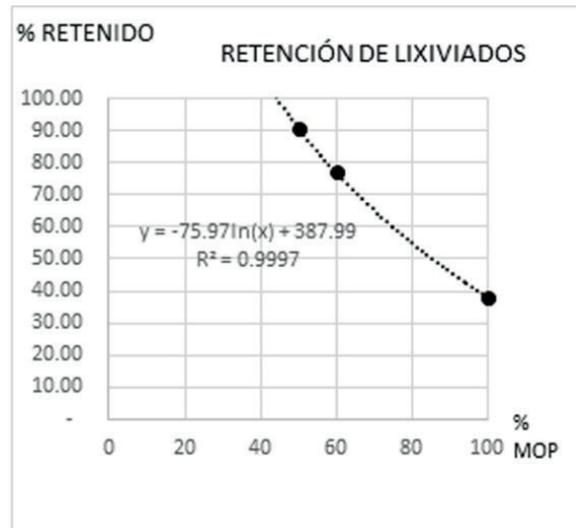


Figura 18. Curva de modelación de retención de lixiviados en función del contenido de MOP en el relleno sanitario Las Iguanas

materia orgánica putrescible son menores al 43%, o según Tchobanoglous, menores al 33%.

Para validar los resultados, se realizó una prueba estadística para igualdad de dos medias, para comparar las semejanzas entre los dos modelos de curvas de producción de lixiviados.

Ecuación 02:

$$Z_{prueba} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$$

\bar{x} = media
 σ = desviación estándar
 n = número de elementos

Tabla 7. Estadísticas de prueba igualdad para dos medias

	Tchobanoglous	Lisímetros
\bar{x}	284,51	166,15
σ^2	23,36	12,32
Zprueba =	3.10E-12	

Dando como resultado que no existe diferencia significativa (Tabla 7, ver anexo).

Adicionalmente, para validar los resultados obtenidos en los lisímetros, en el relleno sanitario “Las Iguanas”, de Guayaquil, se han hecho tres celdas experimentales de 400 toneladas, cuya composición de desechos tiene 60% de materia orgánica putrescible, fondo de geomembrana con una capa protectora de 20 cm de arcilla, los que dieron resultados de producción de lixiviados de 41, 41 y 36 kg/t, siendo su promedio 36 kg/t. La única diferencia conceptual entre los lisímetros (cuyo promedio de producción de lixiviados es de 81.44 kg/t, ver tabla 6) y las celdas es la capa de 20 cm de arcilla protectora de la geomembrana

ubicada en el fondo, material que tiene un capacidad de adsorción del 27.03% en masa. Para comparar los resultados, consideramos reducir en la producción de los lisímetros, el valor de adsorción de la arcilla, siendo la densidad de la arcilla 1500 kg/m³, una capa de 20 cm en el fondo del lisímetro tendría una capacidad de adsorción de: 27.03% x 1500kg/m³ x (3.1416 x 0.902 /4) x 0.20 = 51.89 kg, este es el valor total de adsorción de un lisímetro. Comparando los resultados de los lisímetros de 60% MOP en kg/t, relacionamos la masa total de los RSU de un lisímetro (promedio 1,18 t), esto es 51.89 kg/1.18 t= 44kg/t, se explica la diferencia de los resultados entre lisímetros y celdas (81.44-36=45.44 kg/t), ratificándose la validez de los resultados experimentales en los lisímetros con las condiciones atmosféricas de Guayaquil.

IV. CONCLUSIONES

Al comparar estadísticamente los resultados del procedimiento de cálculo de lixiviados de Tchobanoglous et al. 1998 con los resultados experimentales en lisímetros, se confirma que no existen diferencias significativas. Para rangos bajos de MOP no se producen lixiviados en ninguno de los dos casos, sin embargo, para porcentajes mayores a 35% de MOP, con el cálculo de Tchobanoglous se producen lixiviados llegando a una condición máxima de 598 kg/t (con 100% MOP), mientras que en los lisímetros, proyectando los promedios de la curva de producción de lixiviados, éstos solo se producen a partir del 43% de MOP, llegando a un máximo de 368 kg/t con 100% de MOP.

Al comparar los resultados de producción de lixiviados del promedio de los lisímetros con 60% MOP con el promedio de las celdas experimentales con 60% de MOP, descontando la adsorción de la arcilla de fondo, encontramos coincidencia, lo que valida la prueba experimental en lisímetros.

V. ANEXO

Estadístico de prueba para igualdad de 2 medias

% De Materia Orgánica Prutrescible	Tchobanoglous	Lisímetros	Z1 Tchobanoglous	Z2 Lisímetros
35	68,94		(0,45)	
36	73,04		(0,44)	
37	77,26		(0,43)	
38	81,60		(0,42)	
39	86,06		(0,41)	
40	90,64		(0,40)	
41	95,33		(0,39)	
42	100,15		(0,38)	
43	105,08	0,17	(0,37)	(0,47)
44	110,13	4,54	(0,36)	(0,46)
45	115,30	8,99	(0,35)	(0,45)
46	120,59	13,52	(0,34)	(0,43)
47	126,00	18,13	(0,33)	(0,42)
48	131,53	22,82	(0,32)	(0,41)
49	137,17	27,58	(0,30)	(0,39)
50	142,93	32,42	(0,29)	(0,38)
51	148,82	37,34	(0,28)	(0,37)
52	154,82	42,34	(0,27)	(0,35)
53	160,94	47,41	(0,26)	(0,34)
54	167,17	52,56	(0,24)	(0,32)
55	173,53	57,79	(0,23)	(0,31)
56	180,00	63,10	(0,22)	(0,29)
57	186,60	68,49	(0,20)	(0,28)
58	193,31	73,95	(0,19)	(0,26)
59	200,14	79,49	(0,17)	(0,25)
60	207,09	85,10	(0,16)	(0,23)
61	214,16	90,80	(0,15)	(0,21)
62	221,34	96,57	(0,13)	(0,20)
63	228,65	102,42	(0,12)	(0,18)
64	236,07	108,35	(0,10)	(0,16)
65	243,62	114,35	(0,08)	(0,15)
66	251,28	120,44	(0,07)	(0,13)
67	259,06	126,60	(0,05)	(0,11)
68	266,96	132,84	(0,04)	(0,09)
69	274,97	139,15	(0,02)	(0,08)
70	283,11	145,54	(0,00)	(0,06)
71	291,36	152,01	0,01	(0,04)
72	299,73	158,56	0,03	(0,02)
73	308,23	165,19	0,05	(0,00)
74	316,84	171,89	0,07	0,02
75	325,56	178,67	0,08	0,04

% De Materia Orgánica Prutrescible	Tchobanoglous	Lisímetros	Z1 Tchobanoglous	Z2 Lisímetros
76	334,41	185,53	0,10	0,06
77	343,38	192,47	0,12	0,07
78	352,46	199,48	0,14	0,09
79	361,66	206,57	0,16	0,12
80	370,99	213,74	0,18	0,14
81	380,43	220,99	0,20	0,16
82	389,98	228,32	0,22	0,18
83	399,66	235,72	0,24	0,20
84	409,46	243,20	0,26	0,22
85	419,37	250,75	0,28	0,24
86	429,41	258,39	0,30	0,26
87	439,56	266,10	0,32	0,28
88	449,83	273,89	0,34	0,31
89	460,22	281,76	0,36	0,33
90	470,72	289,70	0,39	0,35
91	481,35	297,73	0,41	0,37
92	492,10	305,83	0,43	0,40
93	502,96	314,01	0,45	0,42
94	513,94	322,26	0,47	0,44
95	525,04	330,59	0,50	0,47
96	536,26	339,00	0,52	0,49
97	547,60	347,49	0,54	0,52
98	559,05	356,06	0,57	0,54
99	570,63	364,70	0,59	0,57
100	582,32	373,42	0,62	0,59
Media	284,51	166,15	0,00	0,00
Varianza	23,36	12,32	0,10	0,10
Estadístico de prueba para igualdad de 2 medias				
Z ₀ =	156,00		3.10E-12	

$$Z_{prueba} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$$

\bar{x} = media
 σ = desviación estándar
 n = número de elementos

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bardales , J., De la Cruz , E., & Cabrera , C. (2015). Manejo integral de residuos sólidos domiciliarios por medio de la segregación en la fuente en el distrito de San Luis, Lima, Perú. *Revista del Instituto de Investigación RIIGEO*, 18(35), 23-29.
- Environmental Protection Agency. (2006). Obtenido de <https://www.epa.gov/>
- González , V., Valle , S., Nirchio, M., Olivero , J., Tejeda, L., Valdelamar, J., González, K. (2018). Evaluación del riesgo de contaminación por metales pesados (Hg y Pb) en sedimentos marinos de Estero Huaylá, Puerto Bolívar, Ecuador . *Revista del Instituto de Investigación IIGEO*.
- Huitric, R. (1979). In-place capacity of refuse to absorb liquid wastes. Second national Conference on Hazardous Material Management Z1 Tchobanoglous t. San Diego, CA.
- Huitric, R., Raksit, S., & Haug, R. (1980). Moisture retention of landfilled solid waste . Los Angeles, Estados Unidos: County Sanitation Districts of Los Angeles County.
- LaGrega, M. D., Buckingham, P. L., & Evans , J. C. (1996). *Gestión de Residuos Tóxicos, tratamiento, eliminación y recuperación de suelos*. Madrid: McGraw Hill.
- Melo , P., Ferreira, A., & Paixao , S. (5-9 de Octubre de 2015). Food waste in canteen trays of primary schools in the center of Portugal. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italia.
- Ministerio del Ambiente de Perú . (2015). Ministerio del Ambiente. Obtenido de <http://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-015-2015-minam/decreto-supremo-n-015-2015-minam/>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2015). Ministerio Ambiente del Ecuador . Obtenido de <http://suia.ambiente.gob.ec/documents/10179/185880/ACUERDO+061+REFORMA+LIBRO+VI+TULSMA+-+R.O.316+04+DE+MAYO+2015.pdf/3c02e9cb-0074-4fb0-afbe-0626370fa108>
- Orta, L., Martínez, P., Monje, R., Rojas , V., Sánchez , G., Kiss, G., & Cruz , R. (1991). Resultados de las pruebas de capacidad de absorción y análisis de laboratorio de las celdas de control de Bordo Poniente III. Dirección General de Servicios Urbanos S.G.O., D.D.F.
- Orth, H. (1981). Aterros Sanitarios. . *Revista de Limpeza Pública*, 26-34.
- Pérez, E., Iraizoz, A., & Chávez, J. (2017). Manejo de residuos sólidos hospitalarios generados por los centros veterinarios de la ciudad de Machala, Ecuador. *Revista del instituto de Investigaciones IIGEO*, 101-110.
- Qasim, S. R., & Chiang, W. (1994). *Sanitary landfill leachate generation, Control and Treatment*. Pennsylvania: Technomic.
- Röben, E. (2002). Diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios municipales. Loja: Deutscher Entwicklungsdienst Servicio Alemán de Cooperación Social - Técnica.
- Sánchez , G., & López, S. (1991). Resultados de las pruebas de capacidad de absorción y análisis de laboratorio de las celdas de control de Bordo Poniente III. Dirección General de Servicios Urbanos, S.G.O, D.D.F.
- Stegmann, R., Heyer, K. U., & Cossu , R. (2005). *Leachate Treatment Proceedings Sardinia 2005*. Tenth International Waste Management and landfill management.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. A. (1998). *Gestión Integral de residuos sólidos*. Madrid: McGraw Hill.
- Ugocioni, M., & Zeiss, C. (1997). improvement of leachate prediction through municipal solid waste layers. *Journal of the American Water Resources Association* , 1265-1278.
- Waste Atlas Report. (2013). *Waste Atlas Report*. Obtenido de www.d-waste.com
- Zeiss, C., & Ugucioni, M. (1995). Mechanisms and patterns of leachate flow in municipal solid waste landfills. *Journal of Environmental Systems*, 247.

