

Propuesta para tratamiento de lixiviados en un vertedero de residuos sólidos urbanos

Alexis Pellón Arrechea

email: Alexis.pellon@cnic.edu.cu

Matilde López Torres

email: Matilde.lopez@cnic.edu.cu

María del Carmen Espinosa Lloréns

email: maria.espinosa@cnic.edu.cu

Dpto. de Estudios sobre Contaminación Ambiental (DECA), Centro Nacional de Investigaciones Científicas (CNIC). Habana.

Orestes González Díaz

email: orestes@cih.cujae.edu.cu

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). Habana.

RESUMEN

La disposición de los residuos sólidos urbanos (RSU) en vertederos, genera lixiviados con alto poder contaminante, provocando severos impactos ambientales sobre las fuentes de abasto de aguas superficiales y subterráneas. Ninguno cuenta con sistemas de recolección y tratamiento. En el trabajo se realiza la evaluación físico-química de los lixiviados generados en el vertedero de Guanabacoa, la Habana, proponiéndose un sistema de tratamiento para el nuevo vertedero de la ciudad, garantizando con ello el cumplimiento de las normativas establecidas. Este vertedero recibirá los RSU de una población de 334 226 habitantes, los cuales generan 189 ton/d de residuos sólidos. Se realizó un balance hidrológico para la estimación del flujo de lixiviados. La propuesta tecnológica contempla las siguientes etapas: tanque séptico, filtro anaerobio, laguna facultativa y laguna de maduración.

Palabras clave: caracterización, lixiviados, tratamiento, residuos sólidos urbanos, vertederos.

Proposal for leachates treatment in a municipal solid waste landfill

ABSTRACT

The disposal of the municipal solid wastes in landfills, results in the generation of leachates with high pollutant characteristics, which cause severe environmental impacts on the surface and underground sources of waters. In this work the physico-chemical evaluation of the leachates generated in the Guanabacoa landfill in Havana City was carried out, to propose a treatment system for a new landfill, facilitating a safe disposal to the environment, accomplishing the Cuban normative. The new landfill will be built for a population of 334 226 inhabitants, which generate an estimate of 189 ton/d of solid wastes. By means of the hydrological balance of the landfill the flow of leachate was estimated. The technological proposal includes the following stages: septic tank, anaerobic filter, facultative lagoon and maturation lagoon.

Keywords: characterization, leachates, treatment, municipal solid wastes, landfills.

INTRODUCCIÓN

La gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) prevé la aplicación de normas sanitarias y de mecanismos adecuados para el almacenamiento, la recolección, el transporte, el tratamiento y la disposición final de los residuos. Los vertederos a cielo abierto y semi-controlados son los métodos más practicados para la disposición final de los RSU en América Latina y el Caribe, instalaciones que no cumplen las especificaciones técnicas requeridas de un vertedero sanitario. La calidad de estos sitios de disposición final ha mejorado en los últimos años, aunque todavía no se trata el lixiviado ni se usan membranas sintéticas para su impermeabilización.

Los impactos ambientales de mayor consideración en los vertederos son aquellos de consecuencias a mediano y largo plazo y están, fundamentalmente, relacionados con los gases de vertedero y el lixiviado que se generan en ellos.

En Centroamérica, la gestión de los vertederos constituye un grave problema ambiental sin resolver y requiere asignación de financiamiento para equipos y personal calificado.

En el caso de Cuba, en este proyecto se detectó que:

- ✓ En el 2002 se recolectaron 23,430 millones de m³ de residuos sólidos;
- ✓ 15,7704 millones de m³ (67%) cuentan con tratamiento sanitario;
- ✓ Existen 802 vertederos, 432 (54%) con relleno sanitario, pero sin tratamiento de los lixiviados ni recolección de los gases emitidos por la descomposición;
- ✓ Existen 315 vertederos con relleno sanitario manual.

Como se observa, Cuba no se encuentra exenta de esta situación: no se cuenta con un sistema de recogida clasificada en origen, dado por la situación económica, la falta de cultura y sensibilidad de la población en este aspecto, lo que, unido a la ausencia de plantas de tratamientos de residuos sólidos (RS), hacen que sean depositados en los vertederos, desechos de diversos orígenes. Aproximadamente 3 000 toneladas métricas de ellos son confinados en los vertederos de la capital, la Habana, de las cuales 1 800 son de origen orgánico, con una humedad de hasta el 73 %, representando una alta producción de residuos líquidos altamente contaminados y clasificados como muy peligrosos (Espinosa et al. 2010).

En la actualidad se cuenta con una gran variedad de sistemas que pueden ser utilizados para el tratamiento de los lixiviados de vertederos (lagunas de estabilización: anaerobias, facultativas, aerobias, de maduración; lodos activados, procesos de coagulación floculación, procesos de membrana, procesos de oxidación avanzada, adsorción con carbón activado, desinfección con cloro u ozono, entre otros métodos) (Rocha et al. 2011). Para su elección, diseño, dimensionamiento y explotación adecuados, se hace necesario conocer el volumen y poder contaminante de los lixiviados, las características físicas del lugar y las posibilidades económicas del país o región para la adquisición de una tecnología, disponibilidad de suministro de energía y de personal calificado para su explotación (Espinosa et al. 2007).

Hasta el momento en Cuba se ha carecido de una estimación precisa del volumen y carga contaminante de los lixiviados que se producen a partir de los residuos sólidos que se disponen en un vertedero, así como de tecnologías de tratamiento, ajustadas y específicas para este tipo de residuo, que tengan en cuenta las características del lugar de ubicación, el personal que la tendría que operar, así como las limitaciones energéticas y de recursos que presenta el país. La respuesta a estas incógnitas permitiría dar solución, de manera satisfactoria, al problema ambiental que originan estos residuos en la ciudad de la Habana, con su posible generalización en todo el país.

Con el cierre de uno de los vertederos provinciales de ciudad de la Habana, el cual contaba con más de 30 años de explotación, se hace necesario construir uno nuevo para una población de 334226 habitantes.

De acuerdo con lo planteado anteriormente, el presente trabajo tiene como objetivos la caracterización de los lixiviados y la estimación de su generación en un nuevo vertedero en la ciudad de la Habana, así como valorar una propuesta de tratamiento a partir de estos resultados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Vertedero

El área destinada para el diseño del vertedero es de 80 m x 80 m, con celdas definidas de 20 m x 6 m, donde se depositarán los RSU de tres municipios de la Habana, para una población de 334226 habitantes, y una generación total de 189 t/d. La composición física de dichos residuos se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Composición física de los residuos sólidos que llegan al vertedero

Componente	Peso (%)	Peso húmedo (t)	Peso seco (t)
Papel y cartón	15,64	29,55	26,60
Aluminio	5,12	9,67	9,29
Metales	1,36	2,56	2,46
Plásticos	9,15	17,29	16,60
Vidrio	8,00	15,12	14,52
Textiles	2,47	4,67	3,97
Madera	1,35	2,55	1,53
Residuos de cocina	56,22	106,30	24,44
Gomas	0,29	0,56	0,53
Cuero	0,00	0,00	0,00
Otros	0,36	0,69	0,62
Total	100,00	189,00	100,00

Lixiviados

Las muestras objeto de este estudio fueron colectadas, como muestras simples, a nivel superficial, durante las épocas de seca (octubre y noviembre) y de lluvia (mayo y junio). En la tabla 2 se muestran los indicadores de calidad de agua y los métodos analíticos utilizados (APHA-AWWA-WPCF 2005) para la caracterización de las muestras de lixiviado.

Cuando los valores de concentración reportados fueron menores que el límite de detección del método analítico, a los efectos del análisis estadístico y comparación de resultados se consideraron iguales a los valores de los límites de detección respectivos.

Los resultados obtenidos se compararon con los Límites Máximos Permisibles Promedio (LMPP) de la Norma Cubana de Vertimiento de Aguas Residuales a las Aguas Terrestres y al Alcantarillado, NC 27:2012 (ONN 2012).

Metodología para la evaluación de la generación de lixiviados en el vertedero

La generación de lixiviados se evaluó teniendo en cuenta las características de los RSU que recibiría el nuevo vertedero y las condiciones climáticas de la zona donde estaría emplazado.

Para el cálculo de la formación de lixiviados se realizó un balance hidrológico en el vertedero, el cual tuvo en cuenta la suma de todas las corrientes de aguas que entran en el mismo y la sustracción de las consumidas en las reacciones químicas, así como la cantidad que sale en forma de vapor de agua (Espinosa et al. 2010).

De esta forma se plantea que la cantidad potencial de lixiviados, es la cantidad de agua en exceso sobre la capacidad de retención de humedad del material en el vertedero (capacidad de campo).

Tabla 2. Indicadores de calidad de agua y métodos analíticos empleados

Indicador	Métodos analíticos
pH y Temperatura	Método electrométrico usando un medidor de pH Hanna modelo 1430.
Conductividad eléctrica (CE)	Método electrométrico usando un medidor de conductividad Multiline Hanna 2730.
Oxígeno disuelto (OD)	Método de Winkler. Modificación de la Azida.
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	Dilución y siembra durante 5 días a 20°C.
Demanda química de oxígeno (DQO)	Oxidación con dicromato de potasio y reflujo cerrado.
Sólidos totales disueltos (STD) Sólidos suspendidos totales (SST) Sólidos totales volátiles (STV)	Métodos gravimétricos.
Coliformes totales y fecales	Diluciones. NMP en 100 ml.
As, Cd, Cr, Cu, T-Hg, Pb y Zn	Digestión ácida con HNO ₃ y determinación mediante Espectroscopía de Emisión de Plasma.
Cr ⁺⁶	Método Colorimétrico.
Cianuro total (CN-T)	Método Colorimétrico.
Nitrógeno amoniacal (N-NH ₃)	Destilación y valoración.
Nitritos (N-NO ₂)	Diazotación. Espectrofotómetro.
Nitratos (N-NO ₃)	Reducción con Cd-Cu y Diazotación. Espectrofotómetro.
Nitrógeno total	Oxidación con persulfato y reducción con Cd-Cu.
Fósforo total	Oxidación con persulfato y ácido ascórbico.
Aceites y grasas	Método de partición - infrarrojo.
Fenoles	4- amino antipirina. Espectrofotómetro.
Detergentes	Azul de Metileno. Espectrofotómetro.
Alcalinidad	Valoración potenciométrica.
Acidez	Valoración potenciométrica.
Color	Comparación con escala de cloroplatinato-cobalto.
Turbidez	Método nefelométrico.

Consideraciones de los componentes para el balance de aguas en el vertedero

De acuerdo con lo descrito por Espinosa et al. (2010), los diferentes aspectos que se tienen en cuenta para el balance de agua en el vertedero son:

1. Agua filtrada superiormente. Agua que procede de la precipitación atmosférica y que se filtra a través del material de cobertura (se tuvieron en cuenta las precipitaciones promedios en ambas épocas en la zona donde estaría enclavado el vertedero).
2. Humedad de los residuos sólidos. Esta contempla el agua intrínseca de los residuos como la humedad que se ha absorbido de la atmósfera o de la lluvia cuando los contenedores de almacenamiento no están completamente cerrados. (Se tuvo en cuenta el contenido de humedad de los RSU reportados para los municipios objeto de estudio)
3. Humedad del material de cobertura. La cantidad de agua que entra con estos materiales dependerá del tipo, del origen y la estación del año.
4. Agua consumida en la formación del gas de vertedero. Durante la descomposición anaerobia de los constituyentes orgánicos de los RSU se consume agua. La cantidad de agua consumida en las reacciones de descomposición se puede estimar utilizando la reacción, ecuación (1):



donde:

$C_{68} H_{111} O_{50} N$ = Materia orgánica contenida en el residuo

H_2O = Agua que se consume durante la reacción

CH_4 = Metano que se produce durante la reacción

CO_2 = Dióxido de carbono que se produce durante la reacción

NH_3 = Amoníaco que se produce durante la reacción

5. Lixiviado. Agua que sale desde el fondo del vertedero.
6. Evaporación. Depende directamente de las condiciones climáticas locales (temperatura, porcentaje de horas de iluminación solar anual).
7. Capacidad de campo (CC). La cantidad de agua que puede retener el vertedero (residuo sólido y material de cobertura), en contra de la gravedad, la cual se calcula de la ecuación (2).

$$CC = 0,60 - 0,55 (W/10,000 + W) \quad (2)$$

donde: W = peso de sobrecarga calculado en la mitad de la altura de los residuos dentro del nivel en cuestión.

Balance de aguas del vertedero

La variación en la cantidad de humedad almacenada en los residuos sólidos en el vertedero se calcula con la ecuación (3).

$$\Delta S_{RS} = W_{RS} + W_{FT} + W_{MC} + W_{A(u)} - W_{GV} - W_{VA} - W_E + W_{F(L)} \quad (3)$$

donde:

ΔS_{RS} = Variación en la cantidad de agua almacenada en los residuos sólidos en el vertedero (kg/m^3).

W_{RS} = Agua (humedad) en los residuos sólidos entrantes (kg/m^3).

W_{FT} = Agua (humedad) en los lodos de plantas de tratamientos entrantes (kg/m^3).

W_{MC} = Agua (humedad) en el material de cobertura (kg/m^3).

$W_{A(u)}$ = Agua filtrada superiormente (para la capa superior procede de la lluvia)(kg/m^3).

W_{GV} = Agua perdida en la formación del gas de vertedero (kg/m^3).

W_{VA} = Agua perdida como vapor de agua saturado con el gas de vertedero (kg/m^3).

W_E = Agua perdida debido a la evaporación superficial (kg/m^3).

$W_{F(L)}$ = Agua perdida inferiormente, agua de fondo, lixiviado (kg/m^3).

Métodos estadísticos

Se empleó el programa de computación EXCEL y el paquete de programas estadístico Statgraphic for Windows, calculándose la media (X) y la desviación estándar (DE).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de lixiviados

Las características de los lixiviados son muy variables, lo que puede atribuirse a la interacción de muchos factores, como son la composición y edad de los residuos, la disponibilidad de oxígeno y la humedad, el diseño y la operación del vertedero, la tasa de precipitaciones, la

hidrología del lugar, la compactación, el diseño de la cobertura, los procedimientos de muestreo y la interacción entre los lixiviados y el medio ambiente (Di Iaconi et al. 2011, Cortez et al. 2011, JICA 2005, Rastas 2002). Esta variabilidad se aprecia en los resultados promedios de la caracterización de los lixiviados en las estaciones de lluvia y seca (tabla 3).

Tabla 3. Resultados ($X \pm DE$) de la caracterización de lixiviados en las dos estaciones estudiadas y Límites Máximos Permisible Promedios (LMPP) de la NC 27:2012 (ONN 2012).

Indicador	Unidades	Estación de seca	Estación de lluvia	LMPP
				Ríos y Embalses (C)
pH	-	8,10 \pm 0,29	7,67 \pm 0,35	6-9
Temperatura	°C	29,53 \pm 1,06	30,40 \pm 1,91	50
CE	mS/cm	8,80 \pm 0,52	6,02 \pm 0,21	3,5
OD	mg/L	0,00 \pm 0,0	0,32 \pm 0,0	2
DBO ₅	mg/L	902 \pm 43	685 \pm 27	60
DQO	mg/L	2011 \pm 246	1008 \pm 375	120
SDT	mg/L	6202 \pm 644	3824 \pm 319	
SST	mg/L	629 \pm 54	246 \pm 65	
STV	mg/L	1293 \pm 321	1302 \pm 348	
Coliformes Totales	NMP/100 mL	5,93·10 \pm 3,54·10	1,05·10 ⁵ \pm 4,88·10 ⁵	5,0·10 ³
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	4,98·10 \pm 1,04·10	1,63·10 ⁴ \pm 1,53·10 ⁴	1,0·10 ³
As	mg/L	0,23 \pm 0,0	0,08 \pm 0,0	
Cd	mg/L	0,02 \pm 0,0	0,01 \pm 0,0	
Cu	mg/L	1,40 \pm 0,07	0,15 \pm 0,09	
Pb	mg/L	0,71 \pm 0,0	0,11 \pm 0,0	
Zn	mg/L	6,20 \pm 0,06	0,24 \pm 0,03	
Cr ⁺⁶	mg/L	0,12 \pm 0,06	0,31 \pm 0,04	
CN-T	mg/L	0,05 \pm 0,02	0,06 \pm 0,01	
N-NH ₃	mg/L	104,69 \pm 19,01	50,54 \pm 14,02	
N-NO ₂	mg/L	0,23 \pm 0,03	0,02 \pm 0,01	
N-NO ₃	mg/L	0,36 \pm 0,01	0,01 \pm 0,0	
Nitrógeno total	mg/L	146,13 \pm 13,55	72,56 \pm 18,17	20
Fósforo total	mg/L	68,50 \pm 9,66	8,82 \pm 4,98	10
Aceites y Grasas	mg/L	3,93 \pm 0,09	1,23 \pm 0,18	30
Fenoles	mg/L	0,27 \pm 0,0	0,08 \pm 0,0	
Detergentes	mg/L	0,75 \pm 0,0	0,24 \pm 0,0	
Alcalinidad	mg/L	1190 \pm 92	923 \pm 46	
Acidez	mg/L	250 \pm 22	213 \pm 6	
Color	UC	6958 \pm 0,0	2517 \pm 0,0	
Turbidez	UNT	289 \pm 81	104 \pm 20	

Los resultados del análisis del pH, en ambas estaciones, mostraron una ligera tendencia hacia la basicidad. Con respecto al oxígeno disuelto (OD) los valores fueron prácticamente cero, para las dos estaciones, indicando anoxia en los lixiviados. Los coliformes totales y fecales en el muestreo de la estación de lluvia fueron mayores que los de la estación de seca. Este aumento pudiera deberse a la escorrentía de los lixiviados a partir de los RSU, provocada por la lluvia. La mayoría de los coliformes tenían origen fecal.

La humedad y la temperatura del aire durante los muestreos realizados en ambas estaciones, estuvieron en un intervalo de 46 a 64 % y de 32,2 a 36,6 °C, respectivamente, valores típicos del clima tropical.

Todos los lixiviados mostraron una coloración carmelita oscuro. En ambas estaciones de muestreo las concentraciones de DBO₅ y DQO en los lixiviados fueron elevadas, denotando la presencia de altos contenidos de materia orgánica, lo cual impone la necesidad de implementar un sistema de tratamiento para estas corrientes, que asegure el vertimiento de las mismas al medio ambiente sin peligro de una contaminación posterior.

En la estación de lluvia todas las variables de las muestras de lixiviados mostraron una reducción de sus valores medios, debido a la dilución de los mismos por efectos del agua de lluvia, además de que los propios RSU tenían mayor humedad. Esto provoca una solubilización de los contaminantes obtenidos a partir de la descomposición de la masa de los residuos hacia los lixiviados que emanan del vertedero.

La humedad en el vertedero juega un papel primordial en los procesos de descomposición que ocurren en el vertedero, los que pueden ser físicos, químicos y biológicos, siendo este último proceso el más importante, proporcionando las condiciones para que ocurran reacciones de hidrólisis, transporte de nutrientes y enzimas, disolución de metabolitos, a la vez que favorece el efecto buffer, diluye compuestos inhibidores y expone el área superficial al ataque de los microorganismos. En este caso, durante la estación de lluvia el incremento de la humedad de los RSU fue evidente.

El río que rodea el sitio donde estará ubicado el nuevo vertedero se encuentra en una zona hidrogeológica de menor importancia, desde el punto de vista del uso socioeconómico, por lo que, de acuerdo con la norma cubana “Clasificación de los objetos hídricos y de la utilización de las aguas terrestres” (ONN 2000), la categoría de este cuerpo de agua es Clase C, cuyas áreas tienen menos exigencias en cuanto a calidad medioambiental.

En la última columna de la tabla 3, aparecen los LMPP de la Norma Cubana de Vertimiento de las Aguas Residuales a las Aguas Terrestres (ONN 2012), lo cual permite realizar una comparación entre estos valores y los obtenidos en la caracterización del lixiviado. Es necesario denotar que, a pesar de que los valores de los LMPP corresponden a los de una zona de menor exigencia (cuerpo de agua Clase C), la mayoría de los resultados de la caracterización del lixiviado obtenidos en este trabajo fueron superiores a los establecidos en la norma de referencia (ONN 2012), indicando la necesidad de aplicar alguna solución para el tratamiento de esos lixiviados antes de su vertimiento al río.

En la tabla 4 aparecen los valores de algunos indicadores en los lixiviados reportados por diferentes investigadores, así como aquellos obtenidos en este trabajo (última columna de la derecha). Se puede observar que, en general, los resultados obtenidos en este trabajo, no difieren de los reportados por otros investigadores (Frasconi et al. 2004, Rastas 2002), en diferentes vertederos de otros países.

Balance hídrico

El conocimiento o la estimación previa del volumen de generación de lixiviados constituye uno de los elementos más importantes en el diseño de los sistemas de tratamiento, de ahí la importancia de la aplicación del balance hídrico del vertedero.

La tabla 5 resume los resultados obtenidos del cálculo de los principales parámetros que intervienen en el balance hídrico (la precipitación, la evapotranspiración, la capacidad de campo, el escurrimiento superficial y la humedad del residuo).

Tabla 4. Comparación entre los valores de algunos de los indicadores reportados en los lixiviados por diferentes autores (todos los valores en mg/L, excepto pH)

Indicador	Frascari et al. (2004)	Rastas (2002)	Resultados del presente trabajo
pH	8,38	4,5 - 7,8	7,67 - 8,10
DQO	5050	400 - 15200	1008 - 2011
DBO ₅	1270	500 - 68000	685 - 902
N-am	1330	8,5 - 3610	50,5 - 146,1
Pb	-	<0,001 - 0,9	0,11 - 0,71
Cd	-	<0,0002 - 0,1	0,01 - 0,02

Tabla 5. Resultados de los parámetros fundamentales para el balance hídrico en el vertedero

Parámetro	Época	
	Seca	Lluvia
Precipitación (mm/d)	6,00	13,00
Escorrentías (mm/d)	2,00	3,33
Evapotranspiración (mm/d)	4,66	6,46
Humedad de los RSU (m ³ /d)	79,00	89,00
Consumo de agua en la formación del gas de vertedero (m ³ /d)	2,25	2,25
Capacidad de campo de los RSU (m ³ /d)	58,00	53,00
Capacidad de campo del vertedero (m ³ /d)	73,00	68,00

De acuerdo con el balance (hídrico) en el vertedero el potencial de formación de lixiviados tuvo en cuenta: el agua que se incorpora producto de las precipitaciones, la humedad del RS, la humedad del material de cobertura, el agua que se infiltra de las capas superiores, así como el agua consumida en la formación del gas de vertedero, el vapor de agua saturado en el gas, la evapotranspiración y el área superficial de la zona de vertido (6 400 m²), con lo que se obtuvo un estimado de 41,23 m³/d en época de lluvia, con un mínimo en época de seca de 12,74 m³/d.

En la literatura se reporta que los lixiviados generados alcanzan entre un 2,5 y un 10,0 % (JICA 2005) de las precipitaciones. En las condiciones de Cuba, de acuerdo con los datos obtenidos en este trabajo, los lixiviados generados constituyen un 33 y 49 %, respectivamente, de las precipitaciones registradas en época de seca y de lluvia. Para el caso de la humedad global de los residuos que llegan al vertedero, este parámetro resulta en un 42 y 47 %, respectivamente. Ambos indicadores, como puede apreciarse, son las fuentes principales de aporte de humedad al vertedero (75 y 96 % del total, respectivamente) y, por lo tanto, los factores más importantes en la formación de los lixiviados, al menos para las condiciones de Cuba.

En países como China y Japón la humedad global de los residuos a depositar en los vertederos es de sólo un 8 %, ya que la fracción orgánica de los RSU no se dispone sino que es valorizada (JICA 2005). Con esa humedad global de los RSU no se sobrepasaría la capacidad de campo del vertedero y, por lo tanto, no se producirían lixiviados debido a este factor, ya que toda la humedad sería retenida por el propio RSU y el material de cobertura. Es por ello que, en dichos países, la precipitación constituye la fuente principal de generación de lixiviados.

Sin embargo, en el caso de Cuba, la humedad global de los RSU que se disponen en los vertederos es muy superior al caso descrito anteriormente (42 y 47 % para los periodos de seca y de lluvia, respectivamente). Por lo tanto, si se quiere minimizar el impacto ambiental que provocan los lixiviados, el primer paso sería valorizar la fracción orgánica de los RSU, reduciendo con ello los volúmenes de generación de lixiviados.

Procedimiento tecnológico para el tratamiento de los lixiviados

Existen varias opciones de tratamiento, las que incluyen procesos físicos, químicos, biológicos y combinaciones de estos (Rocha et al. 2011, Di Iaconi et al. 2011, Cortez et al. 2011, Yilmaz et al. 2010). Sin embargo, esta elección dependerá en gran medida de las características específicas del lixiviado a tratar.

El Consorcio para la Gestión de Residuos Sólidos en Asturias (COGERSA) España, realiza el tratamiento biológico de los lixiviados de los vertederos de residuos sólidos de esa región mediante la utilización de tecnologías que comprenden cuatro biorreactores, tres aerobios (lodos activados) y uno anóxico (Peláez et al. 2004). En Argentina existen plantas de tratamiento de lixiviados que tienen implementado, como segundo paso de tratamiento biológico, la utilización de lodos activados (INSMET 2009).

En ambos casos estas tecnologías necesitan suministro de aire, con el consiguiente consumo permanente de energía durante todo el tiempo de operación, alcanzando eficiencias de eliminación de materia orgánica (expresada como DBO_5) entre 90 y 95 %, y de un 10 y 15 % para el nitrógeno y el fósforo, respectivamente. Además requieren de operarios bien calificados y expertos y los costos de operación y mantenimiento son elevados.

Teniendo en cuenta que el lixiviado estudiado se caracteriza por su relativamente alta concentración de compuestos, principalmente orgánicos (expresados en términos de DQO y DBO_5), sólidos disueltos y microorganismos patógenos (tabla 3), con el objetivo de lograr el vertimiento seguro y cumplir con los límites exigidos por la norma para estos casos (por ejemplo, DBO_5 y DQO hasta valores de 60 y 120 mg/L, respectivamente). Se valora un procedimiento tecnológico capaz de suplir las desventajas de los anteriormente descritos, de acuerdo con las condiciones del país.

Esta valoración se basa fundamentalmente en procesos biológicos de depuración, teniendo en cuenta que la relación DBO_5/DQO mostró valores entre 0,45 (estación de seca) y 0,68 (estación de lluvia), lo que manifiesta que es un residual biodegradable y que también cumple de manera satisfactoria con el balance materia orgánica-nutrientes 500:5:1 (C:N:P), necesarios para asegurar un buen funcionamiento de los procesos de tratamiento anaerobios, como primer paso de tratamiento biológico.

El tratamiento anaerobio es una aplicación óptima para reducir altas cargas orgánicas en las aguas residuales de manera general y, a su vez, los metales pesados sedimentan en el lodo anaerobio. Las concentraciones de metales en el lixiviado son bajas (tabla 3), lo cual no traería problemas de toxicidad para las bacterias encargadas de realizar la estabilización de la materia orgánica presente en el lixiviado, durante el proceso de digestión anaerobia como etapa inicial de tratamiento biológico. Además, si se garantiza dentro de un sistema de gestión integral (SGI) de los RSU la separación en origen, las concentraciones de metales posiblemente serían inferiores a los valores alcanzados en el presente estudio.

Para el diseño del sistema de tratamiento se tomaron como base los resultados alcanzados en el presente estudio de la caracterización del lixiviado, así como el vertimiento de los RSU de una población de 334226 habitantes hacia el nuevo vertedero. Esta cantidad de habitantes produce un estimado de 189 t/d de RSU, teniendo en cuenta un índice de generación promedio de 0,56 kg/hab.d (JICA 2005), para un flujo de lixiviado máximo de 42 m³/d (de acuerdo con los resultados del balance hídrico del vertedero, en época de lluvia).

Las características principales estimadas del efluente de cada una de las etapas de tratamiento se resumen en la tabla 6.

Tabla 6. Características principales del afluente (C_a) y estimadas de los efluentes (C_e) de cada etapa de tratamiento

Parámetros (mg/L)	Afluente	Tanque Séptico		Filtro Anaerobio		Laguna Facultativa		Laguna Maduración	
	C_a (mg/L)	C_e (mg/L)	Ef (%)	C_e (mg/L)	Ef (%)	C_e (mg/L)	Ef (%)	C_e (mg/L)	Ef (%)
DBO ₅	685-902	479-631	20-40	72-95	80-90	38-50	35-50	23-30	30-50
DQO	1008-2011	706-1408	20-40	177-352	70-80	115-229	30-40	75-149	25-40
SST	246-629	98-252	50-70	29-76	65-75	15-38	40-60	8-19	40-60
Nt	73-146	68-135	5-10	41-81	30-50	21-41	45-60	11-21	40-60
Pt	9-69	8.60-66	4-6	4.3-33	40-60	3-20	30-50	2-11	35-55
Coliformes totales *	5,0·10-1,63·10 ⁴	4,4·10-1,5·10 ⁴	6-10	3,1·10-1,05·10 ⁴	20-40	1,6·10-5,25·10 ³	40-60	3,2·10-1,0·10 ³	70-85
C: concentración, Ef: eficiencia obtenida en el tratamiento, * expresados en NMP/100 mL									

En la primera etapa (tanque séptico) se lograría la separación de los sólidos en suspensión de la fase líquida, pasando el sobrenadante a la siguiente etapa (filtro anaerobio) donde se alcanzarían eficiencias de eliminación de la DBO₅ del 80 % y DQO del 70 %. El efluente del filtro, después de su paso por la laguna facultativa, podrá alcanzar eficiencias en eliminación de la DBO₅, DQO, Nt y Pt del 75 %, 60 %, 60 % y 40 %, respectivamente. Durante la etapa final (laguna de maduración) es factible que el 80 % de los microorganismos patógenos sean removidos. Como resultado del tratamiento anaerobio se produce un volumen de 10 m³/d de biogás, el cual podrá utilizarse en la cocción de los alimentos del personal que labora en el vertedero.

Los lodos almacenados en el tanque séptico y el filtro anaerobio (15 m³ cada 180 d), de acuerdo con el diseño del sistema de tratamiento propuesto, serán enviados a un lecho de secado. El lodo seco podrá utilizarse, posteriormente, como mejorador de suelo de las áreas verdes en el propio vertedero.

Se puede observar (tabla 4) que las características principales del efluente final cumplen con las normativas establecidas en el país (ONN 2012) según aparece en la tabla 3, lográndose el vertimiento seguro al medio ambiente. Los parámetros de diseño y el dimensionamiento de los órganos de tratamiento se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Parámetros de diseño y dimensionamiento de los órganos de tratamiento

Parámetros	Tanque Séptico	Filtro Anaerobio	Laguna Facultativa	Laguna Maduración
Carga orgánica (Kg DQO/d)	41,60	29,09	7,26	4,73
Bv (Kg DQO/m ³ .d)	-	1,10	-	-
TRH	5,00*	15,00*	10,00	12,00
Área superficial (m ²)	8,00	18,00	242,00	288,00
Volumen efectivo (m ³)	16,00	36,00	435,60	518,40
Profundidad efectiva (m)	2,00	2,00	1,80	1,80
TRH*: Tiempo de residencia hidráulico en h. TRH: Tiempo de residencia hidráulico en días. Bv: Carga orgánica volumétrica.				

En el informe del Estudio del Plan Maestro sobre Manejo Integral de los Residuos Sólidos Urbanos en la Ciudad de la Habana (JICA 2005), se proponen seis alternativas posibles como tecnologías de tratamiento de los lixiviados que se generan en los vertederos de esta ciudad.

En dos de las alternativas se establece utilizar lagunas aireadas como primer paso de tratamiento biológico y en otras dos como segundo paso.

Los procesos de tratamiento aerobios (lagunas aireadas, lodos activados) que requieren suministro de aire, al recibir cargas orgánicas (en términos de DBO_5) como las que presentan los lixiviados objeto de estudio, se convierten en sistemas altamente consumidores de energía eléctrica, debido a los grandes volúmenes de aire que se requieren para la degradación de la materia orgánica por los microorganismos aerobios. Esto hace que estos sistemas se vuelvan no compatibles con las condiciones y la política energética que fomenta Cuba en estos momentos. Además, generan gran cantidad de lodos que posteriormente necesitan ser estabilizados. Al mismo tiempo, se considera que el funcionamiento de estos sistemas se ve afectado por las fluctuaciones de la carga contaminante del afluente.

Por el contrario los sistemas de tratamiento anaerobios (filtro anaerobio, por ejemplo) no requieren de suministro de energía, por el contrario, permiten obtener y almacenar biogás como fuente alternativa de energía. Se considera que son sistemas capaces de soportar las fluctuaciones de la carga contaminante del afluente (Li et al. 2007, JICA 2005). La eficiencia de eliminación de materia orgánica expresada como DBO_5 en los filtros anaerobios está entre el 80 y 90 %, un poco menor que la que se obtiene en las lagunas aireadas y lodos activados que es del 90 al 95 %.

En tres de las alternativas se propone como primer paso de tratamiento una laguna anaerobia, la cual tiene como inconveniente la necesidad de grandes espacios por ser un sistema anaerobio con biomasa en suspensión, además de no permitir el aprovechamiento del biogás que se produce como resultado del proceso de depuración del residual.

En comparación, los filtros anaerobios requieren menor espacio por ser sistemas con biomasa inmovilizada y permiten recolectar el biogás que se produce en su interior. Debido al proceso de adsorción que realiza la biomasa inmovilizada en su interior, alcanza eficiencias de eliminación de sólidos suspendidos del 65 al 75 %, comparadas con un 20 a 35 % en las lagunas anaerobias.

En contraposición con las lagunas aireadas y los lodos activados, propuestos como segundo paso en las alternativas de tratamiento del Estudio del Plan Maestro sobre Manejo Integral de los Residuos Sólidos Urbanos en la Ciudad de La Habana (JICA 2005), las lagunas facultativas requieren de una mayor área, pero tienen la ventaja de no necesitar suministro de energía, salvo la solar. Esta condición está garantizada, dadas las características ambientales naturales de Cuba, que por su posición geográfica, situada en una latitud muy próxima al Trópico de Cáncer, recibe altos valores de radiación solar durante todo el año (INSMET 2009). Estos sistemas alcanzan eficiencias de eliminación de materia orgánica (expresada como DBO_5) entre 70 y 80 %, y del 70 y 60 % para el nitrógeno y el fósforo respectivamente. Además, la formación de lodos es mínima con respecto a los sistemas aireados y el costo de operación y mantenimiento es menor. Debido a la reducción importante que logran sobre el nitrógeno y el fósforo, disminuyen considerablemente la aparición del fenómeno de eutrofización de los cuerpos hídricos donde descargan sus aguas. Estos sistemas también resisten las fluctuaciones de la carga contaminante del afluente (JICA 2005).

Otros autores (Yilmaz et al. 2010) han empleado la coagulación - floculación como alternativa de tratamiento de lixiviados de los vertederos. Este proceso tiene como inconveniente la generación de grandes cantidades de lodo, así como un consumo elevado de reactivos (sulfato

de aluminio, sulfato de hierro o cloruro de hierro), lo cual encarece el tratamiento. Los lodos que genera esta operación no pueden ser posteriormente aprovechados como mejoradores de suelo, por las altas concentraciones de aluminio o hierro (200 - 800 mg/L) que pueden presentar (Méndez et al. 2004). Al ser depositados estos lodos en los vertederos, podría incrementarse la presencia de dichos cationes en sus lixiviados, debido a la liberación de los mismos a partir de los lodos allí depositados. La eficiencia de eliminación de materia orgánica en términos de DBO₅ está entre 25 y 35 %, y del 65 al 99 % para los metales (Méndez et al. 2004).

En estudios a escala de laboratorio realizados por el Centro Nacional de Investigaciones Científicas, ubicado en la ciudad de la Habana, se han logrado alcanzar eficiencias de eliminación de la materia orgánica presente en los lixiviados, expresada como DQO de hasta un 85 %, reduciendo el volumen de lodo formado en el proceso de coagulación - floculación hasta en un 50 %, con la utilización del ozono como post tratamiento (Espinosa et al. 2007). Este resultado pudiera hacer que, en un futuro, las tecnologías de tratamiento de los lixiviados de vertederos basadas en el proceso de coagulación - floculación sean, tanto técnica como económicamente, competitivas frente a los procesos de tratamiento biológicos, aspecto éste que en la actualidad no ocurre.

De acuerdo con la discusión anterior, en el presente trabajo se propone un esquema de tratamiento basado en un tanque séptico, un filtro anaerobio y dos lagunas, la primera facultativa y la segunda de maduración, con tratamiento final de los lodos, a través de un lecho de secado.

Con esta alternativa se logra el vertimiento seguro al medio ambiente de los efluentes provenientes del tratamiento de los lixiviados, con un menor costo y una mayor eficiencia de eliminación de contaminantes. En la figura 1 se presenta el esquema de la propuesta tecnológica para el tratamiento de los lixiviados.

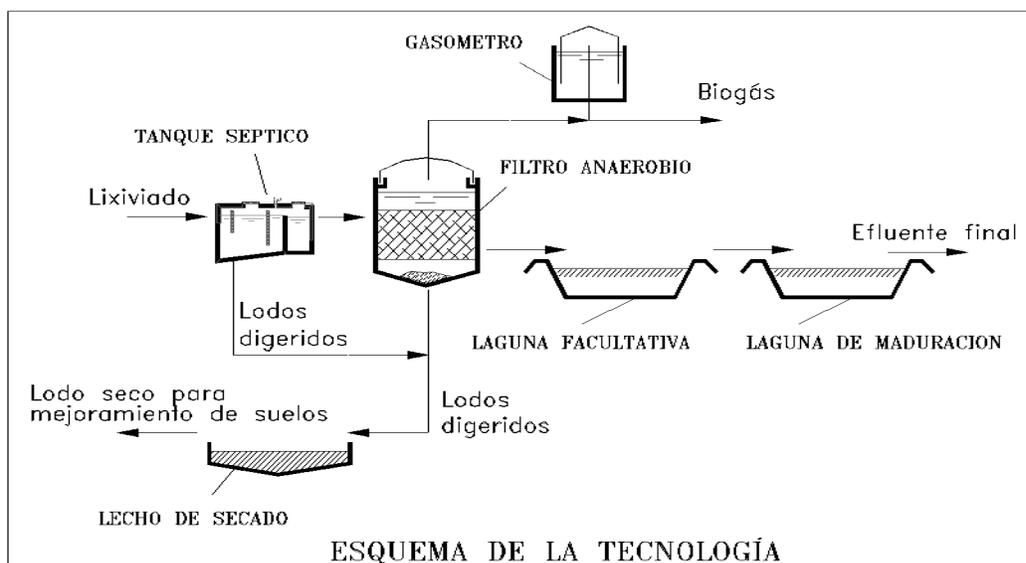


Figura 1. Esquema de la propuesta tecnológica para el tratamiento de los lixiviados

CONCLUSIONES

- Las concentraciones de los diferentes indicadores analizados en los lixiviados mostraron una gran variabilidad debido, entre otras causas, a que los vertederos de residuos sólidos urbanos de donde proceden no están impermeabilizados.
- Los lixiviados estudiados se caracterizan por su relativamente alta concentración de compuestos, principalmente orgánicos (contenido de materia orgánica expresada en términos de DQO y DBO₅), sólidos disueltos y microorganismos patógenos (coliformes), comparados con otros tipos de aguas residuales.
- Las precipitaciones y la humedad propia de los residuos sólidos son los indicadores más importantes a los efectos de estimar el volumen de lixiviados, que se generan en los vertederos, en el caso de Cuba.
- La propuesta de sistema de tratamiento de lixiviados, provenientes de la disposición final de los residuos sólidos urbanos, se caracteriza por los siguientes órganos de tratamiento: tanque séptico, filtro anaerobio, laguna facultativa y laguna de maduración, cuya aplicación posibilitaría el cumplimiento de las exigencias de la Norma Cubana de Vertimiento (NC 27:2012), garantizando el vertimiento seguro del residuo.
- La presente propuesta deberá ser considerada e incluida dentro del sistema de gestión integral de los residuos, para garantizar la eliminación del contaminante fundamental de la corriente de lixiviados, el contenido de materia orgánica.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Agencia para la Cooperación Internacional de Japón (JICA) y al Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA) de Cuba, por el apoyo financiero para la ejecución de este trabajo.

REFERENCIAS

- APHA-AWWA-WPCF** (2005). "Standard Methods for the examination of Water and Wastewater". 21st Edition. American Public Health Association. USA.
- Cortez S., Teixeira P., Oliveira R. and Mota M.** (2011). "Evaluation of Fenton and ozone-based advanced oxidation processes as mature landfill leachate pre-treatments". *Journal of Environmental Management*, vol. 92, pp. 749-755. Amsterdam. Holland.
- Di Iaconi C., Rossetti S., Lopez A. and Ried A.** (2011). "Effective treatment of stabilized municipal landfill leachates". *Chemical Engineering Journal*. vol. 168, pp. 1085-1092. Amsterdam. Holland.
- Espinosa M., Torres M., Pellón A., Fernández L. and Bataller M.** (2007). "Perspectives of ozone application as treatment alternative for leachates of municipal solid wastes in Cuba". Libro de Memorias. 5º Simposio Internacional de Aplicaciones del Ozono. 23 al 26 de abril. Centro de Investigaciones del Ozono, Centro Nacional de Investigaciones Científicas. Habana, Cuba.
- Espinosa Ma. del C., López M., Pellón A., Robert M., Díaz S., González A., Rodríguez N., Fernández A. y Hernández C.** (2010) "Análisis del comportamiento de los lixiviados generados en un vertedero de residuos sólidos municipales de la Ciudad de La Habana". *Revista Internacional de Contaminación Ambiental.*, vol. 26, no. 4, pp. 313-325. México.

- Frascari D., Bronzini F., Giordano G., Tedioli G. and Nocentini M.** (2004). “Long-term characterization, lagoon treatment and migration potential of landfill leachate: a case study in an active Italian landfill”. *Chemosphere*, vol. 54, no.3, pp. 335–343. Holland.
- INSMET** (2009). “El Clima de Cuba. Características generales”. Centro del Clima. Instituto de Meteorología. La Habana. Cuba. Extraído de: <http://www.insmet.cu> en sept. 2009.
- JICA** (2005). “Estudio del Plan Maestro sobre Manejo Integral de los Residuos Sólidos Urbanos en Ciudad de La Habana, Cuba”. Agencia de Cooperación Internacional de Japón. Informe Final, Vol. II, capítulo 8. Nippon Koei Co., LTD. Pacific Consultants International, Japón.
- Méndez R., Castillo E., Sauri M. R., Quintal C., Giacoman G. Y. y Giménez B.** (2004). “Tratamiento físico químico de lixiviados de un relleno sanitario”. *Ingeniería*, vol. 8, no. 2, pp. 155–163. Universidad Autónoma de Yucatán. México.
- ONN** (2012). “Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado”. Especificaciones. Oficina Nacional de Normalización. NC 27:2012. La Habana, Cuba.
- ONN** (2000). “Clasificación de los objetos hídricos y de la utilización de las aguas terrestres”. Oficina Nacional de Normalización. La Habana. Cuba.
- Peláez A.I., Almendros G., Fernández E., Sastre H., Rodicio M.R. y Sánchez J.** (2004). “Caracterización de las fracciones orgánicas en una planta de tratamiento de aguas residuales procedentes de un vertedero de residuos sólidos urbanos. Aplicación de distintos métodos de adsorción-floculación para eliminar el color del lixiviado y del efluente”. Consorcio para la Gestión de Residuos Sólidos en Asturias (COGERSA). España.
- Rastas L.** (2002). “Typical leachate – does it exist?”. Department of Environmental Engineering. Division of Waste Science & Technology, USA.
- Rocha E., Vilar V., Fonseca A., Saraiva I. and Boaventura R.** (2011). “Landfill leachate treatment by solar-driven AOPs”. *Solar Energy*, vol. 85, no.1, pp. 46–56. Germany.
- Yilmaz T., Apaydin S. and Ali B.** (2010). “Coagulation-flocculation and air stripping as a pretreatment of young landfill leachate. *The Open Environmental Engineering Journal*, vol. 3, pp. 42-48. Canada.