

TECNOLOGÍA PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS PROVENIENTES DE VERTEDEROS DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Alexis Pellón Arrechea*, Matilde López Torres***, María del Carmen Espinosa
Lloréns***, Rigoberto Escobedo Acosta**

*Departamento de Estudios sobre Contaminación Ambiental (DECA), **Centro de Investigaciones del Ozono (CIO),
***Centro Nacional de Investigaciones Científicas (CNIC)

El objetivo del presente trabajo es exponer los resultados obtenidos en el desarrollo de una tecnología para el tratamiento de lixiviados provenientes del vertimiento de residuos sólidos urbanos, tomando como base la evaluación físico-química de los residuos generados en los tres vertederos principales de Ciudad de La Habana.

Las muestras fueron colectadas según las orientaciones sobre muestreo de aguas residuales (ISO 5667-10), evaluando los indicadores de calidad de acuerdo a los métodos analíticos normalizados para aguas y aguas residuales. Para el cálculo de la generación de lixiviados se realizó un balance hidrológico considerando para ello todas las corrientes que entran y salen del vertedero.

Los resultados obtenidos mostraron el elevado contenido de materia orgánica expresado en términos de DQO y DBO₅ tanto en época de lluvia como en seca, con media geométrica de concentración de coliformes fecales entre 104 y 105 NMP/100mL. Se comprobó que no existen diferencias significativas entre los lixiviados provenientes de los diferentes vertederos evaluados (α : 0,05). A partir del balance hídrico se obtuvo un estimado de 42 m³/d de lixiviado (época de lluvia) con un mínimo de 13 m³/d (seca), comparable con los resultados reportados en la literatura. La tecnología se distingue por lo siguiente: tanque séptico - filtro anaerobio - sistema de lagunas, con la que se garantiza la reducción del principal contaminante, expresado en términos de DQO y DBO₅ de 2011 a 75 mg/L y de 902 a 30 mg/L respectivamente así como de microorganismos patógenos, asegurando además la disposición final del residuo tratado.

Palabras clave: lixiviados, tecnología, tratamiento, vertederos, Residuos sólidos urbanos.

The objective of the present work is to expose the obtained results in the developing of one technology of leachate treatment coming from the landfills, considering the physical-chemical evaluation of the wastes generated in the three main landfills of Havana City.

The samples were collected according to the orientations about sampling of wastewaters (ISO 5667-10), evaluating the indicators of quality according to the Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. For the estimation of the generation of leachate a hydrological balance was carried out, considering for it all the streams in the landfill that enter and leave.

The obtained results show the high content of organic matter expressed as DQO and DBO₅, in rain and dry season, with concentration of fecal coliformes between 104 and 105 NMP/100mL. No significant differences were observed among leachates coming from the different landfills evaluated (α : 0,05). 42 m³/d of leachate was obtained from the hydrological balance, with a minimum of 13 m³/d (dry season), comparable with the results reported in the literature.

The technology is distinguished for the following: septic tank - anaerobic filter - lagoons system, with which the reduction of the main pollutant is guaranteed, expressed in terms of DQO and DBO₅ from 2011 to 75 mg/L and of 902 to 30 mg/L respectively as well as of pathogenic microorganisms, assuring the final disposition of the treated wastes.

Key words: leachate, technology, treatment, landfill, municipal solid wastes.

Introducción

Los lixiviados constituyen la parte líquida que se filtra a través de los residuos sólidos, dispues-

tos en un vertedero y que extrae materiales disueltos o en suspensión /1/. Estos a su vez están determinados por un conjunto de elementos entre los que se encuentran la composición de los

residuos sólidos, la forma de operación del vertedero y las condiciones climáticas del lugar donde se encuentra ubicado. Su composición varía según la antigüedad del vertedero y la historia previa al momento de muestreo.

La literatura se abordan diferentes alternativas de tratamiento de lixiviados tanto biológicos como físico químicos entre los que se encuentran la aplicación de lodos activados, lagunas, reactores de lotes secuenciales, filtros percoladores, reactores UASB, procesos químicos de neutralización, precipitación, intercambio iónico /2, 3, 4/.

Los tratamientos aerobios, en general, tienen el inconveniente de la generación de un volumen apreciable de lodos de difícil degradación los que requieren la aplicación de un pretratamiento antes cualquier alternativa de solución /5/. La combinación de tratamiento anaerobio-aerobio garantiza la reducción de la carga orgánica contaminante, amortizándose con ello los efectos de la producción de lodo y los consumos energéticos que las variantes de tratamiento aerobio imponen.

Particularmente en la ciudad de La Habana 3000 toneladas de residuos son vertidos diariamente en el vertedero de residuos sólidos de la capital, de los cuales 1800 toneladas son de origen orgánico con un alto contenido de humedad (73 %), los que provocan severos impactos ambientales sobre las fuentes de abasto de aguas superficiales y subterráneas, al no contar con sistemas de recolección y tratamiento.

El presente trabajo aborda una solución tecnológica para el tratamiento de los lixiviados generados en vertederos de residuos sólidos urbanos, tomando como base la evaluación físico-química realizada en los tres vertederos principales de la Ciudad de La Habana.

Fundamentación teórica

Los problemas del manejo inadecuado de los residuos sólidos no sólo afecta la salud humana, también está relacionado con la contaminación tanto atmosférica como del suelo, y las aguas superficiales y subterráneas que muchas veces son fuentes de abastecimiento de agua potable. Estos recursos hídricos se contaminan por la

afluencia de lixiviados sin tratamiento procedentes de los vertederos de residuos sólidos.

Existen varias opciones de tratamientos tanto anaerobios como aerobios. La digestión anaerobia es un proceso biológico por medio del cual la materia orgánica, en ausencia de oxígeno, es transformada principalmente en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), todos ellos componentes del biogás.

El inconveniente del proceso anaerobio es el relativamente bajo crecimiento de las bacterias productoras de metano. Sin embargo, constituye una de las ventajas principales la baja producción de lodo, a diferencia de los procesos aerobios /1, 2/.

La dificultad anteriormente mencionada fue resuelta con el desarrollo de digestores de segunda generación o de alta velocidad de carga orgánica, entre los que se encuentran los filtros anaerobios, el cual consiste en un tanque parcialmente relleno con un material inerte que actúa como soporte para la adherencia microbiana, lo que permite alcanzar elevadas concentraciones de biomasa en el interior del reactor, simultáneamente con un contacto óptimo entre la biomasa y el sustrato, minimizando en lo posible las resistencias adicionales a la transferencia de materia. El soporte es colocado al azar y el flujo de residual a tratar puede ser ascendente, descendente o en combinaciones de ambos. Opera a elevadas velocidades de carga y tiempos de residencia hidráulicos (TRH) muy bajos (horas). Los filtros anaerobios son de fácil operación y mantenimiento, por lo que constituyen uno de los reactores más ampliamente utilizados para el tratamiento de residuos líquidos con alta concentración de materia orgánica /4/.

La tecnología de lagunas es uno de los métodos naturales más importantes para el tratamiento de aguas residuales. Las lagunas de maduración son empleadas en el tratamiento terciario para la remoción de patógenos por medio de mecanismos de desinfección natural y nutrientes (principalmente nitrógeno). Son económicas, adecuadas para países tropicales y subtropicales dado que la intensidad del brillo solar y la temperatura ambiente son factores clave para la eficiencia de los procesos de degradación.

La combinación de ambos procesos podría constituir una variante tecnológica económica para la solución de los lixiviados provenientes del vertido de residuos sólidos urbanos.

Métodos utilizados y condiciones experimentales

Lixiviados

Las muestras proceden de los tres vertederos principales de la ciudad de La Habana, conoci-

dos como: vertedero de Calle 100, vertedero de Guanabacoa y 8 Vías. Estas fueron tomadas teniendo en cuenta la época del año (seca y lluvia), siguiendo para su colección se la norma ISO 5667-10 /6/. Las características generales del lixiviado en ambos períodos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1
Caracterización promedio de los lixiviados considerando la época del año

	Unidades	Estación de seca	Estación de lluvia
T	-	8,10	7,67
Temperatura	°C	29,53	30,40
CE	mS.cm ⁻¹	8,80	6,02
OD	mg.L ⁻¹	0,00	0,32
DBO ₅	mg.L ⁻¹	902,24	684,89
DQO	mg.L ⁻¹	2 011,00	1 008,78
SDT	mg.L ⁻¹	6 202,50	3 824,22
SST	mg.L ⁻¹	629,17	246,00
STV	mg.L ⁻¹	1 293,33	1 302,44
Coliformes Totales	MPN/100ml	5,93E+01	1,05E+05
Coliformes Fecales	MPN/100ml	4,98E+01	1,63E+04
As	mg.L ⁻¹	0,23	0,08
Cd	mg.L ⁻¹	0,02	0,01
Cu	mg.L ⁻¹	1,40	0,15
Pb	mg.L ⁻¹	0,71	0,11
Zn	mg.L ⁻¹	6,20	0,24
Cr ⁺⁺	mg.L ⁻¹	0,12	0,31
CN-T	mg.L ⁻¹	0,05	0,06
N-NH ₃	mg.L ⁻¹	104,69	50,54
N-NO ₂	mg.L ⁻¹	0,23	0,02
N-NO ₃	mg.L ⁻¹	0,36	0,01
Nitrógeno total	mg.L ⁻¹	146,13	72,56
Fósforo total	mg.L ⁻¹	68,50	8,82
Aceites y Grasas	mg.L ⁻¹	3,93	1,23
Fenoles	mg.L ⁻¹	0,27	0,08
Detergentes	mg.L ⁻¹	0,75	0,24
Alcalinidad	mg.L ⁻¹	1190,43	923,18
Acidez	mg.L ⁻¹	250,00	213,56
Color	UC	6958,33	2517,33
Turbidez	NTU	289,10	104,32

Evaluación de la generación de lixiviados

Teniendo en cuenta que ninguno de los vertederos de la ciudad cuenta con sistema de colección de lixiviados, donde fuese posible medir el caudal, se decidió calcular la generación de lixiviado a través de un balance hídrico, el cual tuvo en cuenta la suma de todas las corrientes de aguas que entran, la sustracción de las consumidas en las reacciones químicas, así como la cantidad que sale como vapor de agua.

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).

Consideraciones para el balance:

1. Agua que entra desde arriba: considerando la capa superior del vertedero ésta es el agua que procede de la precipitación atmosférica y que se filtra a través del material de cobertura.

- Humedad del residuo sólido: 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.
- Humedad del material de cubrición. La cantidad de agua que entra con estos materiales dependerá del tipo, del origen y la estación del año.



- Lixiviado. Agua que sale desde el fondo de la primera celda del vertedero.
- Evaporación. Depende directamente de las condiciones climáticas locales (temperatura, porcentaje de horas de iluminación solar anual).
- Capacidad de campo. La cantidad de agua que puede retener el vertedero (material residual y

- Agua que abandona el vertedero formando parte del gas. 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 pueden estimar utilizando la fórmula:

el de cobertura), en contra de la gravedad, se denomina capacidad de campo (CC).

Estimación de la capacidad de campo (CC):

$$CC = 0,6 - 0,55 \left(\frac{W}{10,000 + W} \right) \quad (2)$$

donde:

CC = Capacidad de campo, fracción de agua en los residuos basado en el peso de los mismos.

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

Balace de aguas del vertedero:

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

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 fangos 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 que sale inferiormente, agua de fondo, lixiviado (kg/m^3).

Tratamiento

Primeramente se analizó la posibilidad técnica de aplicar el tratamiento anaerobio al residuo objeto de estudio. Una vez concluido, se procedió al diseño tecnológico del sistema de tratamiento. La elevada concentración de materia orgánica indica que es aconsejable utilizar métodos de tratamiento biológicos y específicamente la necesidad de una etapa inicial de tratamiento anaerobio, con lo cual se consigue una importante reducción de la carga orgánica que puede complementarse luego con variantes de tratamiento aerobios.

Métodos analíticos

Todos los análisis (DQO, DBO5, OD, CE, sólidos totales (ST), sólidos totales volátiles (STV), sólidos disueltos totales (SDT), sólidos suspendidos totales (SST) y el pH), fueron realizados por triplicados empleando para ello fuentes validadas /7/.

Procesamiento estadístico

Para el procesamiento estadístico se empleó el paquete de programas estadísticos Statgraphics / 8/. Como herramienta de trabajo se utilizó además el programa Microsoft Excel /9/.

Resultados y discusión

La composición química de los lixiviados de vertederos de residuos sólidos urbanos varía considerablemente, no sólo por la antigüedad del mismo sino también por la historia previa al momento de la toma de muestra.

Se comprobó que no existen diferencias significativas entre los lixiviados provenientes de los diferentes vertederos (Calle 100, Guanabacoa y 8 Vías) evaluados (α : 0,05). De ahí que el estudio se siguiera teniendo en cuenta los valores promedios de los lixiviados.

Los resultados obtenidos muestran que en ambas estaciones de muestreo las concentraciones de materia orgánica expresada en términos de DBO y DQO fueron elevadas. La relación DBO_5/DQO de 0,45 (seca) y 0,68 (lluvia) indican que gran parte de la fracción orgánica es fácilmente biodegradable.

Los coliformes en la estación de lluvia fueron superiores a los de la estación de seca, la mayor parte de ellos son de origen fecal. El aumento de este indicador, en épocas de lluvia, pudiera deberse a las escorrentías a partir de los residuos sólidos, ya que al filtrarse el agua a través de los residuos en descomposición se lixivía gran parte del material orgánico y junto con ellos los microorganismos. De ahí, el gran riesgo que constituyen los lixiviados para las aguas subterráneas y superficiales, lo que puede considerarse el impacto ambiental más severo de los vertederos /10/.

Datos de calidad de lixiviados han sido reportados en numerosos trabajos /1, 2, 4, 10, 11/. Las muestras de lixiviados colectadas de vertederos sin impermeabilizar, pueden mostrar concentraciones erróneamente bajas, debido a dilución por el agua subterránea. Estos mismos factores pudieran estar vinculados a la variabilidad asociada a los datos reportados. En Ciudad de La Habana ningún vertedero está impermeabilizado lo que pudiera ser una causa importante de la variabilidad observada en la caracterización.

Comparando los resultados obtenidos (tabla 1) con los límites máximos permisibles (LMPP) establecidos por la Norma Cubana de Vertimiento / 12/ (tabla 2), se destaca que todos los indicadores determinados en el presente trabajo se encontraban por encima de la norma.

Tabla 2
Criterios emitidos en la norma cubana de vertimiento de las aguas residuales a las aguas terrestres (NC 27:99)

	Unidades	NC 27:99 LMPP
		Vertimientos a Ríos y Embalses (Clase C)
pH	-	6-9
Temperatura	°C	50
CE	mS.cm ⁻¹	3,500
OD	mg.L ⁻¹	2
DBO ₅	mg.L ⁻¹	60
DQO	mg.L ⁻¹	120
Coliformes Totales *	MPN/100ml	**
Coliformes Fecales *	MPN/100ml	**
Nitrógeno total	mg.L ⁻¹	20
Fósforo total	mg.L ⁻¹	10
Aceites y Grasas	mg.L ⁻¹	30

* Como medias geométricas.

** El límite lo fijará el organismo rector de las aguas terrestres atendiendo al uso, necesidad de conservación y posible riesgo para la salud.

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 en el acercamiento con el balance hídrico correspondiente.

La tabla 3 resume los resultados obtenidos del cálculo de los principales parámetros que intervienen en el balance hídrico (precipitación, evotranspiración, capacidad de campo, escurrimiento superficial y humedad del residuo).

Tabla 3
Componentes principales del balance hídrico en un vertedero

Parámetros	Epoca	
	Seca	Lluvia
Precipitación (mm/d)	-	261,36
Escorrentías (mm/d)	2,00	3,33
Evotranspiración (mm/d)	4,66	6,46
Humedad de los RSU	79,00	89,00
Capacidad de campo de los RSU (m ³ /d)	58	53
Capacidad de campo del vertedero (m ³ /d)	73	68

Las precipitaciones constituyen la principal fuente de lixiviados, incidiendo en sus características cuatro factores principales: la cantidad, la intensidad, la frecuencia y la duración.

Para la estimación de la precipitación se consideraron los resultados estadísticos de los últimos 10 años en la zona de ubicación del vertedero (261,36 mm/d).

De acuerdo al balance hidrológico (ecuación 2) en el vertedero el potencial de formación de lixiviados tuvo en cuenta: el agua que entra producto de las precipitaciones, la humedad del residuo sólido, la humedad del material de cubrición, el agua que se infiltra de las capas superiores, así como las que salen: el agua consumida en la formación del gas de vertedero, el vapor de agua saturado en el gas y el área superficial de la zona de vertido (6400 m²), con lo que se obtuvo un estimado de 41,53 m³/d de lixiviado en época de lluvia, con un mínimo en época de seca de 12,74 m³/d. Los lixiviados generados suponen un 2,5 % de las precipitaciones registradas.

A pesar de los múltiples estudios que se llevan a cabo por diversas razones en materia de vertederos de residuos sólidos urbanos, impacta de manera significativa la escasa información respecto al estudio de la evaluación de los caudales de lixiviados que se generan en ellos. Por otra parte, algunos de estos reportes adolecen de

información suficiente (tipo y características de los residuos, precipitaciones registradas, etcétera.), para comparar los resultados, lo que resulta difícil sacar conclusiones.

Tecnología para el tratamiento de los lixiviados. Dadas las características y variabilidad de estos residuos resulta extremadamente complejo el diseño de un sistema de tratamiento.

Existen varias opciones las que incluyen procesos de tratamiento biológicos, físicos, químicos y combinaciones de éstos. Sin embargo, esta elección dependerá en gran medida del contaminante fundamental que caracteriza a la corriente de lixiviados.

De acuerdo a los resultados obtenidos, el lixiviado de referencia se identifica por su relativamente alta concentración de compuestos, principalmente orgánicos, (expresada en términos de DQO), sólidos disueltos y microorganismos patógenos (coliformes), comparados con otros tipos de aguas residuales.

El tratamiento anaeróbico es una aplicación interesante para reducir la alta carga orgánica inicial del lixiviado. Al mismo tiempo, los metales pesados sedimentan en el lodo anaeróbico.

La toxicidad producida por los metales pesados es mínima. Además, si se garantiza dentro del sistema de gestión integral de los residuos la

separación en origen, las concentraciones de metales estarían muy por debajo de los valores alcanzados en el presente estudio.

Teniendo en cuenta la experiencia en el tratamiento de residuos con alta carga orgánica se procedió a la elección de la mejor alternativa de tratamiento para su diseño, considerando a su vez los resultados de la caracterización del lixiviado y el vertimiento de RSU de una población de 334 226 habitantes, los que generan un estimado de 189 ton/d de residuos sólidos, para un flujo de lixiviado máximo de 42 m³/d.

En la primera etapa de tratamiento (tanque séptico) se logra la separación de los sólidos en

suspensión de la fase líquida, pasando el sobrenadante al tratamiento biológico (filtro anaerobio) donde se alcanzan eficiencias de eliminación de la DBO₅ del 80 % y DQO del 70 %. El efluente del filtro, después de su paso por la laguna facultativa, alcanza eficiencias en eliminación de la DBO₅, DQO, N_t y P_t del 75 %, 60 %, 60 % y 40 %, respectivamente. Durante la etapa final (laguna de maduración) el 80 % de los microorganismos patógenos son removidos.

La tabla 4 resume las características principales del efluente final con lo que se logra el vertimiento seguro al medio ambiente, con el cumplimiento además, de las normativas establecidas en el país /12/.

Tabla 4
Resumen del comportamiento del sistema para el tratamiento de lixiviados provenientes de vertederos de residuos sólidos urbanos

Parámetros	Afluente	Tanque Séptico		Filtro Anaerobio		Laguna Facultativa		Laguna Maduración	
	C (mg/L)	C (mg/L)	Ef (%)	C (mg/L)	Ef (%)	C (mg/L)	Ef (%)	C (mg/L)	Ef (%)
DBO ₅	685-902	479-631	20-40	72-95	80-90	38-50	35-50	23-30	30-50
DQO	1 009-2011	706-1408	20-40	177-352	70-80	115-229	30-40	75-149	25-40
SST (Ll)	246-629	98-252	50-70	29-76	65-75	15-38	40-60	8-19	40-60
N _t	73-146	68-135	5-10	41-81	30-50	21-41	45-60	11-21	40-60
P _t	9-89	8,60-66	4-6	4,3-33	40-60	3-20	30-50	2-11	35-55
Coliformes totales NMP/100 ml	50-16300	44-15000	6-10	31-10500	20-40	16-5250	40-60	3,2-1000	70-85

C: concentración.

Ef: eficiencia obtenida en el tratamiento

El esquema de tratamiento cumple con las exigencias de la norma (NC 27:99) y las condiciones de la zona objeto de estudio, cuyo efluente final será dispuesto hacia un arroyo. Este cuerpo de agua es de categoría C, debido a que es una zona hidrogeológica de menor importancia desde el punto de vista de usos socioeconómicos y, por lo tanto, dicha área tiene exigencias menores con su calidad ambiental.

La tabla 5 muestra los parámetros de diseño, así como el dimensionamiento de los órganos de tratamiento. Esta tecnología resulta competitiva y más adecuada para las condiciones de Cuba, al compararse con las propuestas por firmas extranjeras que tienen en cuenta lagunas aireadas (Laguna anaeróbica + Laguna aireada + Laguna de Maduración), que conllevan un mayor gasto energético /13/.

Tabla 5
Parámetros de diseño y dimensionamiento de los
órganos de tratamiento

Parámetros	Tanque Séptico	Filtro Anaerobio	Laguna Aerobia	Laguna Maduración
Carga orgánica (kg DQO/d)	41,60	29,09	7,26	8,55
Bv (kg DQO/m ³ .d)	-	1,10	-	-
TRH (h)	5,00	15,41	10,11*	18,89*
Área superficial (m ²)	8,00	18,00	242,00	512,00
Volumen efectivo (m ³)	16,00	36,00	435,60	921,00
Profundidad efectiva (m)	2,00	2,00	1,80	1,80

* TRH: Tiempo de residencia hidráulico (días).

Bv: Carga orgánica volumétrica.

Conclusiones

Los lixiviados estudiados se caracterizan por su relativamente alta concentración de compuestos, principalmente orgánicos, comparados con otros tipos de aguas residuales.

La tecnología 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 anaeróbico, laguna aerobia y laguna de maduración, la cual cumple con las exigencias de la Norma cubana de vertimiento y el vertimiento seguro del residuo.

La presente propuesta deberá ser considerada e incluida dentro del sistema de gestión integral de los RSU en la Ciudad de La Habana.

Nomenclatura

DQO: Demanda química de oxígeno

DBO: Demanda bioquímica de oxígeno

NMP: Número más probable

TRH: Tiempo de residencia hidráulicos

CE: Conductividad eléctrica

OD: Oxígeno disuelto

SDT: Sólidos disueltos totales

SST: Sólidos suspendidos totales

STV: Sólidos totales volátiles

As: Arsénico

Cd: Cadmio

Cu: Cobre

Pb: Plomo

Zn: Zinc

Cr⁺⁶: Cromo

CN-T: Cianuros totales

N-NH₃: Nitrógeno amoniacal

N-NO₂: Nitritos

N-NO₃: Nitratos

α: nivel de significación

Bibliografía

1. Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigel, S., *Gestión integral de residuos sólidos*, McGraw - Hill. 1994.
2. Borzacconi L., López I., Arcia E., Cardelino L., *et al*, *Comparación de tratamientos aerobios y anaerobios aplicados a lixiviado de relleno sanitario*, www.cepis.org.pe/bvsaidis/aresidua/mexico/01147e20.pdf.
3. González Rodríguez Y., García Fonseca O., Infante Sigler A., Rodríguez Frade N. *et al*, *Situación actual de la producción de lixiviados en los vertederos provinciales de ciudad de la habana. Impacto ambiental y propuestas de sistemas de tratamiento*, Revista electrónica de la agencia de medio ambiente. ISSN:1683-8904, vol. 5, No. 8, 2005.
4. Alkalay D., Chamy R., Guerrero L., Schiappacasse M., *Tratamiento anaerobio de lixiviados de relleno sanitario*, www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/mexico/01537e09.pdf.
5. López Torres, M., Espinosa Lloréns, M.C., *Effect of alkaline pretreatment on anaerobic digestion of solid wastes*, Waste Management, vol. 28, No. 11, 2008, págs. 2229-2234.
6. Iso 5667-10, *Water quality. Sampling. Part 10: Guidance on sampling of waste waters*, 1994.
7. Apha, Awwa, Wpcf, *Standard Methods for analysis of water 353 and wastewater*, 20th ed. American Public Health Association, 354 Washington, DC, USA, 355, 1998.
8. Statgraphic plus 5, Statistical Graphics Corp., USA.
9. Microsoft_ Excel, ver 9, Microsoft, USA, 2000.

-
10. Kjeldsen P., Christophersen M. *Composition of leachate from old landfills in Denmark*, Waste Management and Research, vol. 19, No. 3, 2001, págs. 249-256.
 11. Álvarez, A., *Tratamiento biológico del lixiviado generado en el relleno sanitario, El Guayabal de la ciudad San José de Cúcuta*, en Ingeniería & Desarrollo, ISSN: 0122-3461, No. 20, 2006.
 12. NC 27:99, *Vertimiento de Aguas Residuales a las Aguas Terrestres y al Alcantarillado. Especificaciones*, La Habana, Cuba, , 1999, pág. 14.
 13. Jica (Agencia de Cooperación Internacional de Japón), *Estudio del Plan Maestro sobre Manejo Integral de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en Ciudad de La Habana, Cuba, Informe de Avance (1), Parte 1*, 2004.