

Estudio piloto para el tratamiento de lixiviados generados en un botadero controlado

Pilot Study for the Treatment of Leachates generated in a Controlled Landfill

Lizbeth Pesántes^{a, b*}, Verónica Ruiz^{a*}, Marcelo Muñoz^a, María Belén Aldás^a

RESUMEN

El objetivo del estudio fue evaluar la eficiencia de una laguna de estabilización aerobia piloto anexa al tratamiento primario existente para los lixiviados producidos en un botadero controlado ubicado en la Provincia de Pichincha-Ecuador. Se caracterizó el lixiviado a la entrada y salida del sistema cada 14 días por un tiempo de retención de 51 días por dos periodos. El lixiviado que alimento la laguna alcanzó una concentración máxima de DBO₅ de 722 mg L⁻¹ y DQO de 1338 mg L⁻¹. Luego del tratamiento, el lixiviado redujo la DBO₅ a 9 mg L⁻¹ y DQO a 91 mg L⁻¹ para el primer periodo de muestreo y 62 mg L⁻¹ de DBO₅ y 294 mg L⁻¹ de DQO para el segundo periodo, es decir, una eficiencia de remoción en función de DQO fue del 91,17% y 98,24% de DBO₅. Además, la remoción de coliformes fecales fue de 99,99%. Adicionalmente, se examinaron varios parámetros físico-químicos para analizar el aporte a la calidad del lixiviado. Con los datos de concentración de materia orgánica y aforo del lixiviado se determinó los parámetros de diseño del tratamiento biológico anexo al tratamiento primario existente.

PALABRAS CLAVE: botadero controlado; carga orgánica; laguna de estabilización aerobia; coliformes.

ABSTRACT

The objective of the study was to evaluate the efficiency of a pilot aerobic stabilization lagoon, as an alternative for the improvement of the existing primary treatment of leachates produced in a controlled landfill in the Province of Pichincha (Ecuador). The leachate was characterized at the input and output of the system every 14 days with a retention time of 51 days and during two periods of time. The feeding leachate the lagoon reached a maximum concentration of BOD₅ of 722 mg L⁻¹ and COD of 1338 mg L⁻¹. After the treatment, the leachate presented a BOD₅ of 9 mg L⁻¹ and a COD of 91 mg L⁻¹ for the first sampling period; for the second period the values of BOD₅ and COD were 62 mg L⁻¹ and 294 mg L⁻¹, respectively. In other words, the treatment reached a COD removal efficiency of 91.17% and BOD₅ of 98.24%. The elimination of fecal coliforms was 99.99%. Additionally, some physical-chemical parameters were examined to analyze the contribution of the lagoon to the leachate quality. The data of organic matter concentration and leachate flow allowed determining the design parameters for the implementation of a biological treatment.

KEYWORDS: controlled landfill; organic load; aerobic stabilization lagoon; coliforms.

^a Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. Quito, Ecuador. ORCID Pesántes, L.: 0000-0001-7491-8920; ORCID Muñoz, M.: 0000-0003-1457-6492; ORCID Aldás, M.B.: 0000-0002-0191-9647.

^b Autor de correspondencia: lizteffy@hotmail.es

* Este artículo es derivado de la tesis de grado titulado "Estudio piloto para el tratamiento de lixiviados generados en el botadero de San Miguel de los Bancos" de los autores Pesántes, L. y Ruiz, V.

Introducción

Los residuos generalmente son dispuestos en espacios denominados botaderos a cielo abierto o rellenos sanitarios. Ambas estructuras generan subproductos denominados lixiviados, estos desechos líquidos se caracterizan por contener elevadas concentraciones de contaminantes orgánicos e inorgánicos, incluyendo ácidos húmicos, nitrógeno amoniacal y metales pesados, así como sales inorgánicas y una gran variedad de microorganismos, con capacidad de migración hacia el subsuelo y a fuentes de agua de los alrededores (Aguilar et al., 2010; Bautista-Ramírez et al., 2018).

Existen en la actualidad 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), que para ser implementados requieren de la determinación de datos como el volumen y poder contaminante de los lixiviados, las características físicas del lugar y los recursos económicos disponibles (Pellón et al., 2015).

Uno de los tratamientos biológicos más económicos, para disminuir la carga contaminante de lixiviados, por no necesitar equipos mecánicos extras para su funcionamiento, son las lagunas de estabilización aerobias, donde la aireación es natural debido al oxígeno provisto por la atmósfera y primordialmente por la actividad fotosintética de las algas (Vázquez, 2016).

La implementación de una laguna de estabilización aerobia para tratar lixiviados es considerada un método factible, que bajo condiciones de baja profundidad tiene el objetivo de garantizar el óptimo aprovechamiento de la radiación solar para la formación de biomasa y la aireación natural con lo que se evita el uso de energía mecánica extra. Este proceso se lleva a cabo dentro de un tiempo de retención tal, que se garantiza la disminución eficiente de la nocividad del lixiviado en cuanto a la remoción de carga orgánica así como eliminación de patógenos (Vázquez, 2016).

En Ecuador, la Constitución de la República (2008) indica que una de las competencias de los

Gobiernos Autónomos Municipales es la prestación del servicio público para el manejo de desechos sólidos, por lo que es su responsabilidad la gestión adecuada de los desechos desde su generación hasta su disposición final sin dejar de lado la corresponsabilidad de la comunidad generadora de los desechos.

La generación de residuos sólidos ha aumentado principalmente debido al incremento demográfico no planificado (Ecologistas en Acción, 2017) y el Ministerio del Ambiente de Ecuador para el año 2010, creó el Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos con el afán de incentivar y a su vez colaborar con los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD) Municipales para la obtención de rellenos sanitarios que brinden la adecuada disposición de los desechos sin generar daños al ambiente ni a la salud humana (Ministerio del Ambiente Ecuador, 2017).

El botadero controlado del cantón de San Miguel de los Bancos recibe diariamente 5 toneladas (t) de residuos provenientes de la población perteneciente a la cabecera cantonal y sus parroquias, equivalente a 17.573 habitantes (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2010), aunque presenta un tratamiento primario de lixiviados, se identificó que es necesario anexar un tratamiento biológico que permita disminuir las cargas contaminantes de estos efluentes antes de ser vertido al cuerpo hídrico. Los análisis de DQO y DBO₅ llegaron a valores de 1300 y 753 mg L⁻¹, respectivamente.

El objetivo del presente trabajo es determinar mediante un estudio piloto y análisis físico-químicos y micro-biológicos, la mejora de la calidad del lixiviado luego de la laguna de estabilización utilizada como tratamiento biológico.

Materiales y métodos

La cabecera cantonal de San Miguel de Los Bancos se encuentra ubicada a 94 km de Quito en las coordenadas 0°01'23"N y 78°53'31"O a 1100 msnm.

La temperatura promedio anual oscila entre 19,8 y 20,6°C; los meses con la temperatura más alta son marzo, abril y noviembre tomando en cuenta que las variaciones entre el mes más frío y el más cálido es de 1°C. Los valores anuales de precipitación llegan a un promedio de 4217,2 mm. Los meses

de mayor precipitación son enero, febrero, marzo y abril, mientras que los meses de julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre son los meses con menos precipitación (Vega, 2016).

De acuerdo con Vega (2016) el botadero controlado está ubicado a 3,5 km de la cabecera cantonal, en el cual se disponen aproximadamente 5 t d⁻¹ de desechos. Además, utiliza una maquinaria sobre orugas de más de 10 t alcanzando un peso específico de 0,4 t m⁻³. La composición de los residuos es 71,9% de orgánicos, 27,1% reciclables y 1% de residuos contaminantes. No se tiene separación en la fuente ni se ha definido recipientes adecuados para el almacenamiento temporal de los desechos. Cuenta con tres rutas de barrido y un jornalero por cada ruta. Se realiza el barrido de cada ruta cinco veces a la semana. Se emplean seis rutas de recolección y en un sector del cantón existe recolección diferenciada, debido a que se hace el aprovechamiento de orgánicos.

La celda donde se disponen los residuos generados en el cantón tiene un área de 1434,04 m², la cual consta de geomembrana, chimeneas en mal estado, un sistema de conducción de lixiviados y cunetas para aguas lluvias. Se realiza la compactación y cobertura de los desechos con frecuencia semanal.

El sistema de tratamiento de lixiviados está conformado por un tanque de sedimentación que separa por gravedad las partículas, un filtro de gravas con relleno de grava, arcilla y arena y finalmente un tanque de almacenamiento previo a la descarga destinado a un tratamiento biológico. A pesar de la distribución paralela de lixiviados sobre el filtro se presenta taponamiento, principalmente por la falta de mantenimiento.

Laguna de estabilización aerobia piloto

El área correspondió a 3 x 2 m, profundidad 0,30 m y volumen de 1,8 m³. Estas dimensiones fueron tomadas de Muñoz et al. (2006), buscando la penetración de la radiación solar y garantizar el aporte natural de oxígeno hacia el sistema ya que la aireación es por oxígeno atmosférico y fotosíntesis de algas. Asimismo, la acción de los rayos ultravioleta es muy efectiva en la mortalidad de los organismos patógenos. Se recubrió con una geomembrana y

después del llenado con lixiviado se dejó una semana para formar un inóculo de micro alga.

Se asumió una DBO₅ teórica de 5000 mg L⁻¹ ya que Tchobanoglous et al. (1994) describe para un vertedero que no posee un tiempo de operación mayor a dos años como es el caso del sitio de estudio, la DBO₅ fluctúa en un rango de 2000 – 30000 mg L⁻¹. Además, en base a Valencia (2009) el porcentaje de remoción de la DBO₅ debido a la existencia del tratamiento primario convencional es de 70%, por lo que se estimó el valor de DBO₅ teórica removida y con ello se calculó la concentración de materia orgánica obteniendo un resultado de 5 kg m⁻³ DBO₅ (Anexo 1, <https://revistas.unal.edu.co/public/journals/23/public/74908/ane1.pdf>).

La carga superficial se determinó en base a la ecuación propuesta por McGarry y Pescod (1970), donde relaciona la carga orgánica superficial máxima que puede aplicarse en la laguna con la temperatura media, y el método de Mara (1976), que aplica un factor de seguridad de 1,5 a la ecuación de McGarry y Pescod (1970). Se aplicó la Ecuación (1) que relaciona la carga superficial máxima que puede aplicarse a una laguna con la temperatura media:

$$L_{smax} = (20 \times Ta) - 120 \quad (1)$$

donde *Ta* es igual a 20,6°C descrita en Climate Data (2016) según clasificación de Köppen y Geiger. Se encontró una carga superficial diaria de 292 kg ha⁻¹ DBO₅ (Anexo 1).

El caudal se calculó en función de la carga superficial, el área de la laguna de estabilización y la concentración de materia orgánica (Ecuación 2), obteniendo un caudal de 24,3 mL min⁻¹ con el que se alimentó al sistema piloto por 4 meses:

$$Q = \frac{L_s \times A}{CO} \quad (2)$$

donde *Q* es el caudal de lixiviado L d⁻¹, *L_s* la carga superficial diaria en kg ha⁻¹ de DBO₅, *A* el área de la laguna de estabilización en ha y *CO* la concentración de materia orgánica en kg m⁻³ de DBO₅ (Anexo 1).

El tiempo de retención hidráulico fue de 51,36 d⁻¹ determinado mediante la Ecuación (3)

$$t = \frac{V}{Q} \quad (3)$$

donde t es el tiempo de retención hidráulico en días, V el volumen de la laguna en m^3 y Q el caudal de lixiviado ($m^3 d^{-1}$) (Anexo 1).

Muestreo y parámetros evaluados

El muestreo se efectuó desde el 28 de marzo hasta el 18 de julio del 2017, donde marzo, abril y mayo corresponden a los meses más lluviosos mientras que junio y julio a meses con precipitaciones menores (Vega, 2016). Debido a que el tiempo de retención es de 51 d, se efectuó la experimentación por duplicado, el primer periodo corresponde desde el 28 de marzo al 23 de mayo (Periodo 1) y el segundo periodo desde el 23 de mayo hasta el 18 de julio (Periodo 2).

Las muestras se obtuvieron cada 14 d, a las 9:00 am, obteniendo 8 muestreos del lixiviado tanto a la entrada y salida de la laguna de estabilización. La Tabla 1 describe los parámetros físicos, químicos y micro-biológicos analizados.

Tabla 1. Parámetros evaluados

| | Parámetro | Método |
|------------------|-------------------------------|----------------------------|
| Físicos | Sólidos totales | APHA 2540 B |
| | Sólidos totales suspendidos | APHA 2540 D |
| Químicos | Demanda química de oxígeno | PEE/CICAM/06 (APHA 5210B) |
| | Nitrógeno total Kjeldahl | Nessler APHA 4500*N BAPG |
| | Fósforo total | APHA 4500*P C* Colorímetro |
| | Demanda bioquímica de oxígeno | PEE/CICAM/06 (APHA 5220B) |
| Micro-Biológicos | Coliformes fecales | APHA 9222 C |

Fuente: Eaton (2005).

Aforo de lixiviados

Se realizó un aforo de lixiviados durante la toma de muestras; se midió el caudal con 7 repeticiones para obtener el caudal promedio durante los meses de experimentación. Durante los meses de marzo y abril no fue posible realizar la medición debido al colapso de la planta de tratamiento primaria por las fuertes lluvias. Además, se realizó un cálculo teórico

del caudal de lixiviados a partir de la humedad de los residuos y la precipitación media anual en la zona de estudio. Se utilizó el método suizo descrito por Nicola (2017) a través de la Ecuación (4):

$$Q_{1m} = P \times A \times K \quad (4)$$

donde Q_{1m} es el caudal medio de lixiviado generado ($m^3 mes^{-1}$), la precipitación máxima mensual ($mm mes^{-1}$), el área requerida para el relleno (m^2) y K el coeficiente del grado de compactación de la basura. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Caudal teórico de lixiviados para el botadero controlado (Ecuador)

| Mes | Precipitación (mm) | Área (m^2) | K | Caudal (Ls^{-1}) |
|------------|--------------------|----------------|------|----------------------|
| Enero | 520,50 | 1 434,04 | 0,25 | 0,67 |
| Febrero | 611,20 | 1 434,04 | 0,25 | 0,87 |
| Marzo | 657,10 | 1 434,04 | 0,25 | 0,85 |
| Abril | 672,00 | 1 434,04 | 0,25 | 0,90 |
| Mayo | 440,00 | 1 434,04 | 0,25 | 0,57 |
| Junio | 202,50 | 1 434,04 | 0,25 | 0,27 |
| Julio | 157,10 | 1 434,04 | 0,25 | 0,20 |
| Agosto | 114,50 | 1 434,04 | 0,25 | 0,14 |
| Septiembre | 153,50 | 1 434,04 | 0,25 | 0,20 |
| Octubre | 172,80 | 1 434,04 | 0,25 | 0,22 |
| Noviembre | 183,80 | 1 434,04 | 0,25 | 0,24 |
| Diciembre | 332,20 | 1 434,04 | 0,25 | 0,43 |

K, coeficiente de compactación de basura

Fuente: datos propios

Resultados y discusión

El caudal de lixiviados tiene una alta variación debido a la transición de la temporada de lluvias y sequía (Tabla 3). Además, se debe considerar que la operación de tratamiento primario de lixiviados tiene complicaciones constantemente, por ejemplo, el taponamiento del filtro de gravas, lo cual ha evitado el paso de todo el caudal en ciertas ocasiones.

La Tabla 4 presenta la eficiencia de remoción de la materia orgánica a partir de las mediciones de la DQO que alcanzó el 91,17% para el primer periodo de evaluación y 44,85% para el segundo periodo. La diferencia observada en el segundo periodo de evaluación se atribuye a una reducción de la precipitación (época seca). Además, se realizó el mantenimiento de las infraestructuras del tratamiento

primario en el mes de mayo. Con ese rango de eficiencia se puede afirmar que hay reducción significativa de la concentración de materia orgánica.

Tabla 3. Caudal de lixiviados del botadero controlado (Ecuador)

| Mes de experimentación | Datos procesados caudal (L s ⁻¹) | Caudal promedio (L s ⁻¹) |
|------------------------|--|--------------------------------------|
| Mayo | 0,62 | 0,50 ± 0,18 |
| | 0,37 | |
| Junio | 0,11 | 0,15 ± 0,06 |
| | 0,19 | |
| Julio | 0,14 | 0,10 ± 0,06 |
| | 0,059 | |

Fuente: datos propios

Para el segundo periodo se realizó además un análisis de DQO soluble para identificar la razón del aumento en el valor de DQO del lixiviado de

salida en el segundo tiempo de retención, obteniéndose una DQO soluble de 56 mg L⁻¹ con lo que se determina un funcionamiento adecuado de la laguna, pero al no haber realizado el mantenimiento de la laguna piloto durante los 4 meses de experimentación se dio un incremento de algas que contribuye al incremento de materia orgánica al sistema. Según Pellón et al. (2015), el tratamiento a base de lagunas alcanzó una eficiencia de remoción de DQO del 60%, es decir, el sistema piloto que ha sido objeto del presente proyecto removió mayor cantidad de materia orgánica en base a DQO.

Con respecto a la demanda química de oxígeno (DBO₅) después de implementar la laguna de estabilización se alcanzó una eficiencia del 98,24% para el primer periodo y del 72% para el segundo periodo (Tabla 5). Con esto, la implementación de la laguna de estabilización como anexo al actual tratamiento primario se genera una remoción de carga orgánica considerable. Es importante tomar en cuenta que

Tabla 4. Remoción de la carga orgánica en función de la demanda química de oxígeno (mg L⁻¹) por laguna de estabilización (Ecuador)

| Periodo de evaluación | Muestreo (d) | Lixiviado de entrada | Promedio lixiviado entrada | Lixiviado de salida | Promedio lixiviado salida | Lixiviado tratado en 51 d | Eficiencia % |
|-------------------------|--------------|----------------------|----------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|
| Periodo 1: marzo - mayo | 0 | 985 | E_o 1030,75 ± 309,56 | | 85,67 ± 18,23 | E 91 | 91,17 |
| | 14 | 1338 | | 66 | | | |
| | 28 | 1180 | | 89 | | | |
| | 42 | 620 | | 102 | | | |
| Periodo 2: mayo - julio | 0 | 381 | E_o 533,00 ± 435,00 | | 164,67 ± 17,67 | E 294 | 44,85 |
| | 14 | 213 | | 185 | | | |
| | 28 | 1153 | | 156 | | | |
| | 42 | 385 | | 153 | | | |

Fuente: datos propios

Tabla 5. Remoción de carga orgánica en función de la demanda bioquímica de oxígeno (mg L⁻¹) por laguna de estabilización (Ecuador)

| Periodo de evaluación | Muestreo (d) | Lixiviado de entrada | Promedio lixiviado entrada | Lixiviado de salida | Promedio lixiviado salida | Lixiviado tratado en 51 d | Eficiencia % |
|-------------------------|--------------|----------------------|----------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|
| Periodo 1: marzo - mayo | 0 | 483 | E_o 510,50 ± 214,43 | | 8 ± 4,58 | E 9 | 98,24 |
| | 14 | 722 | | 4 | | | |
| | 28 | 613 | | 13 | | | |
| | 42 | 224 | | 7 | | | |
| Periodo 2: mayo - julio | 0 | 188 | E_o 221,50 ± 142,90 | | 66,67 ± 16,17 | E 62 | 72 |
| | 14 | 142 | | 84 | | | |
| | 28 | 432 | | 52 | | | |
| | 42 | 124 | | 64 | | | |

Fuente: datos propios

para el periodo de muestreo mayo-julio (periodo 2) los resultados de lixiviado de entrada disminuyeron puesto que se realizó el mantenimiento respectivo del filtro de gravas que se encontraba colapsado por las fuertes lluvias. Según el estudio realizado por Pellón et al. (2015), los lixiviados luego de pasar por la laguna de estabilización presentan una eficiencia de remoción de materia orgánica en función de la DBO₅ del 75%, es decir que el tratamiento utilizado para el presente proyecto funcionó eficientemente para los dos periodos de muestreo.

Con respecto a coliformes fecales se encontró una alta eficiencia de remoción que alcanzó el 99,99% para cada periodo evaluado. La eliminación de coliformes se puede dar por la presencia de cloro en cualquiera de sus presentaciones, luz ultravioleta, coagulación, floculación, sedimentación y ozono de acuerdo con Fumigadora Continente (2015). Con el tratamiento de la laguna de estabilización aerobia se

ha obtenido dicha remoción debido a la baja profundidad de la laguna, lo cual garantiza la penetración de rayos solares y, además, por el extenso tiempo de retención hidráulica (51 d) que favorece al proceso de sedimentación.

Cumplimiento de la normativa ambiental vigente

Los resultados del periodo 1 se compararon con la normativa vigente de descarga a un cuerpo de agua del Anexo 1 del Acuerdo Ministerial 061/2015, reforma al Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente Ecuador (Tabla 7), donde se puede evidenciar que luego del tratamiento se consigue una mejora y cumplimiento de normativa para todos los parámetros analizados durante el primer periodo de muestreo.

Tabla 6. Eficiencia de remoción de patógenos en función de coliformes fecales (NMP/100 mL) por laguna de estabilización (Ecuador)

| Periodo de evaluación | Muestreo (d) | Lixiviado de entrada | Promedio lixiviado entrada | Lixiviado de salida | Promedio lixiviado salida | Lixiviado tratado en 51 d | Eficiencia % |
|----------------------------|--------------|----------------------|--|---------------------|--|---------------------------|--------------|
| Periodo 1: marzo - mayo | 0 | $2,40 \cdot 10^8$ | E_o $1,98 \cdot 10^8 \pm 1,99 \cdot 10^8$ | | $1,83 \cdot 10^3 \pm$ $2,40 \cdot 10^3$ | E $9,30 \cdot 10^2$ | 99,99 |
| | 14 | $7,50 \cdot 10^7$ | | $4,30 \cdot 10^2$ | | | |
| | 28 | $4,60 \cdot 10^8$ | | $4,60 \cdot 10^2$ | | | |
| | 42 | $1,50 \cdot 10^7$ | | $4,60 \cdot 10^3$ | | | |
| Periodo 2: mayo - julio | 0 | $4,30 \cdot 10^7$ | E_o $1,87 \cdot 10^7 \pm 1,85 \cdot 10^7$ | | $1,83 \cdot 10^3 \pm$ $2,40 \cdot 10^3$ | E $9,10 \cdot 10^1$ | 99,99 |
| | 14 | $2,30 \cdot 10^7$ | | $4,30 \cdot 10^2$ | | | |
| | 28 | $4,30 \cdot 10^6$ | | $4,60 \cdot 10^2$ | | | |
| | 42 | $4,30 \cdot 10^6$ | | $4,60 \cdot 10^3$ | | | |

Fuente: datos propios

Tabla 7. Parámetros (mg L^{-1}) de lixiviado tratado con laguna de estabilización aerobia para marzo-mayo 2017 (Ecuador)

| Parámetros | DQO | DBO ₅ | Nitrógeno total | Fósforo total | Sólidos suspendidos totales | Sólidos totales |
|--|----------------------|---------------------|--------------------|-----------------|-----------------------------|----------------------|
| Normativa | 250,00 | 100,00 | 15,00 | 10,00 | 100,00 | 1600,00 |
| Lixiviado promedio de entrada ($n=4$)* | $1030,75 \pm 309,56$ | $510,50 \pm 214,54$ | $101,25 \pm 18,62$ | $5,79 \pm 0,49$ | $434,00 \pm 89,49$ | $1709,50 \pm 120,72$ |
| Lixiviado promedio de salida ($n=4$)* | $85,67 \pm 18,23$ | $8,25 \pm 4,58$ | $8,58 \pm 3,66$ | $0,45 \pm 0,16$ | $79,00 \pm 7,00$ | $292,00 \pm 106,23$ |
| Lixiviado tratado a los 51 d | 91,00 | 9,00 | 3,00 | 2,60 | 60,00 | 158,00 |

* Mediciones cada 14 d.

Se tiene entonces que la implementación de una laguna de estabilización aerobia para los lixiviados generados en el botadero controlado como anexo al tratamiento primario existente garantiza una descarga del lixiviado al cuerpo hídrico como una adecuada gestión de los lixiviados.

De igual manera, en la Tabla 8 se observan los resultados obtenidos durante el segundo periodo de evaluación. Los parámetros DQO, nitrógeno y sólidos suspendidos no están bajo norma debido a que hubo aporte extra de materia orgánica por el aumento considerable de algas, puesto que no se realizó un mantenimiento de la laguna de estabilización aerobia cuando se inició el muestreo del segundo periodo. Sin embargo, siempre y cuando se realice el mantenimiento de la laguna de estabilización para cada inicio de tiempo de retención, se garantiza la obtención de resultados que permitan la descarga directa al cuerpo hídrico correspondiente.

Los resultados obtenidos comparados con otros métodos de tratamiento de lixiviados (fitoremediación y laguna algal de alta tasa) (Tabla 9), se evidencia que la remoción de materia orgánica al igual

que la remoción de organismos patógenos ha sido más eficiente con la laguna de estabilización aerobia del presente estudio. De acuerdo con Guevara et al. (2014), las plantas usadas en la fitoremediación han utilizado la carga contaminante para su desarrollo, disminuyendo así la concentración de materia orgánica en el lixiviado tratado, mientras la laguna algal de alta tasa es un sistema natural con colonias bacterianas que van captando los contaminantes mientras son retenidos en el filtro. Sin embargo, los resultados plasmados indican que la utilización de la laguna de estabilización aerobia como tratamiento terciario es eficiente para el tratamiento de lixiviados del cantón cumpliendo con la normativa ambiental vigente.

Implementación de la laguna de estabilización aerobia a escala del botadero controlado

Dadas las bondades de implementar la laguna de estabilización aerobia como un tratamiento de afinamiento al actual pre-tratamiento y la necesidad de implementar un tratamiento adicional puesto que el actual lixiviado descargado al cuerpo hídrico

Tabla 8. Parámetros (mg L^{-1}) de lixiviado tratado con laguna de estabilización aerobia para mayo-junio 2017 (Ecuador)

| Parámetros | DQO | DBO ₅ | Nitrógeno total | Fósforo total | Sólidos suspendidos totales | Sólidos totales |
|--|-----------------|------------------|-----------------|---------------|-----------------------------|------------------|
| Normativa | 250,00 | 100,00 | 15,00 | 10,00 | 100,00 | 1600,00 |
| Lixiviado promedio de entrada ($n=4$)* | 533,00 ± 421,03 | 221,5 ± 142,90 | 76,88 ± 52,72 | 4,70 ± 1,50 | 121,75 ± 45,07 | 1142,50 ± 271,59 |
| Lixiviado promedio de salida ($n=4$)* | 131,33 ± 17,67 | 53,33 ± 16,17 | 4,67 ± 2,27 | 1,13 ± 0,52 | 118,00 ± 2,00 | 254,00 ± 16,00 |
| Lixiviado tratado a los 51 d | 294,00 | 62,00 | 25,50 | 0,29 | 155,00 | 514,00 |

* Mediciones cada 14 d.

Tabla 9. Comparación en el tratamiento de lixiviados con otros métodos

| Parámetro | Porcentaje de remoción | | |
|--------------------|--|--|--|
| | Laguna aerobia (San Miguel de los Bancos, Ecuador) | *Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (Quito, Ecuador) | **Laguna algal de alta tasa (Cali, Colombia) |
| DBO | 72 – 98 % | 73,5 % | 31,53 % |
| DQO ₅ | 45 – 91 % | 40,4 % | 71,00 % |
| Coliformes fecales | 99 % | 44,4 % | - |

*Fuente: Guevara et al. (2014). **Fuente: Cerón et al. (2015)

no cumple con la normativa ecuatoriana de descarga a un cuerpo de agua dulce, se propone utilizar los parámetros de diseño identificados para la construcción a escala requerida al botadero.

Se propone utilizar el caudal del mes de mayo correspondiente al mes con mayor precipitación de la zona de estudio, $0,62 \text{ L s}^{-1}$, valor muy cercano al caudal teórico ($0,57 \text{ L s}^{-1}$), por esta razón se tomó como caudal medio para la propuesta.

A partir de la ecuación (2) y los datos de la tabla 10 se puede determinar el valor de la carga superficial y el área con el que operaría la laguna de estabilización aerobia a escala real.

Tabla 10. Parámetros para el diseño de la laguna de estabilización a escala real.

| Parámetro | Unidad | Valor |
|---------------------------|----------------------------------|-------|
| Caudal | $\text{m}^3 \text{ d}^{-1}$ | 53,57 |
| Tiempo de retención | d | 51 |
| Concentración M. Orgánica | $\text{kg m}^{-3} \text{ DBO}_5$ | 0,72 |

El área de la laguna de estabilización aerobia para un tiempo de retención de 51 d corresponde a 0,91 ha lo cual no sería inconveniente para el municipio puesto que cuentan actualmente con un terreno de aproximadamente 29 ha para disposición final de los residuos sólidos generados, además, la carga orgánica que va a alimentar a la laguna será pequeña (DBO_5 diaria de $42,39 \text{ kg ha}^{-1}$) y consecuentemente los indicadores de contaminación físicos, químicos y biológicos luego del tratamiento estarán acorde a la normativa vigente y serán descargados al cuerpo hídrico bajo la norma establecida en el Acuerdo Ministerial 061/2015.

Conclusiones

Los lixiviados generados en el botadero controlado en estudio contienen una concentración de 2000 mg L^{-1} de DQO, sin embargo, una vez anexado el tratamiento piloto para los estudios pertinentes se corroboró una eficiencia superior al 90% en remoción de materia orgánica en función de la DQO.

Se demostró que todos los parámetros analizados luego del tratamiento biológico presentan una

mejora en la calidad del lixiviado, tanto la DBO_5 y DQO se encuentran bajo la normativa ambiental vigente, por lo que se afirma que el efluente es apto para descarga a un cuerpo hídrico de agua dulce una vez afinado mediante la laguna de estabilización aerobia.

Se obtuvo una remoción del 99,99% de organismos patógenos, lo cual pudo estar relacionado a la profundidad de la laguna de 0,30 m, la cual fue escogida en base a un estudio anterior, el cual garantiza que a menor profundidad de una laguna, la penetración de los rayos ultravioletas tiene una acción muy efectiva en la mortalidad de patógenos.

Conflicto de intereses. El manuscrito fue preparado y revisado por los autores, quienes declaran no tener algún conflicto de interés que ponga en riesgo la validez de los resultados aquí presentados.

Contribuciones de autoría. Pesantes, L. y Ruiz, V., contribuyeron de manera simultánea en aspectos como muestreo, mediciones y análisis de resultados, y en conjunto con Muñoz, M. y Aldás, M.B., se realizó el análisis, interpretación y redacción del texto final.

Bibliografía

- Aguilar, H., Ramos, J., Lara, C., Hdez, R., Valencia, M., 2010. Manejo de biogás y lixiviados en rellenos sanitarios del centro de México, un panorama general. *Lacandonia* 4, 117-130.
- Bautista-Ramírez, J., Gutiérrez-Hernández, R., Nájera-Aguilar, H., Martínez-Salinas, R., Vera-Toledo, P., Araiza-Aguilar, J., Méndez-Novelo, R., Rojas-Valencia, M., 2018. El biorreactor llenado de la edad de refrigeración (ARFB), como un tratamiento para el escalaje de relleno. *Rev. Mex. Ing. Quim.* 17, 561-571. DOI: 10.24275/uam/izt/dcbi/revmexingquim/2018v17n2/Bautista
- Cerón, V., 2015. Aplicación de un sistema de laguna algal de alta tasa para el tratamiento de lixiviados. *Ing. Desarro.* 33, 98-115. DOI: 10.14482/inde.33.1.5318
- Climate Data, 2016. Descripción climática de San Miguel de los Bancos. Disponible en: <https://es.climate-data.org/location/25468/0>; consultado: abril de 2017.
- Constitución de la República del Ecuador, 2008. Quito.
- Eaton, A., 2005. Standard methods for the examination of water and waste water. American Public Health Association (APHA), Washington DC.
- Ecologistas en Acción, 2017. La problemática de la gestión de residuos se agravará con la llegada del turismo estival. Área de Acción: Residuos. Disponible en:

- <https://www.ecologistasenaccion.org/34744/>; consultado: diciembre de 2017.
- Fumigadora Continente, 2015. Las bacterias coliformes. Publicación marzo 2016. Disponible en: <http://www.fumigacontinente.com.ar/las-bacterias-coliformes/>; consultado mayo de 2017.
- Guevara, A., Guanoluisa, L., De la Torre, E., 2014. Diseño de sistemas de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario El Inga mediante electrocoagulación y fitoremediación. *Rev. EPN* 34, 1-8.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2010. Resultados del Censo 2010 de Población y Vivienda en el Ecuador. Fascículo provincial Pichincha. Disponible en: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/descargas/Manu-lateral/Resultados-provinciales/pichincha.pdf>; consultado: junio de 2017.
- Mara, D., 1976. Sewage treatment in hot climates. John Wiley & Sons, New York. DOI: 10.1002/iroh.19780630410
- McGarry, M., Pescod, M., 1970. Waste stabilization pond criterion for Tropical Asia. En: Proc. 2nd International Symposium on Waste Treatment Lagoons. University of Kansas, Lawrence, KS. pp. 114-132.
- Ministerio del Ambiente de Ecuador, 2015. Acuerdo Ministerial 061, reforma del libro VI del texto unificado de legislación secundaria. Edición Especial 270. Quito.
- Ministerio del Ambiente de Ecuador, 2017. Ministerio del Ambiente promueve adecuada gestión de residuos en el Metro de Quito. Disponible en: <http://www.ambiente.gob.ec/ministerio-del-ambiente-promueve-adecuada-gestion-de-residuos-en-el-metro-de-quito/>; consultado: julio de 2017.
- Muñoz, M., Cabrera, R., Villacrés, D., 2006. Modelo cinético para el diseño de lagunas de maduración de baja profundidad. En: XXX Congreso de la Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental AI-DIS. Punta del Este, Uruguay.
- Nicola, J., 2017. Diseño del sistema de recogida, tratamiento y eliminación de residuos sólidos para poblaciones de la zona Alta del Cantón Ambato, República del Ecuador. Tesis de maestría. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Pellón, A., López, M., Espinosa, M., González, O., 2015. Propuesta para tratamiento de lixiviados en un vertedero de residuos sólidos urbanos. *Ing. Hidrául. Ambient.* 36(2), 3-16.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S., 1994. Gestión integral de residuos sólidos. Vol. I. McGraw-Hill, Madrid.
- Valencia, G., 2009. Tratamientos primarios. Universidad del Valle, Cali, Colombia.
- Vázquez, F., 2016. Lagunas de estabilización. *Ext. Innov. Transf. Tecnol.* 3. DOI: 10.30972/eitt.303004
- Vega, R., 2016. Estudios de factibilidad y diseños definitivos para la gestión integral de residuos sólidos. Informe Técnico. GAD Municipal San Miguel de los Bancos. San Miguel de los Bancos, Ecuador.