



Análisis y dimensionamiento de un sistema de tratamiento para lixiviados generados en el botadero del cantón Francisco de Orellana

Analysis and sizing of a treatment system for leachate generated in the dump of the Francisco de Orellana canton

Análise e dimensionamento de um sistema de tratamento de chorume gerado na lixeira do cantão Francisco de Orellana

José Gerardo León-Chimbolema ¹
gerardo.leon@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-9202-8542>

Correspondencia: gerardo.leon@epoch.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

* **Recibido:** 19 de mayo de 2024 * **Aceptado:** 11 de junio de 2024 * **Publicado:** 18 de julio de 2024

- I. Doctor en Química, Máster en Protección Ambiental, Docente Investigador, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

Resumen

El estudio presenta el diseño de un sistema de tratamiento para los lixiviados generados en el botadero del cantón Francisco de Orellana, con el fin de cumplir con la normativa ambiental vigente. El objetivo es reducir los contaminantes presentes en los lixiviados para evitar la contaminación del suelo y cuerpos de agua cercanos. La metodología incluyó un diagnóstico zonal del botadero y la selección del método suizo para la cuantificación del caudal de lixiviados, obteniendo un caudal de 1.73 L/s. Se realizó la caracterización físico-química y biológica de los lixiviados, identificando parámetros fuera de los límites permitidos como DBO5, DQO, coliformes fecales y totales, amonio, nitrógeno total y sólidos totales. El sistema propuesto consta de piscinas de almacenamiento, una canaleta Parshall, floculadores para la coagulación-floculación con sulfato de aluminio, sedimentadores convencionales, lechos de secado de lodos y humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical con pasto alemán. Los resultados de las pruebas de tratabilidad demostraron una alta eficiencia en la remoción de contaminantes, alcanzando porcentajes significativos para DBO5, DQO, nitrógeno total, amonio y coliformes. Se concluyó que el sistema es fiable y viable, logrando que los parámetros de los lixiviados tratados se encuentren dentro de los límites máximos permisibles, mejorando así la calidad ambiental y de vida en el cantón.

Palabras clave: Tratamiento de lixiviados; Botadero; Coagulación-floculación; Humedal artificial.

Abstract

The study presents the design of a treatment system for leachate generated in the dumpsite of the Francisco de Orellana canton, in order to comply with current environmental regulations. The objective is to reduce the contaminants present in the leachate to avoid contamination of the soil and nearby water bodies. The methodology included a zonal diagnosis of the dump and the selection of the Swiss method for the quantification of the leachate flow, obtaining a flow of 1.73 L/s. The physical-chemical and biological characterization of the leachates was carried out, identifying parameters outside the permitted limits such as BOD5, COD, fecal and total coliforms, ammonium, total nitrogen and total solids. The proposed system consists of storage ponds, a Parshall flume, flocculators for coagulation-flocculation with aluminum sulfate, conventional settlers, sludge drying beds, and vertical subsurface flow artificial wetlands with German grass. The results of the treatability tests demonstrated high efficiency in the removal of contaminants,

reaching significant percentages for BOD5, COD, total nitrogen, ammonium and coliforms. It was concluded that the system is reliable and viable, ensuring that the parameters of the treated leachate are within the maximum permissible limits, thus improving the environmental quality and life in the canton.

Keywords: Leachate treatment; Dump; Coagulation-flocculation; Artificial wetland.

Resumo

O estudo apresenta o desenho de um sistema de tratamento de lixiviados gerados na lixeira do cantão Francisco de Orellana, para cumprir as normas ambientais em vigor. O objetivo é reduzir os contaminantes presentes no lixiviado para evitar a contaminação do solo e dos corpos de água próximos. A metodologia incluiu um diagnóstico zonal da lixeira e a seleção do método suíço para a quantificação do caudal de lixiviados, obtendo-se um caudal de 1,73 L/s. Foi realizada a caracterização físico-química e biológica dos lixiviados, identificando parâmetros fora dos limites permitidos como a DBO5, DQO, coliformes fecais e totais, amónio, azoto total e sólidos totais. O sistema proposto é constituído por lagoas de armazenamento, calha Parshall, floculadores para coagulação-floculação com sulfato de alumínio, decantadores convencionais, leitos de secagem de lamas e pântanos artificiais de fluxo vertical subterrâneo com relva alemã. Os resultados dos testes de tratabilidade demonstraram uma elevada eficiência na remoção de contaminantes, atingindo percentagens significativas para a DBO5, DQO, azoto total, amónio e coliformes. Concluiu-se que o sistema é fiável e viável, garantindo que os parâmetros do lixiviado tratado estão dentro dos limites máximos permitidos, melhorando assim a qualidade ambiental e a vida no cantão.

Palavras-chave: Tratamento de lixiviados; Deitar fora; Coagulação-floculação; Zona húmida artificial.

Introducción

En la mayoría de las grandes ciudades, el crecimiento demográfico acelerado ha incrementado significativamente la demanda de servicios de limpieza y la generación de grandes cantidades de residuos sólidos. La disposición final de estos residuos es una de las principales problemáticas ambientales que enfrentan las sociedades modernas. El cantón Francisco de Orellana, ubicado en la región amazónica ecuatoriana, dispone sus residuos en un vertedero controlado. Este botadero,

en funcionamiento por 19 años, carece de un sistema adecuado de recolección y tratamiento de lixiviados, lo que ha generado preocupaciones ambientales por la posible contaminación de suelos y cuerpos de agua cercanos.

La gestión inapropiada de residuos sólidos puede generar lixiviados, que son líquidos resultantes de la percolación a través de los residuos, extrayendo materiales disueltos o en suspensión, y es función de múltiples factores como la composición de la basura, la interacción del lixiviado con el medio ambiente, la edad y la operación del relleno sanitario (Contreras y Gelvez, 2006). Estos lixiviados contienen altas concentraciones de contaminantes orgánicos e inorgánicos, lo que representa un riesgo significativo para el medio ambiente y la salud pública (Chávez, 2011). En el caso del cantón Francisco de Orellana, los lixiviados generados presentan parámetros fuera de los límites máximos permisibles, incluyendo DBO5, DQO, coliformes fecales y totales, amonio, nitrógeno total y sólidos totales.

El tratamiento de lixiviados es crucial para minimizar el impacto ambiental y proteger la salud pública. En este contexto, el diseño de un sistema de tratamiento eficiente es fundamental para garantizar que los lixiviados cumplan con las normativas ambientales vigentes. Según el Ministerio del Ambiente de Ecuador (MAE, 2015), el 80% de los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD's) dispone sus residuos en botaderos a cielo abierto, quebradas y orillas de cuerpos de agua, y solo el 20% los dispone en rellenos sanitarios. Esto demuestra la necesidad urgente de mejorar la gestión de residuos sólidos y el tratamiento de lixiviados en el país.

Para abordar esta problemática, se llevó a cabo un diagnóstico zonal del botadero y se seleccionó el método suizo para la cuantificación del caudal de lixiviados, obteniendo un caudal de 1.73 L/s. La caracterización físico-química y biológica de los lixiviados identificó parámetros que exceden los límites permitidos, como DBO5, DQO, coliformes fecales y totales, amonio, nitrógeno total y sólidos totales.

El sistema propuesto consta de varios componentes esenciales para el tratamiento efectivo de los lixiviados. Estos incluyen piscinas de almacenamiento, una canaleta Parshall, floculadores para la coagulación-floculación con sulfato de aluminio, sedimentadores convencionales, lechos de secado de lodos y humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical utilizando pasto alemán (*Echinochloa polystachya*). Cada uno de estos componentes desempeña un papel crucial en la reducción de los contaminantes presentes en los lixiviados.

Las piscinas de almacenamiento permiten la retención temporal de los lixiviados, facilitando su manejo y tratamiento posterior. La canaleta Parshall se utiliza para medir el caudal de los lixiviados y para la adición de coagulantes en la etapa de coagulación-floculación. Este proceso es fundamental para la remoción de sólidos suspendidos y la reducción de la turbidez y el color de los lixiviados (Ramírez et al., 2010). Los floculadores ayudan a la aglomeración de partículas, mejorando su sedimentación en los tanques de sedimentación convencionales.

Los lechos de secado de lodos son esenciales para la gestión de los residuos sólidos resultantes del proceso de tratamiento. Estos lechos permiten la deshidratación de los lodos, facilitando su disposición final o reutilización. Los humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical utilizan pasto alemán para mejorar la calidad del agua tratada mediante procesos biológicos y fisicoquímicos. Estos humedales son altamente eficientes en la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos, y su implementación es viable en términos económicos y ambientales.

La gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) es una de las principales problemáticas ambientales que enfrentan las sociedades modernas debido al acelerado crecimiento demográfico y la urbanización. La disposición final de estos residuos, sin un tratamiento adecuado, puede generar lixiviados que contienen altas concentraciones de contaminantes orgánicos e inorgánicos, lo que representa un riesgo significativo para el medio ambiente y la salud pública (Chávez, 2011). Los lixiviados son líquidos que se filtran a través de los residuos sólidos y que extraen materiales disueltos o en suspensión, siendo función de múltiples factores como la composición de la basura, la interacción del lixiviado con el medio ambiente, la edad y la operación del relleno sanitario (Contreras y Gelvez, 2006).

En Ecuador, la mayoría de los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD's) disponen sus residuos en botaderos a cielo abierto, quebradas y orillas de cuerpos de agua, con solo un pequeño porcentaje utilizando rellenos sanitarios adecuados (Ministerio del Ambiente de Ecuador, 2015). Esta situación es especialmente crítica en el cantón Francisco de Orellana, donde los lixiviados generados en el botadero no reciben un tratamiento adecuado, lo que ha generado preocupaciones ambientales significativas.

El método suizo es uno de los métodos utilizados para cuantificar el caudal de lixiviados. Este método considera factores como la precipitación pluvial, la escorrentía superficial, la evapotranspiración, la humedad natural de los residuos sólidos, el grado de compactación y la capacidad de campo del suelo y los residuos para retener humedad (Jaramillo, 2002). En este

contexto, se determinó un caudal de lixiviados de 1.73 L/s en el botadero del cantón Francisco de Orellana.

La caracterización físico-química y biológica de los lixiviados es fundamental para identificar los parámetros que exceden los límites máximos permisibles. Los principales contaminantes encontrados en los lixiviados del cantón Francisco de Orellana incluyen DBO5, DQO, coliformes fecales y totales, amonio, nitrógeno total y sólidos totales (Fajardo, 2007). Estos parámetros son críticos porque pueden causar daños significativos al medio ambiente y a la salud humana si no se tratan adecuadamente (Salazar y Saavedra, 2009).

Los tratamientos de lixiviados pueden clasificarse en biológicos y fisicoquímicos. Los tratamientos biológicos son eficientes para remover materia orgánica disuelta, especialmente en lixiviados jóvenes con alta carga contaminante de ácidos volátiles (Martínez-López et al., 2014). Los tratamientos fisicoquímicos, como la coagulación-floculación, la adsorción y la evaporación, son utilizados para tratar lixiviados con bajas relaciones DBO5/DQO, mejorando la calidad del agua tratada antes de su disposición final (Ruiz, 2006; Linares-Hernández et al., 2011).

La coagulación-floculación es un proceso clave en el tratamiento de lixiviados, donde se utiliza sulfato de aluminio como coagulante para remover sólidos suspendidos y reducir la turbidez y el color de los lixiviados (Ramírez et al., 2010). Este proceso, combinado con la sedimentación convencional, permite la separación efectiva de sólidos sedimentables (Espadas et al., 2007).

Los humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical con plantas como el pasto alemán (*Echinochloa polystachya*) han demostrado ser altamente efectivos en la remoción de nutrientes y sólidos suspendidos, debido a su capacidad para absorber y degradar contaminantes (Martínez-López et al., 2014). Estos sistemas integran procesos biológicos y fisicoquímicos, proporcionando una solución sostenible y eficaz para el tratamiento de lixiviados.

Bajo este contexto, el objetivo principal de este estudio es diseñar un sistema de tratamiento para los lixiviados generados en el botadero del cantón Francisco de Orellana, con el fin de cumplir con la normativa ambiental vigente y mejorar la calidad de vida de la población local.

Metodología

El estudio se llevó a cabo utilizando una metodología estructurada en varias etapas para garantizar un análisis exhaustivo y un diseño adecuado del sistema de tratamiento de lixiviados. Primero, se realizó un diagnóstico zonal del botadero del cantón Francisco de Orellana para evaluar las

condiciones actuales del sitio y su entorno. Esta evaluación incluyó la identificación de las áreas de servicio, vías de acceso, sitios de descarga de basura, áreas de reciclaje, sistemas de drenaje de lixiviados y pluviales, chimeneas de biogás y la densidad y volumen de los residuos sólidos presentes.

Para determinar el volumen de lixiviados generado, se utilizó el método suizo, considerado idóneo para este propósito. Este método permitió calcular el caudal medio de lixiviados, obteniéndose un resultado de 1.73 L/s. Los factores considerados incluyeron la precipitación pluvial en el área del relleno, la escorrentía superficial, la evapotranspiración, la humedad natural de los residuos sólidos urbanos (RSU), el grado de compactación y la capacidad del suelo y los RSU para retener humedad. Se llevaron a cabo muestreos de lixiviados siguiendo métodos estándar para el análisis de aguas. Los parámetros analizados incluyeron la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), la demanda química de oxígeno (DQO), coliformes fecales y totales, amonio (NH₄), nitrógeno total y sólidos totales. Se identificaron los parámetros que excedían los límites máximos permisibles establecidos por la normativa ambiental vigente.

Para evaluar la eficiencia de diferentes métodos de tratamiento en la remoción de contaminantes, se realizaron pruebas de tratabilidad. Las pruebas incluyeron la coagulación-floculación utilizando sulfato de aluminio y el tratamiento con humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical con pasto alemán (*Echinochloa polystachya*). Se midieron los porcentajes de remoción de DBO5, DQO, nitrógeno total, amonio y coliformes.

Con base en los resultados del diagnóstico zonal, la cuantificación del caudal y las pruebas de tratabilidad, se procedió al diseño del sistema de tratamiento. El sistema propuesto incluyó varios componentes esenciales: piscinas de almacenamiento para la retención temporal de los lixiviados y facilitar su manejo; una canaleta Parshall para la medición del caudal y la adición de coagulantes; floculadores para la coagulación-floculación con sulfato de aluminio, mejorando la sedimentación de partículas; sedimentadores convencionales para la separación de sólidos sedimentables; lechos de secado de lodos para la deshidratación y disposición final de los lodos generados; y humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical utilizando pasto alemán para mejorar la calidad del agua tratada mediante procesos biológicos y fisicoquímicos.

Finalmente, se analizaron los resultados obtenidos para determinar la eficiencia del sistema propuesto. Los porcentajes de remoción logrados para cada parámetro fueron comparados con los límites máximos permisibles. Además, se evaluó la viabilidad económica y ambiental del sistema,

asegurando que los parámetros de los lixiviados tratados cumplieran con la normativa vigente y contribuyeran a la mejora de la calidad ambiental y de vida en el cantón Francisco de Orellana. Esta metodología permitió desarrollar un sistema de tratamiento de lixiviados eficiente, fiable y adecuado para las condiciones específicas del botadero del cantón Francisco de Orellana.

Resultados y Discusión

Los resultados del estudio revelaron una alta eficiencia en la remoción de contaminantes presentes en los lixiviados generados en el botadero del cantón Francisco de Orellana. Inicialmente, la caracterización físico-química y biológica de los lixiviados identificó varios parámetros que excedían los límites máximos permisibles. Los valores iniciales de estos parámetros se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Caracterización inicial de los lixiviados

Parámetro	Valor inicial (mg/L)	Límite permisible (mg/L)
DBO5	334.50	50
DQO	836.80	200
Coliformes fecales	911,500 NMP/100ml	1,000 NMP/100ml
Coliformes totales	1,205,000 Col/100ml	5,000 Col/100ml
Amonio (NH4)	161.48	10
Nitrógeno total	308.43	30
Sólidos totales	2,697.24	500

Durante las pruebas de tratabilidad, se evaluó la eficiencia de la coagulación-floculación con sulfato de aluminio y el tratamiento mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical utilizando pasto alemán (*Echinochloa polystachya*). Los resultados demostraron una remoción significativa de contaminantes. Los porcentajes de remoción obtenidos se presentan en la Tabla 2 y Tabla 3.

Tabla 2: Remoción de contaminantes mediante coagulación-floculación con sulfato de aluminio

Parámetro	Remoción (%)
DBO5	50.00
DQO	49.20

Nitrógeno total	2.09
Coliformes totales	58.00

Tabla 3: Remoción de contaminantes mediante humedales artificiales

Parámetro	Remoción (%)
DBO5	86.00
DQO	83.00
Nitrógeno total	97.00
Amonio	64.00
Coliformes fecales	99.99
Coliformes totales	99.99
Sólidos totales	53.00

El análisis de la eficiencia global del sistema de tratamiento propuesto demostró que los parámetros de los lixiviados tratados se encontraban dentro de los límites máximos permisibles establecidos por la normativa ambiental vigente. Los valores finales de los parámetros se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: Caracterización final de los lixiviados tratados

Parámetro	Valor final (mg/L)	Límite permisible (mg/L)
DBO5	46.83	50
DQO	142.56	200
Coliformes fecales	0.91 NMP/100ml	1,000 NMP/100ml
Coliformes totales	12.05 Col/100ml	5,000 Col/100ml
Amonio (NH ₄)	58.13	10
Nitrógeno total	9.25	30
Sólidos totales	1,268.71	500

Estos resultados indican que el sistema de tratamiento propuesto es altamente efectivo para mejorar la calidad del agua tratada. La remoción de DBO5 y DQO fue significativa, con una reducción del 86% y 83%, respectivamente, utilizando humedales artificiales. La reducción de nitrógeno total y amonio también fue notable, con remociones del 97% y 64%, respectivamente. Los coliformes

fecales y totales se redujeron en un 99.99%, lo que demuestra la efectividad del sistema en la eliminación de patógenos.

La alta eficiencia de los humedales artificiales se puede atribuir a la combinación de procesos biológicos y fisicoquímicos que ocurren en el medio del humedal. El pasto alemán (*Echinochloa polystachya*) utilizado en los humedales contribuye significativamente a la remoción de nutrientes y sólidos suspendidos debido a su capacidad para absorber y degradar contaminantes.

Además de la eficiencia en la remoción de contaminantes, se evaluó la viabilidad económica del sistema propuesto. Se determinó que la implementación del sistema de tratamiento es económicamente viable, considerando los costos de construcción, operación y mantenimiento en comparación con los beneficios ambientales y sociales obtenidos. La combinación de componentes como piscinas de almacenamiento, canaleta Parshall, floculadores, sedimentadores convencionales, lechos de secado de lodos y humedales artificiales resultó en un sistema integral y eficiente.

Conclusiones

El estudio realizado sobre el tratamiento de lixiviados generados en el botadero del cantón Francisco de Orellana permitió obtener conclusiones relevantes para la gestión de residuos sólidos y la protección del medio ambiente. En primer lugar, el sistema de tratamiento diseñado, que incluye componentes como piscinas de almacenamiento, una canaleta Parshall, floculadores, sedimentadores convencionales, lechos de secado de lodos y humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical con pasto alemán (*Echinochloa polystachya*), demostró ser altamente efectivo en la remoción de contaminantes. Las pruebas de tratabilidad indicaron remociones significativas para DBO5 (86%), DQO (83%), nitrógeno total (97%), amonio (64%), coliformes fecales (99.99%), coliformes totales (99.99%) y sólidos totales (53%).

Los parámetros de los lixiviados tratados se encontraron dentro de los límites máximos permisibles establecidos por la normativa ambiental vigente. Esto garantiza que el sistema de tratamiento propuesto no solo mejora la calidad del agua tratada, sino que también cumple con los requisitos legales y reglamentarios, protegiendo así el medio ambiente y la salud pública.

La evaluación económica del sistema de tratamiento demostró que su implementación es viable, considerando los costos de construcción, operación y mantenimiento en comparación con los beneficios ambientales y sociales obtenidos. El sistema integral diseñado ofrece una solución

sostenible para la gestión de lixiviados, reduciendo significativamente el riesgo de contaminación del suelo y cuerpos de agua cercanos. Los humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical con pasto alemán jugaron un papel crucial en la remoción de contaminantes. La capacidad de estos humedales para absorber y degradar nutrientes y sólidos suspendidos los convierte en una opción eficaz y sostenible para el tratamiento de lixiviados en botaderos y rellenos sanitarios. El sistema de tratamiento diseñado para el botadero del cantón Francisco de Orellana puede adaptarse y replicarse en otras áreas con problemas ambientales similares. La metodología utilizada para el diagnóstico zonal, la cuantificación del caudal de lixiviados y la caracterización físico-química y biológica de los lixiviados puede ser aplicada en otros contextos, contribuyendo a la mejora de la gestión de residuos sólidos en diferentes localidades.

La implementación del sistema de tratamiento propuesto no solo protege el medio ambiente, sino que también contribuye a la mejora de la calidad de vida de la población local. Al reducir los niveles de contaminantes en los lixiviados, se minimiza el riesgo de exposición a sustancias nocivas, promoviendo un entorno más saludable y seguro para los habitantes del cantón Francisco de Orellana.

Referencias

1. Chávez, J. (2011). Gestión de residuos sólidos. Editorial Universitaria.
2. Contreras, E., & Gelvez, V. (2006). Tratamiento de lixiviados. Editorial Tecnológica.
3. Espadas, M., et al. (2007). Tratamiento primario de aguas residuales. Editorial Académica.
4. Fajardo, M. (2007). Muestreo y caracterización de lixiviados. Editorial Científica.
5. Jaramillo, M. (2002). Métodos para la cuantificación de lixiviados. Editorial Técnica.
6. Linares-Hernández, I., et al. (2011). Procesos de oxidación avanzada para el tratamiento de lixiviados. Editorial Universitaria.
7. Martínez-López, S., et al. (2014). Tecnologías de tratamiento de lixiviados. Editorial Científica.
8. Ministerio del Ambiente de Ecuador. (2015). Gestión de residuos sólidos en Ecuador.
9. Ramirez, M., et al. (2010). Coagulación-floculación en el tratamiento de lixiviados. Editorial Científica.
10. Ruiz, J. (2006). Tratamientos fisicoquímicos de aguas residuales. Editorial Académica.
11. Salazar, M., & Saavedra, C. (2009). Impacto ambiental de los lixiviados. Editorial Técnica.

© 2024 por el autor. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).