

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**EFFECTO DE LA OZONIZACIÓN EN LA BIODEGRADABILIDAD DE LIXIVIADOS
DE RESIDUOS SÓLIDOS DOMICILIARIOS A ESCALA DE LABORATORIO**

Tesis

para optar el título de:

INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTADO POR:

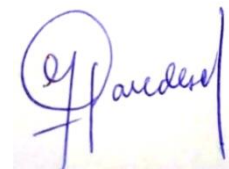
CRUZ ESPINOZA ROMARIO BELTRAN

Asesor

Ing. M.Sc. PAREDES SALAZAR JOSÉ LUIS

Tingo María – Perú

2024





ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS N°107-2024-FRNR-UNAS


Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 17 de junio de 2024, a horas 4:00 p.m. de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

“EFECTO DE LA OZONIZACIÓN EN LA BIODEGRADABILIDAD DE LIXIVIADOS DE RESIDUOS SÓLIDOS DOMICILIARIOS A ESCALA DE LABORATORIO”

Presentado por el Bachiller: **CRUZ ESPINOZA, ROMARIO BELTRAN**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“MUY BUENA”**.

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL** que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 22 de octubre de 2024


Ing. MSc. **JOSE ANTONIO BLAS MATIENZO**
PRESIDENTE


Ing. MSc. **FRANKLIN DIONISIO MONTALVO**
MIEMBRO


Ing. MSc. **SANDRA L. ZAVALA GUERRERO**
MIEMBRO




Ing. MSc. **JOSE LUIS PAREDES-SALAZAR**
ASESOR



"Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 365 - 2024 - CS-RIDUNAS

El Director de la Dirección de Gestión de Investigación de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Programa de Estudio:

ingeniería Ambiental

Tipo de documento:

| | | | |
|-------|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| Tesis | <input checked="" type="checkbox"/> | Trabajo de Suficiencia Profesional | <input type="checkbox"/> |
|-------|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------------|

| TÍTULO | AUTOR | PORCENTAJE DE SIMILITUD |
|---|-------------------------------------|----------------------------------|
| EFFECTO DE LA OZONIZACION EN LA BIODEGRADABILIDAD DE LIXIVIADOS DE RESIDUOS SÓLIDOS DOMICILIARIOS A ESCALA DE LABORATORIO | CRUZ ESPINOZA ROMARIO BELTRAN | 17 % Diecisiete |

Tingo María, 17 de diciembre de 2024


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE GESTIÓN DE LA INVESTIGACIÓN
Dr. Tomas Menacho Mallqui
JEFE
C.C. Archivo

DEDICATORIA

Quiero dedicar esta tesis a mi madre Raymunda Espinoza Ortega, por todo el apoyo incondicional y por haberme formado con valores éticos y morales; a mi padre Armando Cruz Montano que me cuida y me protege desde el cielo.

A mis hermanos Ruben, Armando, Isabel y Yaneth por el apoyo y los consejos que me dan para seguir adelante y superar los obstáculos de la vida.

AGRADECIMIENTO

A **Dios** por guiarme en mi etapa de formación profesional, por permitir que mis decisiones sean las adecuadas y por acompañarme todos los días de mi vida.

A mi **Madre Raymunda Espinoza Ortega**, mi **Padre Armando Cruz Montano** que en paz descansa, mis hermanos por su apoyo incondicional, por sus sabios consejos; quienes a su vez son mi principal motivo de superación y así ser ejemplo de mis, sobrinos y sobre todo de nuestros hijos.

A la señorita **Mayli Andrea Vela Sandoval**, por el apoyo incondicional en todo el transcurso de mi vida universitaria, por ser mi compañera y pareja que recorre conmigo el sendero de la vida.

A mi asesor el **Ing. José Luis Paredes Cruz** y Docentes de la facultad de ingeniería ambiental por sus enseñanzas y por compartir sus experiencias y conocimientos como profesionales.

INDICE GENERAL

| | Página |
|--|--------|
| I.INTRODUCCION | 1 |
| 1.1.Objetivos | 2 |
| 1.1.1.Objetivo general..... | 3 |
| 1.1.2.Objetivos específicos | 3 |
| II.REVISIÓN DE LITERATURA | 4 |
| 2.1.Antecedentes | 4 |
| 2.2.Marco teórico | 4 |
| 2.2.1.Definición de Lixiviados | 5 |
| 2.2.2.Clasificación de lixiviados..... | 5 |
| 2.2.3.Generación y Composición de los lixiviados. | 5 |
| 2.2.4.Biodegradabilidad de lixiviados | 7 |
| 2.2.5.Tecnologías de Oxidación avanzada | 7 |
| 2.2.6.El Ozono | 8 |
| 2.2.7.El proceso de Ozonización | 9 |
| 2.2.8.Aplicaciones | 10 |
| III.MATERIALES Y METODOS..... | 12 |
| 3.1. Lugar de ejecución..... | 12 |
| 3.1.1.Ubicación Geográfica | 12 |
| 3.1.2.Ubicación política..... | 12 |
| 3.1.3.Características climáticas..... | 13 |
| 3.2.Materiales y Equipos..... | 13 |
| 3.3.Criterios de estudio..... | 13 |
| 3.3.1.Nivel de investigación | 13 |
| 3.3.2.Tipo de investigación..... | 13 |
| 3.3.3.Método de investigación..... | 13 |

| | |
|---|----|
| 3.3.4.Diseño de investigación..... | 13 |
| 3.3.5.VARIABLES DE INVESTIGACIÓN..... | 14 |
| 3.3.6.Análisis estadístico | 15 |
| 3.4.Metodología..... | 16 |
| 3.4.1.Determinación del efecto de la aplicación de ozono en la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos domiciliarios con tres porcentajes diferentes de materia orgánica putrescible a escala de laboratorio | 16 |
| 3.4.2.Determinación del efecto de la aplicación de ozono en la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos domiciliarios con tres valores de pH diferentes a escala de laboratorio. | 17 |
| 3.4.3.Cálculo y comparación de la variación de la biodegradabilidad por efecto de la aplicación de ozono a un lixiviado de residuos sólidos domiciliarios procedente de diferentes porcentajes de materia orgánica y a pH diferentes a escala de laboratorio..... | 18 |
| IV.RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 19 |
| 4.1.Determinación del efecto de la aplicación de ozono en la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos domiciliarios con tres porcentajes diferentes de materia orgánica putrescible a escala de laboratorio | 19 |
| 4.2.Determinación del efecto de la aplicación de ozono en la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos domiciliarios con tres valores de pH diferentes a escala de laboratorio. | 20 |
| 4.3.Cálculo y comparación de la variación de la biodegradabilidad por efecto de la aplicación de ozono a un lixiviado de residuos sólidos domiciliarios procedente de diferentes porcentajes de materia orgánica y a pH diferentes a escala de laboratorio. | 24 |
| 4.4.Análisis estadístico | 30 |
| V.CONCLUSIONES | 32 |
| VI.PROPUESAS A FUTURO..... | 33 |
| VII.REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS..... | 34 |
| VIII.ANEXOS | 37 |
| 8.1.Panel fotográfico..... | 37 |
| 8.2.Datos experimentales de la investigación..... | 42 |

| | |
|---|----|
| 8.3.Resultados del análisis estadístico de los datos experimentales con el software InfoStat | 43 |
|---|----|

ÍNDICE DE TABLAS

| Tabla | Página |
|--|--------|
| 1. Principales características de los lixiviados jóvenes y viejos en un relleno sanitario. | 7 |
| 2. Niveles de las variables..... | 14 |
| 3. Matriz de diseño tipo factorial completo 3^2 | 15 |
| 4. Características fisicoquímicas básicas de los lixiviados obtenidos | 19 |
| 5. Valores de DBO ₅ y DQO de lixiviados con diferentes porcentajes de residuos orgánicos biodegradables a diferentes pH, después de la aplicación de ozono. | 23 |
| 6. Biodegradabilidad de los lixiviados generados con diferentes porcentajes de residuos orgánicos biodegradables, antes y después de la aplicación de la ozonización. | 25 |
| 7. Porcentaje de variación de la biodegradabilidad de los lixiviados generados con diferentes porcentajes de residuos orgánicos biodegradables, antes y después de la aplicación de la ozonización. | 27 |
| 8. Resumen del análisis estadístico de los datos experimentales..... | 30 |
| 9. Datos experimentales de los tratamientos de la investigación..... | 42 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| Figura | Página |
|--|--------------------------------------|
| 1. Proceso de ozonización..... | 10 |
| 2. Cámara de contacto con deflectores | 10 |
| 3. Ubicación geográfica de la Universidad Nacional Agraria de la Selva..... | 12 |
| 4. Sistema experimental..... | 16 |
| 5. Sistema experimental implementado para la investigación..... | 19 |
| 6. Lisímetro construido para la generación de lixiviados | 19 |
| 7. Variación de la biodegradabilidad del lixiviado a los diferentes pH por efecto de la ozonización | 26 |
| 8. Porcentaje de variación de la biodegradabilidad del lixiviado a los diferentes pH por efecto de la ozonización..... | 28 |
| 9. Preparación de las cubas de vidrio para la cámara de ozonización | 37 |
| 10. Ensamblaje de las partes del lisímetro para la instalación del sistema experimental, .. | 37 |
| 11. Segregación de los residuos orgánicos para la carga del lisímetro según los objetivos de la investigación. | 38 |
| 12. Acondicionamiento de la grava para implementación en la base del interior del lisímetro. | 38 |
| 13. Prueba de cerrado del lisímetro | 39 |
| 14. Vaciado de la grava para la base del lisímetro..... | 39 |
| 15. Colección de lixiviados generados en el lisímetro..... | ¡Error! Marcador no definido. |
| 16. Carga de los lixiviados en las cámaras de ozonización | 40 |
| 17. Medición del pH de los lixiviados en la cámara de ozonización..... | 41 |
| 18. Aplicación del ozono a los lixiviados..... | 41 |

RESUMEN

En la investigación se evaluó el efecto de la ozonización de un lixiviado sobre su biodegradabilidad. El estudio fue desarrollado a escala de laboratorio y los lixiviados fueron generados en un lisímetro de PVC de 1 m de altura y 8 pulgadas de diámetro y una capacidad de carga de 10 Kg. Las variables de estudio fueron materia orgánica de los residuos sólidos (%) y el pH del lixiviado. Se trabajó con 40%, 60% y 80% de materia orgánica de los residuos sólidos y el lixiviado obtenido fue ajustado a tres valores de pH 5, 7 y 9 antes de la aplicación de la ozonización. El ozono se aplicó por 1 hora mediante el burbujeo con un ozonizador comercial con un flujo de 14 g/ h. Los lixiviados generados fueron caracterizados con pH, ST, DBO₅ y DQO y la biodegradabilidad fue determinada por la relación DBO₅ / DQO. Los resultados indicaron que la ozonización es un proceso que favorece el incremento de la biodegradabilidad del lixiviado y que el pH es una variable influyente, tal es así que el máximo porcentaje de incremento de biodegradabilidad del lixiviado fue 68.99% a pH 5, procedente del lixiviado de residuos con 80% de materia orgánica biodegradable y el mínimo porcentaje fue de 12.03% a pH 9 del lixiviado obtenido con 60% de materia orgánica de residuos sólidos.

Palabras claves: Ozonización, biodegradabilidad, pH de lixiviados, materia orgánica de lixiviados, lisímetro.

The Effect of Ozonation on the Biodegradability of Leachates from Domiciliary Solid Waste on a Laboratory Scale

Abstract

In the research, the effect of ozonation of a leachate on its biodegradability was evaluated. The study was carried out on a laboratory scale and the leachates were generated in a lysimeter [made from] PVC [that was] 1 m high and eight inches in diameter and [had] a weight capacity of 10 kg. The variables in study were the organic matter from solid waste (%) and the pH of the leachate. The work was done with 40%, 60% and 80% organic matter from the solid waste and the leachate that was obtained was adjusted to three pH values of 5, 7 and 9, before the application of the ozonation. The ozone was applied for one hour using the foam with a commercial ozone generator that had a flow of 14 g/h. The leachates generated were characterized by their pH, ST, DBO₅, and DQO, [as well as] the biodegradability, which was determined through the DBO₅ / DQO relationship. The results indicated that ozonation is a process that favors the increase in the biodegradability of the leachate and that the pH is an influential variable; so much so, that the maximum percentage of increase in the biodegradability of the leachate was 68.99% at a pH of 5, proceeding from a leachate of waste with 80% biodegradable organic matter, and the minimum percentage was 12.03% at a pH of 9 from a leachate that was obtained with 60% organic matter from solid waste.

Keywords: ozonation, biodegradability, pH of leachates, organic matter from leachates, lysimeter

I. INTRODUCCION

A nivel mundial se estima que se generan 1.9 billones de toneladas de residuos sólidos urbanos por año, y aproximadamente no se recolectan el 30% e impactan al medio ambiente; de igual manera, en las ciudades el 70% son gestionados para tener una disposición final en botaderos de cielo abierto y/o rellenos sanitarios, por su bajo costo (Waste Atlas Report, 2013). Los países con mayores industrias la disposición final de residuos sólidos urbanos se sostiene a un 22% en rellenos sanitarios (EPA, 2006).

En Perú, el incremento de generar residuos sólidos se produce en forma directa a la posición económica y estilo de vida de las familias; tal es así, que en muchos hogares existirá una diferencia entre la cantidad de residuos sólidos generados del tipo orgánico con aquellos de naturaleza inorgánica.

La generación per cápita de residuos sólidos domiciliarios en la región Huánuco fue estimada en 0.44 kg/hab/día aproximadamente (SINIA, 2017). Ahora bien, la investigación sobre evaluación de producción de lixiviados, reportaron que a partir de residuos sólidos con 100% de materia orgánica putrescible se generan 598 Kg de lixiviado por tonelada de residuos sólidos (Von Buchwall y Martinez, 2018).

Los lixiviados producidos es el resultado de humedad de los residuos, el acontecimiento de las lluvias, descontando la pérdida de agua por vapor/gases y la capacidad de retención y su composición está concentrada de compuestos orgánicos e inorgánicos, constituyen a estar inmersos de contaminación de las fuentes de agua con las que entren en contacto, más aún en zonas de altas precipitaciones, la contaminación de las aguas pluviales se convierten en el medio de transporte de lixiviados de los botaderos o rellenos sanitarios hacia las redes de alcantarillado o fuentes de agua superficiales más próximas.

En la naturaleza, el ozono (O_3) es un gas oxidante, capaz de modificar la estructura química de muchos compuestos orgánicos e inorgánicos, por cambios en su estado de oxidación, por tanto, su aplicación en lixiviados de residuos sólidos domiciliarios podría constituir una alternativa que contribuya a la depuración.

Ante la problemática que representa la generación permanente de lixiviados de residuos sólidos urbanos por la falta de implementación de tecnologías que disminuyan su

potencial contaminante se formula la siguiente interrogante: ¿Cuál es el efecto de aplicación del ozono en la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos domiciliarios a escala de laboratorio?, planteándose la siguiente hipótesis: La aplicación del ozono incrementa la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos domiciliarios a escala de laboratorio.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de la aplicación del ozono en la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos domiciliarios a escala de laboratorio.

1.1.2. Objetivos específicos

- Determinar el efecto de la aplicación de ozono en la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos domiciliarios con tres porcentajes diferentes de materia orgánica putrescible a escala de laboratorio
- Determinar el efecto de la aplicación de ozono en la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos domiciliarios con tres valores de pH diferentes a escala de laboratorio.
- Calcular y comparar la variación de la biodegradabilidad por efecto de la aplicación de ozono a un lixiviado de residuos sólidos domiciliarios procedente de diferentes porcentajes de materia orgánica y a pH diferentes a escala de laboratorio.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

Suero (2022), realizó una investigación para evaluar el tratamiento de lixiviados del relleno sanitario de Chacán, Anta, Cusco, mediante un piloto de humedales compuesto de un humedal horizontal y un humedal sistema francés y la macrófita *Schoenoplectus americanus*. El lixiviado tratado tuvo alta carga orgánica y antes de su ingreso a los humedales fue diluido y su eficiencia en remoción de demanda bioquímica de oxígeno fue de 86,46% y 88,9% de DQO.

Damián (2018), realizó un estudio de evaluación del tratamiento de lixiviados generados en la planta de compostaje de la provincia de Concepción, Huancayo, aplicando una coagulación con *Opuntia Ficus Indica*, el resultado fue favorable ya que se pudo remover el 57,2% de DQO y un 89,06% de turbiedad, la dosis utilizada del coagulante fue de 1 g/L con un tiempo de contacto de 30 minutos.

Valderrama *et al.* (2017), evaluaron la optimización del proceso Fenton aplicado para tratar los lixiviados del relleno sanitario de Aguas Vírgenes, en Huancayo utilizando los métodos estadísticos de Box-Behnken y superficie de respuesta. Los estudios se realizaron en épocas de lluvia y de estiaje y entre los valores de pH óptimos mencionan 3,19 y 3,26 así mismo una biodegradabilidad de 0,568 y 0,329 respectivamente, lo cual significa una eliminación promedio de 42% de DQO.

Pellon *et al.*, (2009), realizaron una investigación para el tratamiento de lixiviados de tres vertederos de La Habana, en Cuba, para la cual aplicaron una tecnología de tratamiento biológico en condiciones anaeróbicas, la que constó de los siguientes resultados: tanque séptico - filtro anaerobio - sistema de lagunas, respaldando la reducción del principal contaminante, expresado en terminología de DQO y DBO₅ de 2011 a 75 mg/L y de 902 a 30 mg/L respectivamente, adicionando los microorganismos patógenos, asegurando la condición final del residuo tratado.

Zafra y Romero (2019), realizaron una investigación basados en la recopilación bibliográfica, para conocer las tendencias en las tecnologías de tratamiento de lixiviados en Iberoamérica, según los resultados obtenidos, se identifican seis enfoques principales de depuración en Iberoamérica: en el cual el del tipo biológico representa un 49,5%, seguido del térmico con 17,0%, luego por medios naturales 9,80%, en una similar proporción numérica está el fisicoquímico con 9,60 %, la tecnología de membranas con un

8,90%, finalmente la recirculación con 5,20%. También describen que en base de información recopilada los métodos biológicos son mencionados con mayor frecuencia a nivel Iberoamericano y mundial, con 49,5% y 34,1% respectivamente. En resumen, los resultados revelan que el orden de importancia de las principales tecnologías de infiltración/depuración en Iberoamérica se basa en: combinar con aguas residuales, seguido de lodos activados, aireación, humedales artificiales y recirculación.

León y Andrade (2021), realizaron un estudio para reducir la contaminación de las aguas del río Guaranda, las cuales son impactadas por los lixiviados del botadero de Curgua en Ecuador. En esta investigación, realizaron actividades de caracterización de lixiviados, para luego proceder con ensayos a escala de laboratorio. Como etapa final, realizaron el diseño, donde propuso un tratamiento biológico, donde se acentuó el reactor biológico SBR, de igual manera el total de las operaciones unitarias complementarias como: filtros, sedimentadores, desarenadores, tanque de desinfección.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Definición de Lixiviados

El lixiviado, líquido formado del resultado de la reacción, arrastre o filtración de materiales que forman los residuos y contiene sustancias en forma disuelta o suspendidas que pueden ingresar al interior del suelo o escurrirse fuera del sitio de disposición de los residuos. Esto puede provocar la contaminación del suelo y los cuerpos de agua, cuyo deterioro representa un peligro potencial para la salud humana y otros organismos vivos (MINAM, 2012). De igual manera, Wiszniowski et al. (2006) definieron el lixiviado como el agua de lluvia que pasa a través del SDF además del líquido generado durante la degradación/descomposición de residuos en un relleno sanitario. Los líquidos de aguas residuales de alta complejidad en los rellenos sanitarios son generados a consecuencia del porcentaje de humedad/agua en los residuos sólidos, cuando esta sobrepasa a la capacidad de campo (Wang et al. 2003).

2.2.2. Clasificación de lixiviados.

La clasificación de los lixiviados va en alianza de su composición, calidad y cantidad que varían mucho de un sitio a otro y de una estación a otra, influenciado por componentes como son contenido de humedad de los residuos que se tratan; la hidrogeología propia del sitio; proyecto, operacionalidad y tiempo del relleno sanitario; también el grado de biodegradabilidad relativa presentes en los diferentes

contaminantes orgánicos en un relleno sanitario (Reinhart y Townsend, 1998). Sin embargo, hablar sobre promedio de composición no es posible, pero que pueden tratarse de valores típicos a manera que sirva como fuente o referencia (Najera, s/d).

2.2.3. Generación y Composición de los lixiviados.

En relleno sanitarios o botaderos, la disposición de residuos sólidos da lugar a procesos de degradación/descomposición de la materia orgánica, donde los constituyentes se transforman en agua, gas y materia inerte. Durante este proceso se producen lixiviados y biogás interactuando con el medio ambiente; así, con una gestión inadecuada puede afectar severamente la salud a la población que están dentro del área de influencia, seleccionados para ubicación del relleno (Zafra *et al.*,2012).

En una investigación para evaluar la formación de lixiviados a gran escala, se menciona, en los sitios de disposición final la generación de lixiviados es una de las consecuencias de la digestión anaeróbica que más desafíos ocasionan, por su presencia de concentraciones altas de materia orgánica y lo dispendioso en su procesamiento, por lo que la inhibición y/o minimización de la generación de éstos conllevan en una incitación por resolverlos (Tello y Fernández, 2011).

Los lixiviados enfocados a la calidad en un relleno sanitario cambian en el transcurso de tiempo, con el tipo de relleno sanitario presentes en el proyecto. Así pues, al comparar tecnologías en países que están en camino al desarrollo con los desarrollados, los tratamientos de residuos sólidos, se predice que los lixiviados dentro del relleno sanitario presentan elevados valores en DBO, amoníaco, metales y sustancias precipitables en comparación de aquellos de países desarrollados. Las semejanzas fundamentalmente son originadas en base a la calidad de materia orgánica, la cual es calificada como materia orgánica con facilidad de biodegradación, MOFBD, que presenta los residuos sólidos en países de primer mundo (Giraldo, 2014).

Como consecuencia de la calidad de residuos sólidos, se tiene una calidad proporcional de los lixiviados con un poder altamente contaminante, específicamente en su fase inicial, denominado lixiviado joven, en cual también la presencia de metales da lugar a reacciones de óxido-reducción, incrementando la toxicidad del fluido (Giraldo, 2014).

Tabla 1. Características importantes presentes en lixiviados jóvenes y viejos dentro del relleno sanitario.

| Características | Lixiviado Joven | Lixiviado Viejo |
|--------------------------------------|------------------------|-----------------------|
| DBO | Muy alto | Bajo |
| DQO | Muy alto | Alto |
| Amoniaco | Muy alto | Alto |
| Fósforo | Usualmente deficiente* | Suficiente |
| pH | Muy bajo | Bajo |
| Detergentes | Muy altos | Bajos |
| Sales disueltas | Muy altas | Bajas (relativamente) |
| Agentes Incrustantes (Fe, Ca, Mg) | Muy altos | Bajos |
| Metales pesados | Muy Altos | Bajos |

Fuente: Giraldo (2014)

2.2.4. Biodegradabilidad de lixiviados

Giraldo (2014), se refiere a materia orgánica sencillamente biodegradable y con elevado contenido de humedad, y se descompone/degrada con más efectividad en rellenos sanitarios, produciendo en el proceso concentraciones elevadas de ácidos grasos volátiles y de amoníaco, a consecuencia de la fermentación inicial. De igual manera, los ácidos son diluido eficazmente en la faceta de lixiviado en un relleno sanitario, reduciendo el pH y ayudando a disolver los metales en los residuos de los vertederos.

La naturaleza del problema en tratamientos es muy diferente para lixiviado joven a la de un viejo, porque, las condensaciones en los múltiples parámetros son valores más altos en el lixiviado joven que en lixiviado viejo. De esta forma, la correlación de DBO con DQO es mayor en un lixiviado joven e indica una buena/alta biodegradabilidad, en cambio, para un lixiviado viejo indica una biodegradabilidad baja/pobre de materia orgánica (Giraldo, 2014).

En el transcurso de los tratamientos de lixiviados, el removimiento de DBO se ve inducido por los metales tóxicos; así mismo, la remoción de metales, incluidos los considerados incrustantes como el hierro, se ve influenciado por el DBO presente que sirve como mediador a complejante que conservan los metales en solución obstaculizando y/o restringiendo rigurosamente su remoción (Giraldo, 2014).

La biodegradabilidad se define como la capacidad inherente de una sustancia de transformarse en una estructura química más simple bajo la influencia de agentes microbianos. De esta afirmación se puede ver que la biodegradación y las aguas residuales son dos conceptos estrechamente relacionados si se tiene en cuenta que la mayoría de las sustancias transportadas por el agua son sustancias orgánicas y las sustancias orgánicas son altamente biodegradables (Vázquez y Beltrán, 2004); así mismo, Peña (2013) enfatizó que la biodegradabilidad de tales sustancias es una característica que permite la depuración de aguas residuales mediante la intervención de microorganismos, en la utilización de esta matriz como fuente de alimento y energía para su desarrollo metabólico y reproducción.

Por otro lado, Ottenbrite y Albertsson, (1992) mencionan que el estudio de la biodegradabilidad permite comprender la capacidad de las sustancias de ser transformadas en estructuras complejas a más simples por intervención de los microbios.

2.2.5. Tecnologías de Oxidación avanzada

El proceso de oxidación avanzada (POAs), implica la producción de radicales del grupo hidroxilo así como otras especies mas de oxidación muy fuertes. Estas especies son casi imposibles biodegradables y/o refractarios. El POAs, direccionan a la combinación de múltiples procesos para obtener radicales de tipo hidroxilo como los procesos de ozonización, electroquímico, de fentón, cavitación hidrodinámica, acústico, radiación ultravioleta homogénea y fotocatalítica heterogénica, etc. (AINIA, 2013)

Los POAs tienen la propiedad para que la degradación de contaminantes sea reconocida desde los años 70, por su inmenso potencial en el proceso de tratamientos de contaminantes en agua de suministro, residual y de lodos. Desde la década pasada, tales procesos han demandado mucha relevancia ante el aumento de preocupación causada por nuevos impactos de contaminación, además por el avance de innovación de modernas tecnologías en fabricantes de equipos. Una de las principales más notorias de los POAs es que tiene gran valor de utilidad para eliminar contaminantes refractarios que son

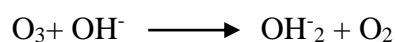
resistentes al aplicar otros métodos de tratamiento (pesticidas, fármacos, surfactantes, etc.), entre los principales se tienen el biológico, además, sirven para tratar contaminantes en concentraciones muy bajas/pobres (AINIA, 2013).

Del mismo modo, el POAs tiene un gran potencial para desarrollar innovadoras aplicaciones para poder eliminar eficazmente los contaminantes; sí mismo, de su aplicación para la minoración y/o eliminación de contaminantes más fuertes; a través de los POAs también se pueden generar varias aplicaciones en agua tales como el incremento de la biodegradabilidad en aguas para poder ser tratadas por medio de, facetas biológicos comunes/convencional (AINIA, 2013).

2.2.6. El Ozono

En el ozono (O₃) se constata que esta formado por tres átomos oxígeno en vez de dos (diatómico), dando lugar una forma alotrópica. Naturalmente, está formado en la estratósfera por el resultado de la radiación solar con la práctica industrial mediante generadores de descarga en corona o radiación ultravioleta suspendidos en el aire (enriquecido u oxígeno). Es una molécula muy reactiva, con alta potencialidad de oxidación de 2,07 V, elevado comparado con otros oxidantes convencionales (peróxido de hidrógeno: 1,78 V, ácido hipocloroso: 1,49 V, cloro: 1,36 V) y tan solo superado por el fluoruro (3,06 V) o radicales como el radical hidroxilo (2,80 V) (Rosal, 2019).

En tal mismo sentido, la descomposición de O₃ en generación del radical hidroxilo da lugar en agua pura más rápidamente cuanto esta encuentra más elevado el nivel de pH, porque dichos radicales son el resultado de la cadena de reacciones iniciada con la reacción (Rosal, 2019):



2.2.7. El proceso de Ozonización

En el efecto de la contaminación (química y biológica) durante la ozonización depende del agua tratada, tiempo de contacto y la concentración de O₃. En la Figura 1 se visualizan los elementos de un sistema de ozonización, en la cual se indican las partes siguientes: el preparado del gas de alimentación, reproducción del ozono, el contacto del ozono que suele realizarse bien por difusores de burbuja y la destrucción del ozono mediante destrucción térmica o bien por destrucción catalítica (Bes *et al.*, s.d.).

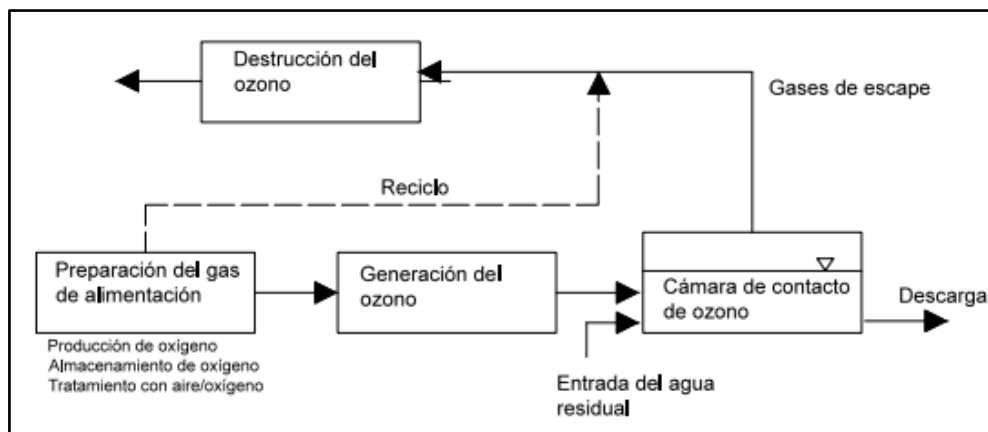


Figura 1. Proceso de ozonización

Contacto del ozono

El contacto del ozono el agua o fluido a tratar, es muy importante, ya que busca la dispersión en lo posible de manera más fina. Para un resultado final se emplean difusores de burbujas finas propios de cámaras de contacto; así mismo, las múltiples cámaras de contacto de burbujas difusas más utilizados son: inyección de presión positiva, de presión negativa, de agitación mecánica y las torres de lecho fijo. Los más comunes difusores suelen ser la cámara con reflectores (Bes *et al.*, s.d.)

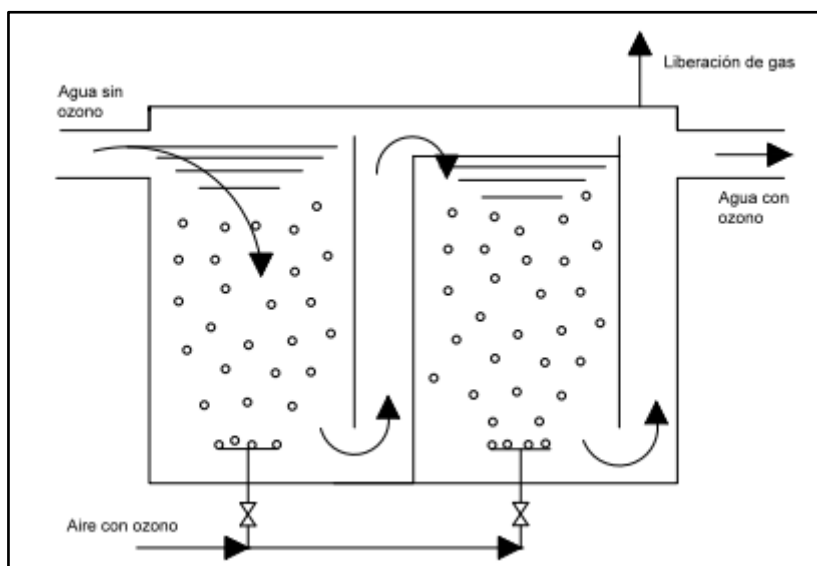


Figura 2. Cámara de contacto con deflectores

Es importante el reconocimiento de una cámara típica de ozonización, esta consta de varios compartimentos en serie provistos de difusores de

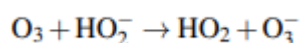
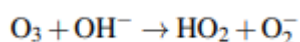
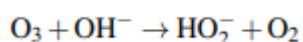
burbuja en el fondo. En los espacios de seccionamiento, el fluido del agua es dirección opuesta a las burbujas que crecen. La cámara está cubierta para evitar fugas de O₃ aumentando la presión parcial del mismo en la cámara. Una cámara adicional adiciona tiempo de contacto entre el O₃ y el agua. (Bes *et al.*, s.d.).

2.2.8. Aplicaciones

La técnica de oxidación química que en la actualidad tiene gran relevancia y variedad de aplicaciones es la ozonización, tales como: Desinfección, oxidación de microcontaminantes, orgánicos recalcitrantes (fármacos, pesticidas, contaminantes fenólicos, entre otros), oxidación de contaminantes inorgánicos (hierro, manganeso y sulfitos), eliminación de color y sabor, potabilización de aguas y depuración de aguas residuales. (Bablon, G, 2005).

La operatividad del O₃ es fructífero para el tratamiento de especies químicas que contienen sitios nucleofílicos caracterizados por la presencia del O, N, S o fósforo. Debido a la acción del O₃, sustancias como aminas, pesticidas y especies aromáticas pueden ser transformadas y llevadas a un estado en el cual su biodegradabilidad puede realizarse fácilmente. (Bablon, G, 2005).

De modo similar, Becerra-Moreno *et al.*, (2021) menciona que el O₃ en proceso de tratamiento de lixiviados elimina los contaminantes de diferentes maneras, teniendo en cuenta en que condiciones esta los valores del pH. Para un pH alcalino, las reacciones de iniciación principales se producen según las siguientes ecuaciones:



III. MATERIALES Y METODOS

3.1. Lugar de ejecución

3.1.1. Ubicación Geográfica

La presente investigación se realizó en el Laboratorio de Calidad del Agua de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), ubicado en las coordenadas UTM: 390256 Este y 8970849 Norte a una altitud de 662 m.s.n.m, en la ciudad de Tingo María.

3.1.2. Ubicación política

La provincia de Leoncio Prado pertenece a la región del centro del Perú, siendo la capital de Tingo María ubicado en el Distrito de Rupa – Rupa, y que limita al Norte con el Distrito de Nuevo Progreso, por el Sur, con los distritos de Chinchao y Churubamba por el Este, con la Provincia de Padre Abad, y por el Oeste, con las Provincias de Maraón, Huancaybamba, Huamalies y Dos de Mayo.

Geográficamente la ciudad de Tingo María, se encuentra en la hoja 19-k de la Carta Nacional del Instituto Geográfico Nacional, correspondiente a la región Selva.

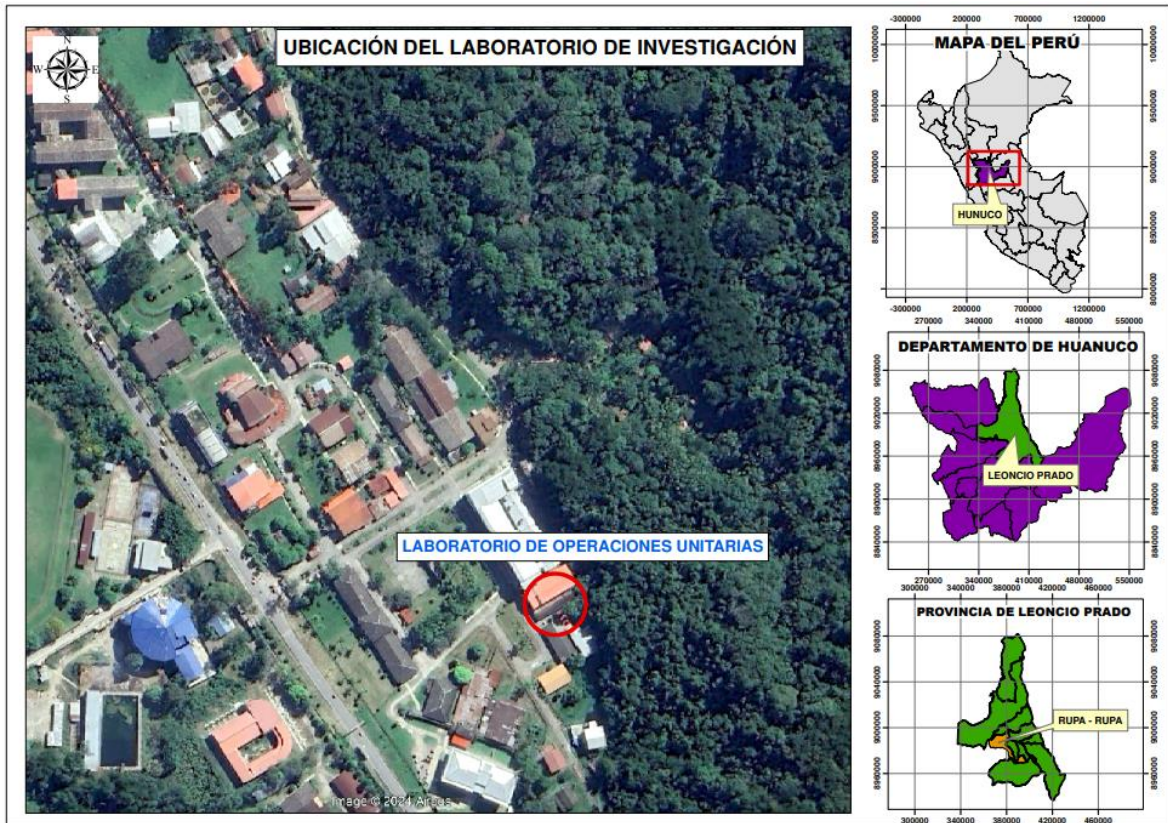


Figura 3. Ubicación geográfica de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

3.1.3. Características climáticas

El clima que presenta el área de investigación es, temperatura máxima de 31,5 °C, temperatura mínima de 21,0 °C, llegando alcanzar una temperatura promedio anual de 25,4 °C; de igual manera tiene humedad relativa promedio anual alrededor de 85% con precipitación acumulada por año de 3,755 mm (ESTACIÓN METEOROLÓGICA JOSE ABELARDO QUIÑONEZ, 2017).

Los rangos de velocidad del viento por hora en Tingo María varían de 0,6 kilómetros por hora de 5,1 kilómetros por hora, considerando que los cambios no son bruscos, con dirección de viento hacia el norte. También se encuentra dentro de la cuenca hidrográfica del río Huallaga (SENAMHI, s.d.)

3.1.4. Materiales y Equipos.

Material de vidrio de laboratorio: vasos de precipitación, probetas y fiolas marca pirex, Lisímetro de laboratorio, Ozonizador comercial con temporizador y regulador de caudal, Cámara de ozonización, Balanza Analítica marca Sartorius con 0.001 g de precisión, Equipo multiparamétrico marca Hanna Envases marca para toma de muestras, Guantes quirúrgicos, Residuos sólidos domiciliarios, Papel filtro, Cámara de Incubación, Estufa digital marca Memmert

Reactivos

Agua destilada, Hidróxido de sodio, Ácido clorhídrico al 37%, sulfato ferroso amoniacal, ácido sulfúrico, dicromato de potasio, sulfato de plata.

3.2. Criterios de estudio

3.2.1. Nivel de investigación

El presente trabajo de investigación es de nivel explicativo, ya que se utilizaron las recolecciones de datos de las variables en estudio, para corroborar la hipótesis en base de la medición numérica (Hernández *et al.*, 2010).

3.2.2. Tipo de investigación

El tipo de investigación fue aplicativo, en el cual se afirma que en este trabajo de investigación busca la aplicación de los conocimientos adquiridos a la vez que se consiguen de otros (Hernández *et al.*, 2010)

3.2.3. Método de investigación

Los métodos de investigación son inductivos y analíticos, el primer método utiliza el razonamiento para llegar a conclusiones basadas en hechos generalmente

aceptados y válidos, mientras que el método analítico estudia y comprende los resultados obtenidos.

3.2.4. Diseño de investigación

Teniendo en consideración el modelo de manipulación de las variables independientes, el diseño fue catalogado como experimental y factorial (Hernández *et al.*, 2014).

3.2.5. Variables de investigación

a) Variable independiente:

La aplicación de ozono a un lixiviado de diferentes concentraciones de materia orgánica y diferentes pH

Dimensiones e indicadores:

- Caudal de salida de ozono
- Porcentaje de materia orgánica y rangos de pH

b) Variable dependiente:

La biodegradabilidad del lixiviado

Dimensiones e indicadores:

- La relación DBO/DQO después de cada tratamiento

Tabla 2. Niveles de las variables

| Variable de investigación | Niveles | |
|---|---|--|
| | (A) | (B) |
| Aplicación de ozono a lixiviado obtenido con residuos de bajo porcentaje de materia orgánica y a tres pH diferentes | Lixiviado obtenido con 40% residuos orgánicos | Lixiviado a pH=5 Lixiviado a pH=7 Lixiviado a pH=9 |
| Aplicación de ozono a lixiviado obtenido con residuos de porcentaje medio | Lixiviado obtenido con 60% residuos | Lixiviado a pH=5 Lixiviado a pH=7 |

de materia orgánica y a tres orgánicos Lixiviado a pH=9
pH diferentes

Aplicación de ozono a
lixiviado obtenido con Lixiviado obtenido Lixiviado a pH=5
residuos de alto porcentaje de con 80%residuos Lixiviado a pH=7
materia orgánica y a tres pH orgánicos Lixiviado a pH=9
diferentes

Tabla 3. Matriz de diseño tipo factorial completo 3^2

| N° experimental | Orden Aleatorio | Factor A | | Factor B | |
|-----------------|-----------------|-------------------|----|----------|----|
| | | %Materia Orgánica | | pH | |
| 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 2 | 8 | 0 | -1 | -1 | -1 |
| 3 | 9 | 1 | -1 | -1 | -1 |
| 4 | 3 | -1 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 7 | -1 | 1 | 1 | 1 |
| 8 | 5 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 9 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Donde:

Para % Materia orgánica 40% (-1), 60% (0) ,80% (+1) y pH 5 (-1),7(0),9 (+1).

3.2.6. Análisis estadístico

La base de datos obtenidos se aplicó el análisis de varianza (ANVA) con corrección factorial de 3×3 , con las herramientas utilizadas dentro del programa InfoStat; así mismo, se aplicó una prueba de Duncan para comparar los tratamientos a evaluar la biodegradabilidad del lixiviado obtenido a diferentes concentraciones de materia orgánica y pH.

3.3. Metodología

3.3.1. Determinación del efecto de la aplicación de ozono en la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos domiciliarios con tres porcentajes diferentes de materia orgánica putrescible a escala de laboratorio

Se implementó el sistema experimental que constó de un ozonizador de laboratorio, posteriormente se construyó una cámara de vidrio de 8 mm de espesor con 3 compartimentos de 1 litro cada uno.

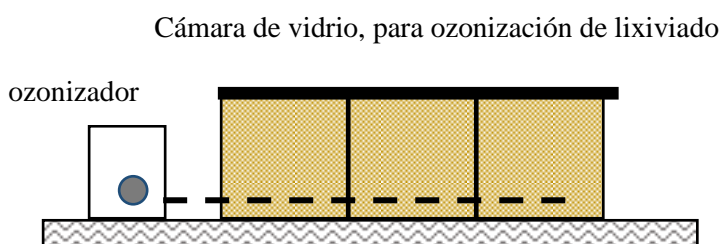


Figura 4. Sistema experimental

Así mismo se construyó un lisímetro para la obtención de los lixiviados, tomando como referencia el diseño utilizado por Von Buchwald y Martínez (2018). El lisímetro construido tuvo 1.0 m de alto y 0.2 m de ancho, compuesto por tapa de PVC en ambos extremos, cobertura de 0.3 m de grava, seguido por la geomembrana y teniendo un compartimiento de 0.7 m de longitud donde se colocaron los residuos sólidos domiciliarios, interiormente tenía provisto de 1 un tubo perforado de 1 pulgada de diámetro que pasaba por el centro del lisímetro para transportar el lixiviado generado hacia el recipiente recolector.

Obtención de lixiviados

Se colectó 10 kg de residuos sólidos domiciliarios, de los cuales, provistos de una mascarilla y guantes quirúrgicos, se procedió a seleccionar para acondicionar los residuos sólidos domiciliarios a lo requerido en la investigación y se trabajó con residuos de naturaleza orgánica e inorgánica. Se cargó el lisímetro de acuerdo los porcentajes en peso de residuos de naturaleza orgánica biodegradable de 40%, 60% y 80%, según se plantea en la investigación. Se procedió a tapar el lisímetro y a esperar la generación de lixiviados por 45 días, los cuales se colectaron y caracterizaron, con pH, ST, DBO₅ y DQO.

Aplicación del ozono. Los lixiviados colectados, por separado de residuos sólidos con 40%, 60% y 80% de materia orgánica, se cargarán en la cámara de ozonización y se aplicó el flujo de ozono por 1 hora. Luego se filtró un volumen de muestra y se determinó la DBO₅ y la DQO.

Determinación de Demanda Bioquímica de Oxígeno

La DBO₅, se determinó según Ramalho (2003), quien utiliza la siguiente metodología:

$$DBO_5 = \left\{ \left[\frac{(OD_{ad} * V_{ad}) + (OD_m * V_m)}{V_b} \right] - OD_f \right\} * \frac{V_b}{V_m}$$

- DBO₅ = Demanda Bioquímica de Oxígeno.
- OD_{ad} = Oxígeno disuelto del agua en dilución.
- V_{ad} = Volumen del agua en dilución.
- OD_m = Oxígeno Disuelto de la muestra utilizada.
- V_m = Volumen de la muestra utilizada.
- V_b = Volumen de la botella para incubación.
- OD_f = Oxígeno Disuelto final de la dilución.

Determinación de la Demanda Química de Oxígeno.

Se utilizó el método normalizado de oxidación al dicromato (reflujo abierto) Este método se llevó a cabo calentando en condiciones de reflujo total (abierto), una muestra de volumen determinado con un exceso conocido de dicromato de potasio (K₂Cr₂O₇) en presencia de ácido sulfúrico (H₂SO₄), durante un período de dos horas. La materia orgánica en la muestra se oxida. Como resultado, se consume el dicromato de color amarillo que se reemplaza por el ión crómico de color verdoso. Como catalizador se empleó sulfato de plata (Ag₂SO₄); la medición se llevó a cabo por valoración titulométrica del dicromato restante con una solución valorada de sulfato ferroso amoniacal [Fe(NH₄)₂(SO₄)₂.6H₂O] (Ramalho,2003).

3.3.2. Determinación del efecto de la aplicación de ozono en la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos domiciliarios con tres valores de pH diferentes a escala de laboratorio.

Después de aplicar los tratamientos a los lixiviados procedentes de residuos sólidos con 40%, 60% y 80% de materia orgánica, se tomaron, nuevas muestras de cada lixiviado y se modificaron sus pH a valores aproximados 5, 7 y 9, adicionando HCl y NaOH, para llevar los lixiviados a los pH requeridos. Luego se aplicó el flujo de ozono por una hora, para luego, filtrar las muestras y determinar la DBO₅ y la DQO.

3.3.3. Cálculo y comparación de la variación de la biodegradabilidad por efecto de la aplicación de ozono a un lixiviado de residuos sólidos domiciliarios procedente de diferentes porcentajes de materia orgánica y a pH diferentes a escala de laboratorio.

Después de determinar la DBO₅ y DQO, del lixiviado antes y después de cada tratamiento, se calculó el índice de biodegradabilidad inicial y final y se procedió a determinar y a comparar la variación de este valor en cada tratamiento.

Para el cálculo de la biodegradabilidad de la unidad experimental, se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Biodegradabilidad} = \frac{\text{DBO}_{\text{muestra}}}{\text{DQO}_{\text{muestra}}}$$

Para el cálculo del porcentaje de variación de la biodegradabilidad por efecto del tratamiento, se utilizó la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{Biodegradabilidad}(\text{inicial}) - \text{Biodegradabilidad}(\text{final})}{\text{Biodegradabilidad}(\text{inicial})} \times 100$$

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Determinación del efecto de la aplicación de ozono en la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos domiciliarios con tres porcentajes diferentes de materia orgánica putrescible a escala de laboratorio

Se implementó el sistema experimental que constó de un ozonizador de laboratorio, posteriormente se construyó una cámara de vidrio de 8 mm de espesor con 3 compartimentos de 1 litro cada uno.



Figura 5. Sistema experimental implementado para la investigación



Figura 6. Lisímetro construido para la generación de lixiviados

Con el lisímetro construido para la investigación, se logró la generación y percolación de lixiviados en las condiciones propuestas inicialmente, en su interior, fue acondicionado con grava de 1 pulgada de tamaño, respecto al espacio interior y condiciones de la carga de residuos ingresada fue adecuada para la producción de

lixiviados, lo cual evidenció condiciones favorables para la degradación progresiva de componentes orgánicos, que mostraron mayor producción de lixiviados cuanto mayor es el porcentaje de materia orgánica biodegradable.

En el interior del lisímetro se generan condiciones biológicas y fisicoquímicas que afectan la carga del medio en el caso de los residuos estas reacciones sucederían en una celde de relleno sanitario (Aragón et al.,2016).

Von Buchwlad y Martinez (2018), desarrollaron una investigación, para validar la generación de lixiviados en lisímetros utilizando cargas de residuos con diferentes porcentajes de materia orgánica putrescible, estos investigadores reportaron que la producción de lixiviados en lisímetros se produjo cuando la materia orgánica putrescible fue mayor al 43%, sin embargo en la presente investigación se logró la producción de lixiviados trabajando con una carga de 40% de residuos orgánicos biodegradables, al respecto es importante mencionar que las diferencias en los tamaños de lisímetros y de carga de residuos en ambos casos, en la investigación de referencia mencionada los lisímetros tenían una carga de 1,2 T, mientras que en el presente estudio se trabajó con 10 kg de carga.

Tabla 4. Características fisicoquímicas básicas de los lixiviados obtenidos

| Parámetro | Lixiviado 40% de residuos orgánicos biodegradables | Lixiviado 60% de residuos orgánicos biodegradables | Lixiviado 80% de residuos orgánicos biodegradables |
|-------------------------|--|--|--|
| pH | 8.1 | 7.9 | 7.6 |
| ST (mg/L) | 18340 | 21890 | 23689 |
| DBO ₅ (mg/L) | 5600 | 7931 | 9629 |
| DQO (mg/L) | 16004 | 19227 | 22335 |

Los parámetros fisicoquímicos evaluados muestran comportamientos distintos, así tenemos que para el caso del pH de los lixiviados obtenidos, este presentó valores decrecientes, conforme aumentó el porcentaje de materia orgánica biodegradable

de los residuos sólidos, esto podría deberse a la presencia de compuestos nitrogenados, producto de la degradación de la materia orgánica, que se mantienen en el lixiviado a la espera de la acción de una mayor concentración de microorganismos que realicen la oxidación de estos compuestos nitrogenados. De esta manera podríamos explicar la disminución del pH conforme incrementa el porcentaje de residuos sólidos de naturaleza orgánica biodegradable.

Roblez-Martínez et al., (2011), realizaron una investigación para evaluar el comportamiento de los lixiviados de un relleno sanitario en México, que estaba conformado por cuatro macroceldas, donde tres de estas no contaban con geomembranas, al evaluar los pH de los lixiviados encontraron valores de 7,14 hasta 10, estos autores atribuyen este amplio rango de pH al contacto de los contaminantes de los lixiviados con los suelos salinos.

En este estudio se acondicionaron los pH a 5, 7 y 9, los cuales al ser relacionados con la edad de un lixiviado corresponderían a lixiviados de diferentes edades, ya que un lixiviado joven es naturalmente ácido y conforme pasa el tiempo se va alcalinizando. Según los resultados mostrados en la Tabla 4, el lixiviado proveniente de residuos sólidos con 40% de materia orgánica sería el de mayor antigüedad.

Mientras más joven es un relleno sanitario, es muy probable que los lixiviados sean ácidos, algunos autores mencionan que el pH en un relleno sanitario va evolucionando desde valores ácidos en la etapa de operación, hasta valores alcalinos, años después de su clausura (Pillay 1985; Diamadopoulou 1994; Ozturk et al. 1999; Inanc et al. 2000).

Noerfitriyani et al.(2018) evaluaron un relleno sanitario en Indonesia, para conocer la eficiencia del tratamiento de lixiviado en las laguna de maduración, ellos mencionan que los lixiviados tienen pH variables según el tiempo de maduración, tal es así que, el valor de pH del efluente del estanque anaeróbico va aumentando progresivamente, lo que indica que el proceso anaeróbico ha entrado en la etapa final, elevando la alcalinidad que permite que los microorganismos metanogénicos puedan vivir. Los ácidos volátiles se convertirán en metano y dióxido de carbono (CO₂), mientras que la materia orgánica disminuye ya que su solubilidad disminuirá debido al valor de pH aumentado. Supuestamente, el valor de pH disminuirá en la laguna de maduración debido a la

hidrólisis de la materia orgánica en el proceso aeróbico, que resultó en la disminución del valor de pH y la disolución mineral.

El comportamiento de la concentración de sólidos totales es un incremento directamente proporcional a la concentración de sólidos totales, el cual se explica por la acción de los microorganismos que resultan con mayor crecimiento ante la presencia de más sustrato, desarrollando la degradación de la materia orgánica que va generando mayor cantidad tanto de sólidos suspendidos y también disueltos.

Méndez et al. (2004) mencionan que los lixiviados, las aguas residuales y los residuos líquidos industriales en muchos casos, posee una gran dispersión de diversos tamaños de partículas, es importantes este punto cuando se requiere remover estos contaminantes mediante la aplicación de contaminantes, en tal caso el pH cumple una función muy importante para una óptima remoción de partículas suspendidas. Jensen y Christensen (1999) determinaron que las partículas que le infieren turbiedad a los lixiviados son de tamaño coloidal y su tamaño está en el rango de 0.1 a 40 μm y que el parámetro asociado con esta concentración es el carbón orgánico total.

Los valores de DBO_5 y DQO, se incrementaron en forma directa a los porcentajes de materia orgánica biodegradable en los residuos sólidos, lo cual basándonos en que la demanda bioquímica de oxígeno es el consumo de oxígeno de los microorganismos para biodegradar la materia orgánica, los resultados indican que la reproducción de microorganismos es mayor, ante la presencia de mayor cantidad de sustrato. Del mismo modo la DQO es el parámetro que representa la cantidad de oxígeno para oxidar el material orgánico presente y conforme a los resultados la presencia de un mayor porcentaje de materia orgánica implica mayor consumo de oxígeno.

En la investigación los valores de DBO y DQO se incrementaron según el porcentaje de materia orgánica en los residuos sólidos utilizados para la generación de lixiviados. La alta concentración de DBO es causada por los residuos orgánicos contenidos en el tratamiento anaeróbico que no pueden ser degradados en cantidad abundante. La concentración de DQO de efluentes aumenta debido a la ausencia de aireación y la presencia de residuos de materia orgánica (Malina,1992).

4.2. Determinación del efecto de la aplicación de ozono en la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos domiciliarios con tres valores de pH diferentes a escala de laboratorio.

Tabla 5. Valores de DBO₅ y DQO de lixiviados con diferentes porcentajes de residuos orgánicos biodegradables a diferentes pH, después de la aplicación de ozono.

| Lixiviado | pH | DBO ₅ (mg/L) | DQO (mg/L) |
|--|-----|-------------------------|------------|
| 40% de residuos orgánicos biodegradables | 5.0 | 8200.3 | 16004.7 |
| | 7.0 | 6742.3 | 13973.3 |
| | 9.0 | 5054.0 | 11668.7 |
| 60% de residuos orgánicos biodegradables | 5.0 | 10931.7 | 19227.0 |
| | 7.0 | 8953.3 | 18077.7 |
| | 9.0 | 6915.3 | 11405.3 |
| 80% de residuos orgánicos biodegradables | 5.0 | 12629.3 | 22335.7 |
| | 7.0 | 9738.3 | 17469.3 |
| | 9.0 | 8531.0 | 15157.7 |

En la Tabla 5, se puede observar que la aplicación de ozono a los lixiviados con distintos valores de pH dio como resultado la reducción de la DBO₅ y DQO en forma inversa al pH, comportamiento que se observó en los tres lixiviados. El pH de una solución está definido por la concentración de iones hidrogeno y iones hidroxilo, dando así la tendencia a la acidez, alcalinidad o neutralidad, por otro lado la aplicación del ozono en una solución alcalina genera la posibilidad de reaccionar y liberar oxígeno molecular, esta podría ser la razón por la cual con mayor pH de lixiviado, menor es el valor de la demanda de oxígeno para la degradación de la materia orgánica, es decir a menor concentración de iones hidroxilos en la solución, menor formación de oxígeno por efecto de la ozonización y por ende menor es la concentración de oxígeno disuelto en el lixiviado.

Wang et al. (2003), mencionan que las reacciones del ozono se pueden producir en forma directa con algún compuesto orgánico desarrollándose una reacción lenta y selectiva, así también puede reaccionar de manera indirecta con los compuestos que se forman cuando el ozono se descompone en agua o un medio acuoso ya que se generan reacciones radicalarias favorecidas en medio alcalino. La ozonización es sensiblemente más eficiente en medios alcalinos (Cortez et al., 2010)

La eficiencia de la ozonización para la degradación de compuestos orgánicos presentes en un lixiviado está basada principalmente en el proceso de oxidación, el cual en forma progresiva logra la mineralización de diversos compuestos orgánicos (Huang et al., 2019).

Al aplicar la ozonización a un lixiviado, se produce en forma directa una reacción redox, entre el ozono y los compuestos orgánicos del lixiviado. Otra alternativa de reacción es la reacción indirecta, donde se producen radicales OH que por su potencial energético y actividad desarrollan reacciones en cadena, de iniciación, propagación y terminación (Ikehata y Li, 2018). El potencial del radical OH propicia la ruptura de los anillos en compuestos orgánicos tóxicos, e incrementa la biodegradabilidad. Entre las alternativas mencionadas la reacción indirecta es la que muestra mayor eficiencia (Huang et al., 2019).

La aplicación de O₃ como tratamiento de lixiviados tiene la capacidad de remover contaminantes de formas distintas, con influencia de las condiciones de pH (Huang et al., 2019). Referente a los valores de pH, estos varían según la etapa de las reacciones, desarrollando reacciones de iniciación para un pH ácido a neutro y reacciones de propagación y terminación para un pH alcalino (Ikehata y Li, 2018).

El valor de pH es determinante en la eficiencia de remoción de carga orgánica de los lixiviados, ya que pH ácidos, la remoción de contaminantes es causada por la reacción química directa del ozono con los compuestos orgánicos. Los resultados de la investigación referente a influencia del pH en la remoción de compuestos orgánicos se pueden comparar con los obtenidos Kattel et al. (2016) quienes con la ozonización reportaron una remoción del 45% de DBO₇ y 18% de toxicidad en medio ácido y del 65% de DBO₇ y 23% de toxicidad en medio alcalino, efecto que se atribuye a la oxidación indirecta de los radicales OH.

Según Becerra-Moreno et al. (2021), la aplicación de una ozonización a lixiviados en medio alcalino incrementa la concentración de $\text{NH}_3\text{-N}$ y $\text{NO}_3\text{-N}$. Este efecto podría ser por la liberación de grupos amino que provienen de la degradación de las sustancias húmicas u otros compuestos orgánicos nitrogenados. Cuando el medio es alcalino inicialmente favorece la remoción de color y compuestos absorbentes UV254, por medio de procesos de generación de radicales OH u otras especies.

4.3. Cálculo y comparación de la variación de la biodegradabilidad por efecto de la aplicación de ozono a un lixiviado de residuos sólidos domiciliarios procedente de diferentes porcentajes de materia orgánica y a pH diferentes a escala de laboratorio.

Tabla 6. Biodegradabilidad de los lixiviados generados con diferentes porcentajes de residuos orgánicos biodegradables, antes y después de la aplicación de la ozonización.

| Lixiviado | pH inicial | Biodegradabilidad inicial antes de ozonización | pH | Biodegradabilidad después de ozonización |
|--|------------|--|-----|--|
| 40% de residuos orgánicos biodegradables | | | 5,0 | 0,51 |
| | 8,1 | 0,35 | 7,0 | 0,48 |
| | | | 9,0 | 0,43 |
| 60% de residuos orgánicos biodegradables | | | 5,0 | 0,57 |
| | 7,9 | 0,42 | 7,0 | 0,50 |
| | | | 9,0 | 0,61 |
| 80% de residuos orgánicos biodegradables | | | 5,0 | 0,57 |
| | 7,6 | 0,43 | 7,0 | 0,56 |
| | | | 9,0 | 0,56 |

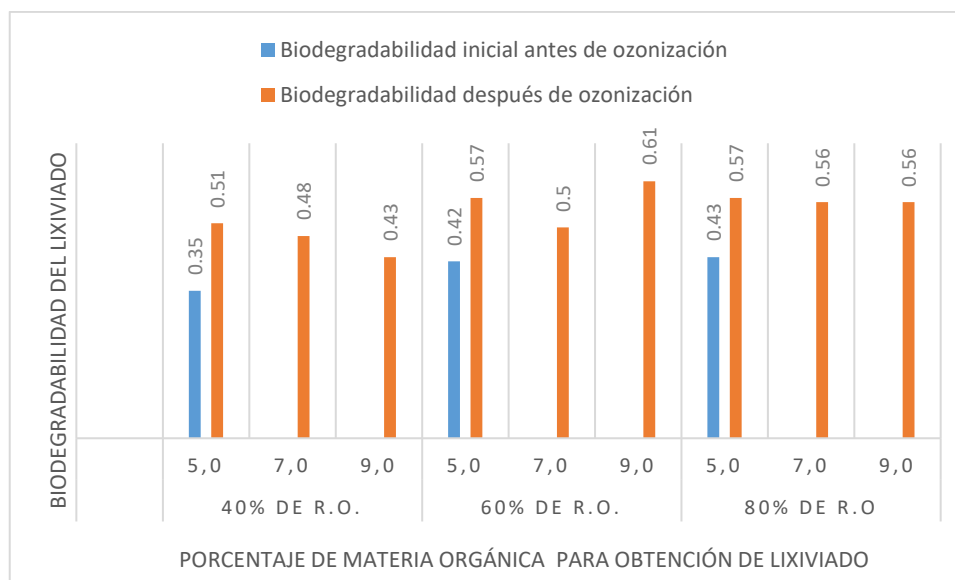


Figura 7. Variación de la biodegradabilidad del lixiviado a los diferentes pH por efecto de la ozonización

La Tabla 6, muestra la biodegradabilidad de los lixiviados que provienen de diferentes porcentajes de materia orgánica biodegradable, acondicionados a diferentes pH y se observa que, en el valor de pH 5, el lixiviado es más biodegradable en los tres casos, esto se relaciona con el incremento de la demanda bioquímica de oxígeno, ya que la ozonización de los lixiviados con pH ácido presenta mayor DBO₅. También se debe mencionar que el tratamiento que resultó con mayor biodegradabilidad fue el lixiviado proveniente de residuos con 60% de materia orgánica a pH 9. Finalmente se puede agregar que cuando se aplica una ozonización a un lixiviado, el efecto es el incremento de su biodegradabilidad como se puede ver en todos los casos.

Tizaoui et al. (2007) refieren que se ha estudiado el uso del ozono para la oxidación de diversos efluentes, con resultados prometedores en la degradación de los lixiviados de los vertederos que implican considerables agotamientos de la demanda química de oxígeno y color, también con la ventaja del aumento de la biodegradabilidad.

En este estudio se pudo comprobar que la ozonización, incrementa la biodegradabilidad de los lixiviados, así como también en dos de los casos, la ozonización con el pH ajustado a un valor ácido, resultó con mayor biodegradabilidad, este resultado coincide de alguna manera con lo mencionado por Martins y Quinta-Ferreira (2011), cuando mencionan que en su estudio la ozonización única condujo a un aumento de la

DBO₅/DQO, lo que favorecería la actividad biológica incluso si solo se produjo una eliminación moderada de DQO. Además, pudieron concluir que el proceso de oxidación es fuertemente dependiente del pH inicial.

De hecho, la oxidación del ozono sigue dos vías principales: a nivel de pH ácido, la molécula de ozono es capaz de realizar un ataque electrofílico sobre los contaminantes mientras que para condiciones alcalinas la descomposición de ozono y generación de radical hidroxilo (OH) es promocionado dando lugar a reacciones de degradación por radicales en cadena, para valores intermedios de pH, existe la combinación de ambas vías, y su eficacia puede variar según las características del efluente (Gogate y Pandit, 2004).

Amaral-Silva et al. (2016), investigaron la influencia de la ozonización en la biodegradabilidad de un lixiviado y reportaron como resultado que el agotamiento de DQO no depende del pH, hasta que se haya eliminado al menos el 10 % de la DQO. Sin embargo, el uso de valores altos de pH mejoró la eficiencia del proceso, con mejores resultados para el agotamiento de DQO a pH 9 (disminución del 34 %) mientras que se obtiene una muy ligera reducción de la DQO luego de la adición de 1800 mg de O₃ a pH 3, durante 180 min de reacción. Estos resultados coinciden con los obtenidos en la presente investigación, donde se pudo tener una reducción de la DQO.

Derco et al. (2002), al realizar un tratamiento de ozonización por un periodo de tiempo de 10.5 a 11 horas a lixiviados pretratados biológicamente, obtuvieron que la biodegradabilidad expresada como la relación DBO₅/DQO aumentó de cero hasta un valor máximo de 0,21, correspondiente a 0,7 mg de ozono consumido por cada mg de DQO inicialmente presente en el lixiviado. Aunque las condiciones de la presente investigación difieren en cuanto al periodo de ozonización, es importante contrastar los resultados, y podemos afirmar que hay coincidencia en cuanto al incremento de la biodegradabilidad, aunque numéricamente hay diferencia de incrementos, siendo mayores los valores de biodegradabilidad obtenidos.

Tabla 7. Porcentaje de variación de la biodegradabilidad de los lixiviados generados con diferentes porcentajes de residuos orgánicos biodegradables, antes y después de la aplicación de la ozonización.

| Lixiviado | Biodegradabilidad inicial antes de ozonización | pH del lixiviado | Biodegradabilidad después de ozonización | Porcentaje de variación de la biodegradabilidad (%) |
|--|--|------------------|--|---|
| 40% de residuos orgánicos biodegradables | 0,35 | 5,0 | 0,51 | 46,78 |
| | | 7,0 | 0,48 | 38,52 |
| | | 9,0 | 0,43 | 23,76 |
| 60% de residuos orgánicos biodegradables | 0,42 | 5,0 | 0,57 | 35,35 |
| | | 7,0 | 0,50 | 17,94 |
| | | 9,0 | 0,61 | 44,79 |
| 80% de residuos orgánicos biodegradables | 0,43 | 5,0 | 0,57 | 31,79 |
| | | 7,0 | 0,56 | 29,65 |
| | | 9,0 | 0,56 | 30,99 |

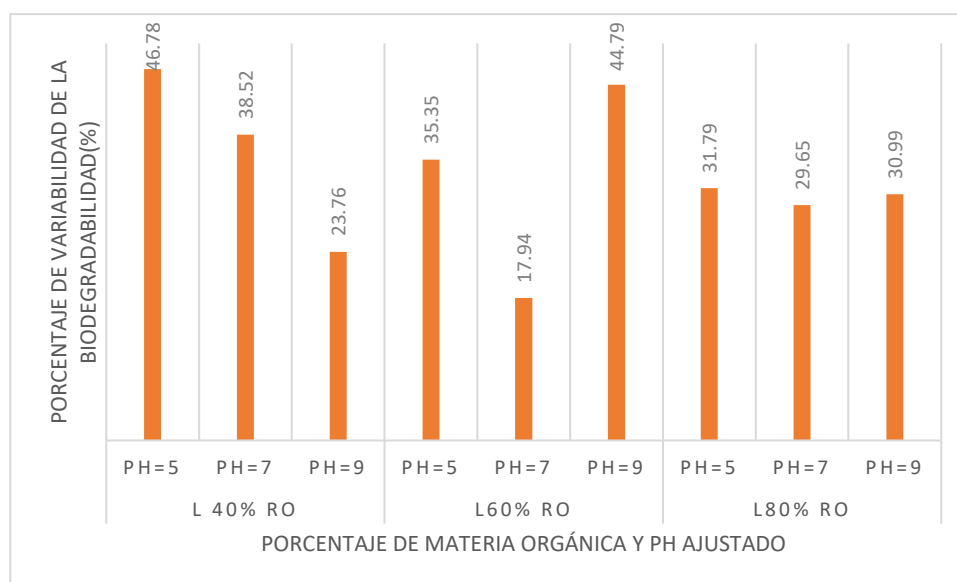


Figura 8. Porcentaje de variación de la biodegradabilidad del lixiviado a los diferentes pH por efecto de la ozonización

En la Tabla 7, podemos observar que el mayor porcentaje de variación de la biodegradabilidad de los lixiviados es 46.78% en el lixiviado con 40% de materia orgánica de los residuos sólidos a un pH de 5, mientras que el menor impacto de la ozonización sobre la variación de la biodegradabilidad se produjo en el lixiviado con 60% de materia orgánica biodegradable a un pH de 7. Sin embargo, es necesario mencionar que los efectos de la ozonización sobre biodegradabilidad del lixiviado proveniente de 80% de materia orgánica de los residuos sólidos en los tres pH evaluados, son similares.

Bila et al (2005), desarrollaron una investigación para evaluar la eficiencia de la ozonización como un tratamiento complementario a la coagulación-floculación de un lixiviado de 11 meses de edad, para incrementar su biodegradabilidad. La biodegradabilidad del lixiviado de la investigación era baja, con un valor de 0.05; estos investigadores reportaron como resultados que el tratamiento fisicoquímico condujo a niveles de remoción de DQO de 40%, con el uso de $Al_2(SO_4)_3$. La secuencia de tratamientos arrojó buenos resultados, con un aumento de la relación DBO_5/DQO de 0,05 a 0,3 después de la ozonización, donde los pH de los tratamientos variaron entre 4 y 10, que comparados con los pH de la presente investigación que son de 5 a 9 y el incremento consiguiendo una mayor biodegradabilidad va desde 17,94 hasta 46,78%, a este resultado debemos agregar que la edad del lixiviado fue mucho menor, condición que favoreció su actividad microbológica.

Bernardo et al. (2014), evaluaron la mejora de la biodegradabilidad de un lixiviado maduro de una edad superior a los 20 años, con la aplicación de un proceso fenton, variando el pH del lixiviado de 2 a 6, los resultados demostraron que a un pH de 3.5 se obtenía la mayor eficiencia de mejora de la biodegradabilidad que incrementó de 0.11 a 0.37. Aunque la tecnología aplicada es diferente a la de la presente investigación, se podría decir que hay una coincidencia en cuanto a la obtención de la mejor biodegradabilidad a pH ácido, sin embargo, también se obtuvo una significativa biodegradabilidad a pH básico, con el lixiviado de 60% de materia orgánica en los residuos sólidos, en este caso sería una limitante del proceso fenton. Es un proceso que necesita ajustar el pH a valores entre 2 a 3.5 (Nogueira y Guimarães,2000).

Wu et al. (2004), investigaron el tratamiento de lixiviados, mediante la aplicación de procesos de oxidación avanzada basadas en el uso de ozono, considerando el tratamiento con ozono, el ozono-peróxido de hidrogeno y ozono-radiación UV. En las

características del lixiviado indican que el pH es de 8.1 y que inicialmente el lixiviado fue coagulado con tricloruro de hierro antes de la aplicación de los tratamientos. El mejor resultado para la biodegradabilidad fue el que se realizó solo con ozono, consiguiendo un incremento de biodegradabilidad de 0.06 a 0.5. Resultado que fortalece los conseguidos en la presente investigación utilizando únicamente la ozonización, con la diferencia de la edad del lixiviado.

4.4. Análisis estadístico

Se realizó el análisis estadístico de los datos experimentales (ver anexo B), de aquí se puede verificar que de los tratamientos aplicados, la ozonización de lixiviados provenientes de residuos sólidos con diversos porcentajes de materia orgánica, si influye en su biodegradabilidad ya que según el análisis realizado la biodegradabilidad del lixiviado de residuos sólidos con 40% de materia orgánica es diferente a la de los lixiviados con 60% y 80% de materia orgánica, sin embargo entre estos dos últimos no existe diferencia significativa. Para el caso del pH, el análisis estadístico, muestra que esta variable no influye significativamente en la biodegradabilidad de los lixiviados evaluados. Por otro lado, en esta investigación se rechaza la hipótesis nula, ya que el efecto de la aplicación de la ozonización, si incrementa la biodegradabilidad de lixiviados.

Tabla 8. Resumen del análisis estadístico de los datos experimentales

| Variable | N | R ² | R ² Aj | CV |
|-----------------------------------|----|----------------|-------------------|------|
| Biodegradabilidad con ozonización | 27 | 0.48 | 0.39 | 9.07 |

Test: Duncan Alfa=0.05, Error: 0.0023 gl: 22

| % de Residuos Orgánicos en Lixiviado | Medias | n | EE | |
|--------------------------------------|--------|---|------|---|
| 40% | 0.48 | 9 | 0.02 | A |
| 60% | 0.56 | 9 | 0.02 | B |
| 80% | 0.56 | 9 | 0.02 | B |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Test: Duncan Alfa=0.05, Error: 0.0023 gl: 22

| pH del Lixiviado | Medias | n | EE |
|------------------|--------|---|--------|
| 7 | 0.51 | 9 | 0.02 A |
| 9 | 0.53 | 9 | 0.02 A |
| 5 | 0.55 | 9 | 0.02 A |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

V. CONCLUSIONES

1. La biodegradabilidad de un lixiviado es directamente proporcional a la concentración de residuos sólidos orgánicos biodegradables. A su vez la aplicación de ozono a un lixiviado de residuos sólidos domiciliarios con porcentajes diferentes de materia orgánica putrescible incrementa su biodegradabilidad
2. La aplicación de ozono a lixiviados de residuos sólidos con 40% de materia orgánica biodegradable con pH ácido resultó con mayor incremento de la biodegradabilidad. Así mismo la aplicación de ozono a lixiviados de residuos sólidos con 60% de materia orgánica biodegradable con pH neutro (7) resultó con menor incremento de la biodegradabilidad
3. La mayor biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos domiciliarios por efecto de la ozonización se obtuvo con el lixiviado procedente de residuos con 60% de materia orgánica con un pH de 9. Así mismo la menor biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos domiciliarios por efecto de la ozonización se obtuvo con el lixiviado procedente de residuos con 40% de materia orgánica con un pH de 9.
4. En el proceso de ozonización de un lixiviado el pH, influye en la variación de la biodegradabilidad.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

1. Es importante plantear la ozonización como un tratamiento previo a la depuración biológica de un lixiviado, por tal razón es necesario investigar el acondicionamiento del lixiviado para posteriores tratamientos sean del tipo biológico o avanzado.
2. Realizar investigaciones considerando diferentes flujos de ozono, a fin de determinar si tiene un impacto positivo en la biodegradabilidad de lixiviado.
3. Desarrollar investigaciones para evaluar el grado de mineralización del lixiviado por efecto de combinación tecnológica de procesos de oxidación avanzada.
4. Implementar sistemas de ajuste de pH de los lixiviados, previo a la aplicación de su tratamiento, para favorecer la biodegradabilidad de acuerdo con el proceso que se aplique.
5. Desarrollar investigaciones de la influencia de nitritos y nitratos en los procesos de oxidación con ozono, para verificar el porcentaje de influencia que tienen estos componentes nitrogenados en el momento de la oxidación de los lixiviados.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AINIA,(2013). La oxidación avanzada y sus aplicaciones para contaminantes en aguas. [En línea]:AINIA,(<https://www.ainia.es/ainia-news/la-oxidacion-avanzada-y-sus-aplicaciones-para-contaminantes-en-aguas/> ,artículo, 10 mar,2022).
- Amaral-Silva, N., Martins, RC, Castro-Silva, S., & Quinta-Ferreira, RM (2016). Ozonización y perozonización en la mejora de la biodegradabilidad de un lixiviado de vertedero. *Revista de Ingeniería Química Ambiental*, 4(1), 527–533. doi:10.1016/j.jece.2015.12.002.
- Bablon, G.; Bellamy, W.; Bourbigot,M.; Daniel, F.; Doré, M.; Erb, F.; Gordon, G.; Langlais, U.; Laplanche, A.; Legube, B.; Martin, G.; Masschelein, W.; Pacey, G.; Reckhow, D. and Ventresque, C. (s.d.) Fundamental aspects. In Langlais, B.; reckhow, D.A. and Brink, D.R. *Ozone in water treatment. Application and Engineering*. pp: 11- 132. Ed. Lewis
- Becerra-Moreno, D., Rubio-Gomez, Y, Ramírez-Ríos, L. F., Barajas-Solano , A. F, Machuca Martínez, F.(2021). Procesos Avanzados De Oxidación Basados En Ozono Como Alternativa De Tratamiento Para Lixiviados De Rellenos Sanitarios. *Ciencia en Desarrollo*, 12(2). <https://doi.org/10.19053/01217488.v12.n2.2021.12503>.
- Bernardo-Bricker, AR, Singh, SK, Trovó, AG et al. (2014).Mejora de la biodegradabilidad de lixiviados maduros de vertederos utilizando el proceso Fenton bajo diferentes factores de carga de DQO. *Reinar. Proceso*. 1 , 207–219. <https://doi.org/10.1007/s40710-014-0016-8>.
- Bes, S., Silva, A., Bengoa C., (s.d.) Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales, Red de Tratamiento y reciclaje de aguas industriales mediante soluciones sostenibles fundamentadas en procesos biológicos. (TRITÓN-316RT0506), PROGRAMA CYTED ISBN: 978-84-09-08637-5.
- Bila, D. M., Filipe Montalvão, A., Silva, A. C., & Dezotti, M. (2005). Ozonation of a landfill leachate: evaluation of toxicity removal and biodegradability improvement. *Journal of Hazardous Materials*, 117(2-3), 235–242. doi:10.1016/j.jhazmat.2004.09.022
- Cortez S., Teixeira P., Oliveira R., Mota M.(2010) Ozonation as polishing treatment of mature landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*, 182, 730-734.
- Damián, Y. (2018) Tratamiento de lixiviados en la etapa de compostaje mediante el proceso de coagulación con mucilago de Opuntia Ficus Indica [Tesis para optar el Grado Académico de Maestro en Ingeniería Ambiental] Universidad Nacional del Centro del Perú – Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química – Huancayo – Perú.
- Derco, J., Gulyásová, A., Horňák, M.(2001). Influence of Ozonation on Biodegradability of Refractory Organics in a Landfill Leachate, *Chem. Pap.* 56 (1) 41|44
- Environmental Protection Agency. (2006). Obtenido de [https:// www.epa.gov/](https://www.epa.gov/).
- F Wang, D Smith, M Gamal. Application of advanced oxidation methods for landfill leachate treatment - A review. *J. Environ. Eng. Sci.*, 2, 413-427 (2003).

- Giraldo, E., 2014. Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: Avances recientes, *Revista de Ingeniería*, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, 10.16924/riua.v0i14.538.
- Gogate, P., Pandit, A. (2004) A review of imperative technologies for wastewater treatment I: oxidation technologies at ambient conditions, *Adv. Environ. Res.* 8 ,501–551
- Hernandez R., Fernandez C. Baptista M. (2010). *Metodología de la Investigación*, McGraw-Hill / Interamericana editores, s.a. de c.v.. Quinta Edición.
- Huang, Z., Gu, Z., Wang, Y., Zhang, A. (2019). Improved oxidation of refractory organics in concentrated leachate by a Fe²⁺-enhanced O₃/H₂O₂ process, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, (26), 35, 35797-35806.
- Ikehata H., Li, Y. (2018). Ozone-Based Processes, in *Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: Emerging Green Chemical Technology*, Elsevier Inc., 115-134.
- Kattel, E., Kivi, A., Klein, K., Tenno, T., Dulova, N., and Trapido, M., (2016). Hazardous waste landfill leachate treatment by combined chemical and biological techniques, *Desalin. Water Treat.* (57) 28, 13236-13245.
- León-Chimbolema J., Andrade-Borja B. (2021). Tratamiento biológico complementario para lixiviados como alternativa para mitigar la contaminación ambiental. Caso: botadero “Curgua”, *Revista Pol. Con.* Edición núm. 59, Vol. 6, No 6, Junio 2021, pp. 1099-1115, ISSN: 2550 - 682X.
- Malina, Joseph F, Pohland, Frederick G. *Design of Anaerobic Processes for The Treatment of Industrial and Municipal Wastes*. USA: Technomic Publishing Company, Inc, 1992.
- Martins, R., Quinta-Ferreira, R., (2011). Phenolic wastewaters depuration and biodegradability enhancement by ozone over active catalysts, *Desalination* 270 ,90–97.
- Ministerio del Ambiente, (2012). *Glosario de términos para la gestión ambiental peruana*. Vice ministerio de Gestión Ambiental , pdf [En línea] (<http://siar.minam.gob.pe/puno/sites/default/files/archivos/public/docs/504>, documento, 10 de marzo de 2022).
- Najera, H., (s.d.) Lixiviados: ¿Qué son? ¿Cómo se clasifican?, UNICACH- NAS JOME.
- Nogueira RFP, Guimarães JR (2000) Photodegradation of dichloroacetic acid and 2, 4-dichlorophenol by ferrioxalate/H₂O₂ system. *Water Res* 34:895–901
- Ottenbrite, T., Albertsson H., (1992). *Discussion on degradation terminology: Biodegradable Polymers and Plastics*. The Royal Society of Chemistry Cambridge, RU, 73-92.
- Pellón A., López M., Espinosa M., Escobedo R., (2009). Tecnología para el tratamiento de lixiviados provenientes de vertederos de residuos sólidos urbanos. *Tecnología Química*, XXIX ,113-121. [fecha de Consulta 10 de Marzo de 2022]. ISSN: 0041-8420. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543761014>.
- Peng Yao, (2017). Perspectives on technology for landfill leachate treatment, *Arabian Journal of Chemistry*, Volume 10, Supplement 2, May 2017, Pages S2567-S2574. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.09.031>.

- Peña, D. (2013). Determinación de la relación DQO/DBO5 en aguas residuales. Pocovi. (2003). Investigación cualitativa: Una alternativa viable. ITESO. México.
- Ramalho, R., (2003). Tratamiento de Aguas Residuales. Barcelona: España, Editorial Reverté, S.A.
- Rosal, R., (2019). Ecuaciones y cálculos para el tratamiento de aguas, Capítulo 51: Ozonización, Editorial Paraninfo, ISBN 13: 9788428341523, ISBN 10: 8428341524.
- SENAMHI. s.d. Guía climática turística. Ed. por F. Cuba y N. Ita. Lima, Perú, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. 216 p.
- SINIA, 2017. Generación per cápita de residuos sólidos domiciliarios por departamento, [En línea]: MINAM, (<https://sinia.minam.gob.pe/indicador/1601>, 10 mar. 2022).
- Suero D. (2022). Manejo de lixiviados de la fracción orgánica de los residuos sólidos del relleno sanitario de Anta, Cusco, Perú[Tesis para optar el grado de Magister Scientiae en Ciencias Ambientales].Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Tello Espinoza, Pilar, & Fernández VillaGómez, Georgina. (2012). Evaluación de la generación de lixiviados en pacas impermeabilizadas de residuos sólidos urbanos: Experimento a gran escala. Revista internacional de contaminación ambiental, 28(Supl. 1), 85-89. Recuperado en 18 de abril de 2023, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992012000500012&lng=es&tlng=es.
- Tizaoui, C., Bouselmi, L., Mansouri, L., Ghrabi, A.(2007).Landfill leachate treatment with ozone and ozone/hydrogen peroxide systems, J. Hazard. Mater. 140, 316–324.
- Vázquez, G., Beltrán, R, (2004). Pruebas Normalizadas para la Evaluación de la Biodegradabilidad de Sustancias Químicas. Estado de Hidalgo, México.
- Von Buchwald F., Martínez, P. (2018). Producción de lixiviados, comparación del método de tchobanoglous con experimentos en lisímetros, Rev. del Instituto de Investigación, FIGMMG-UNMSM, Vol 21 N° 42, 2018: 6Waste Atlas Report. (2013).
- Waste Atlas Report, (2013). Obtenido de Waste Atlas Report www.d-waste.com 3 – 76.
- Wu J., Chih-Chao Wu , Hong-Wen Ma, Chia-Chi Chang (2004). Treatment of landfill leachate by ozone-based advanced oxidation processes. Chemosphere 54 : 997–1003, doi:10.1016/j.chemosphere.2003.10.006.
- Zafra-Mejía, c, Romero-Torres, D,(2019). Tendencias tecnológicas de depuración de lixiviados en rellenos sanitarios iberoamericanos, Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 18(35) p, pp. 125-147, ISSN (en línea): 2248-4094, <https://doi.org/10.22395/rium.v18n35a8>.

VIII. ANEXOS

8.1. Panel fotográfico



Figura 9. Preparación de las cubas de vidrio para la cámara de ozonización



Figura 10. Ensamblaje de las partes del lisímetro para la instalación del sistema experimental,



Figura 11. Segregación de los residuos orgánicos para la carga del lisímetro según los objetivos de la investigación.



Figura 12. Acondicionamiento de la grava para implementación en la base del interior del lisímetro.



Figura 13. Prueba de cerrado del lisímetro



Figura 14. Vaciado de la grava para la base del lisímetro

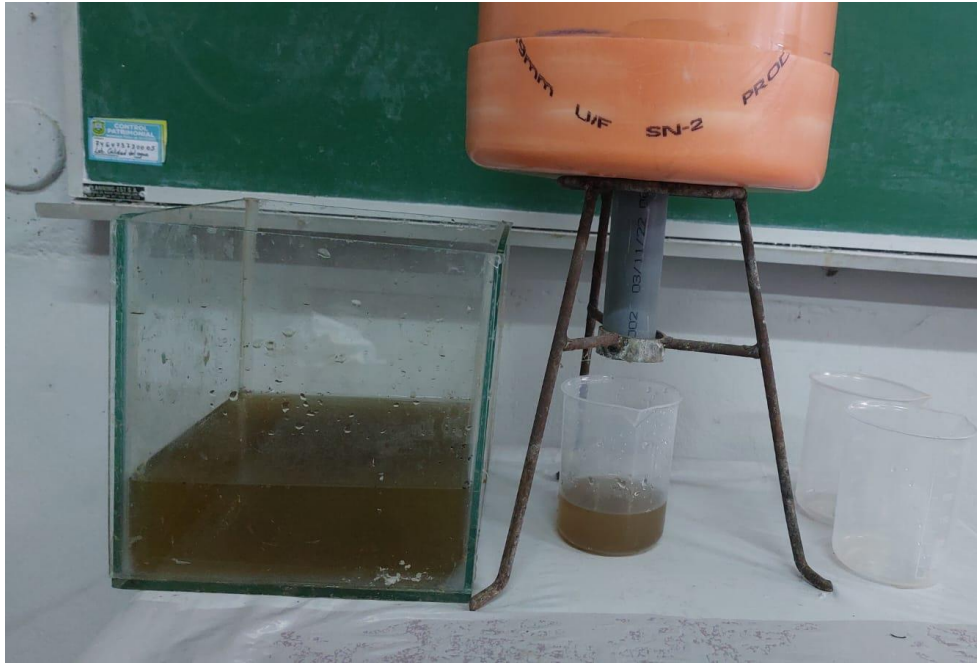


Figura 15. Colección de lixiviados generados en el lisímetro



Figura 16. Carga de los lixiviados en las cámaras de ozonización



Figura 17. Medición del pH de los lixiviados en la cámara de ozonización.

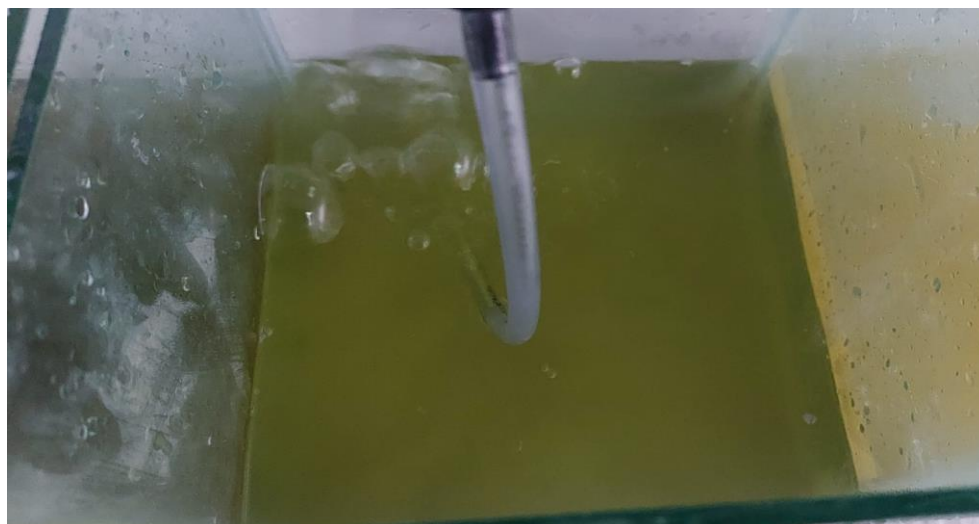


Figura 18. Aplicación del ozono a los lixiviados.

8.2. Datos experimentales de la investigación

Tabla 9. Datos experimentales de los tratamientos de la investigación

| Parámetro evaluado | Repet. | L 40% RO | | | L60% RO | | | L80% RO | | |
|--|------------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | pH=5 | pH=7 | pH=9 | pH=5 | pH=7 | pH=9 | pH=5 | pH=7 | pH=9 |
| DBO ₅ (mg/L) | 1R | 8543 | 6879 | 5058 | 10654 | 8769 | 6678 | 12650 | 9908 | 8114 |
| | 2R | 7956 | 7023 | 4895 | 10482 | 9633 | 6923 | 12359 | 9544 | 9021 |
| | 3R | 8102 | 6325 | 5209 | 11659 | 8458 | 7145 | 12879 | 9763 | 8458 |
| | Promedio | 8200.3 | 6742.3 | 5054.0 | 10931.7 | 8953.3 | 6915.3 | 12629.3 | 9738.3 | 8531.0 |
| DQO (mg/L) | 1R | 15346 | 13244 | 11698 | 19422 | 17987 | 12069 | 23154 | 17852 | 15486 |
| | 2R | 16882 | 13689 | 11245 | 18890 | 18036 | 11254 | 22788 | 16987 | 14963 |
| | 3R | 15786 | 14987 | 12063 | 19369 | 18210 | 10893 | 21065 | 17569 | 15024 |
| | Promedio | 16004.7 | 13973.3 | 11668.7 | 19227.0 | 18077.7 | 11405.3 | 22335.7 | 17469.3 | 15157.7 |
| Biodegradabilidad con ozonización | 1R | 0.56 | 0.52 | 0.43 | 0.55 | 0.49 | 0.55 | 0.55 | 0.56 | 0.52 |
| | 2R | 0.47 | 0.51 | 0.44 | 0.55 | 0.53 | 0.62 | 0.54 | 0.56 | 0.60 |
| | 3R | 0.51 | 0.42 | 0.43 | 0.60 | 0.46 | 0.66 | 0.61 | 0.56 | 0.56 |
| | Promedio | 0.51 | 0.48 | 0.43 | 0.57 | 0.50 | 0.61 | 0.57 | 0.56 | 0.56 |
| Biodegradabilidad sin ozonización | valor inicial | 0.35 | 0.35 | 0.35 | 0.42 | 0.42 | 0.42 | 0.43 | 0.43 | 0.43 |
| Porcentaje de Variación de la biodegradabilidad | | 46.78 | 38.52 | 23.76 | 35.35 | 17.94 | 44.79 | 31.79 | 29.65 | 30.99 |

8.3. Resultados del análisis estadístico de los datos experimentales con el software

InfoStat

Análisis de la varianza

Biodegradabilidad con ozonización

| Variable | N | R ² | R ² Aj | CV |
|------------------------------|----|----------------|-------------------|------|
| Biodegradabilidad con ozon.. | 27 | 0.48 | 0.39 | 9.07 |

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
|--------------------|------|----|---------|------|---------|
| Modelo. | 0.05 | 4 | 0.01 | 5.09 | 0.0047 |
| % R.O en Lixiviado | 0.04 | 2 | 0.02 | 8.86 | 0.0015 |
| pH | 0.01 | 2 | 3.1E-03 | 1.32 | 0.2878 |
| Error | 0.05 | 22 | 2.3E-03 | | |
| Total | 0.10 | 26 | | | |

Test: Duncan Alfa=0.05

Error: 0.0023 gl: 22

| % R.O en Lixiviado | Medias | n | E.E. |
|--------------------|--------|---|--------|
| 40% | 0.48 | 9 | 0.02 A |
| 60% | 0.56 | 9 | 0.02 B |
| 80% | 0.56 | 9 | 0.02 B |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Test: Duncan Alfa=0.05

Error: 0.0023 gl: 22

| pH | Medias | n | E.E. |
|----|--------|---|--------|
| 7 | 0.51 | 9 | 0.02 A |
| 9 | 0.53 | 9 | 0.02 A |
| 5 | 0.55 | 9 | 0.02 A |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

DBO5 (mg/L)

| Variable | N | R ² | R ² Aj | CV |
|-------------|----|----------------|-------------------|------|
| DBO5 (mg/L) | 27 | 0.96 | 0.96 | 5.38 |

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
|--------------------|--------------|----|-------------|--------|---------|
| Modelo. | 124375385.04 | 4 | 31093846.26 | 144.14 | <0.0001 |
| % R.O en Lixiviado | 60646606.74 | 2 | 30323303.37 | 140.57 | <0.0001 |
| pH | 63728778.30 | 2 | 31864389.15 | 147.72 | <0.0001 |
| Error | 4745694.37 | 22 | 215713.38 | | |
| Total | 129121079.41 | 26 | | | |

Test: Duncan Alfa=0.05

Error: 215713.3805 gl: 22

| % R.O en Lixiviado | Medias | n | E.E. |
|--------------------|----------|---|----------|
| 40% | 6665.56 | 9 | 154.82 A |
| 60% | 8933.44 | 9 | 154.82 B |
| 80% | 10299.56 | 9 | 154.82 C |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Test: Duncan Alfa=0.05

Error: 215713.3805 gl: 22

| pH | Medias | n | E.E. | |
|----|----------|---|--------|---|
| 9 | 6833.44 | 9 | 154.82 | A |
| 7 | 8478.00 | 9 | 154.82 | B |
| 5 | 10587.11 | 9 | 154.82 | C |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

DQO (mg/L)

| Variable | N | R ² | R ² Aj | CV |
|------------|----|----------------|-------------------|------|
| DQO (mg/L) | 27 | 0.89 | 0.87 | 7.73 |

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
|--------------------|--------------|----|-------------|-------|---------|
| Modelo. | 277452861.26 | 4 | 69363215.31 | 44.47 | <0.0001 |
| % R.O en Lixiviado | 88767458.07 | 2 | 44383729.04 | 28.45 | <0.0001 |
| pH | 188685403.19 | 2 | 94342701.59 | 60.48 | <0.0001 |
| Error | 34315481.26 | 22 | 1559794.60 | | |
| Total | 311768342.52 | 26 | | | |

Test: Duncan Alfa=0.05

Error: 1559794.6027 gl: 22

| % R.O en Lixiviado | Medias | n | E.E. | |
|--------------------|----------|---|--------|---|
| 40% | 13882.22 | 9 | 416.31 | A |
| 60% | 16236.67 | 9 | 416.31 | B |
| 80% | 18320.89 | 9 | 416.31 | C |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Test: Duncan Alfa=0.05

Error: 1559794.6027 gl: 22

| pH | Medias | n | E.E. | |
|----|----------|---|--------|---|
| 9 | 12743.89 | 9 | 416.31 | A |
| 7 | 16506.78 | 9 | 416.31 | B |
| 5 | 19189.11 | 9 | 416.31 | C |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)