

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



**BIODEGRADABILIDAD DE UN LIXIVIADO DE RESIDUOS SÓLIDOS  
MUNICIPALES A PARTIR DE FILTRACIÓN CON CARBÓN VEGETAL A  
ESCALA DE LABORATORIO.**

**Tesis**

**para optar el título de:**

**INGENIERO AMBIENTAL**

**PRESENTADO POR:**

**NOREÑA REYES VICTOR ANGEL**

**Tingo María – Perú**

**2024**



**ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS N° 036-2025-FRNR-UNAS**

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 30 de diciembre 2024, a horas 10: 00 a.m. en la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

**“BIODEGRADABILIDAD DE UN LIXIVIADO DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES A PARTIR DE FILTRACIÓN CON CARBÓN VEGETAL A ESCALA DE LABORATORIO”**

Presentado por la Bachiller: **NOREÑA REYES, VICTOR ANGEL**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“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, 03 de abril de 2025

**Ing. MSc. FRANKLIN DIONISIO MONTALVO**  
**PRESIDENTE**

**Ing. MSc. ALBERTO FRANCO CERNA CUEVA**  
**MIEMBRO**



**Ing. MSc. ABBY SOLANGE DA CRUZ RODRIGUEZ**  
**MIEMBRO**

**Dr. JOSE LUIS PAREDES SALAZAR**  
**ASÉSOR**



"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

## CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 111 - 2025 - 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:

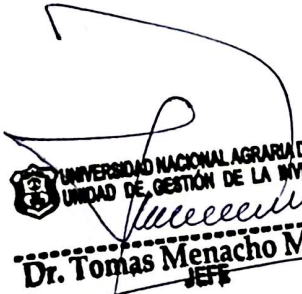
Ingeniería Ambiental

Tipo de documento:

|       |   |                                    |  |
|-------|---|------------------------------------|--|
| Tesis | X | Trabajo de Suficiencia Profesional |  |
|-------|---|------------------------------------|--|

| TÍTULO  | AUTOR                        | PORCENTAJE DE SIMILITUD |
|---|------------------------------|-------------------------|
| BIODEGRADABILIDAD DE UN LIXIVIADO DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES A PARTIR DE FILTRACIÓN CON CARBÓN VEGETAL A ESCALA DE LABORATORIO | NOREÑA REYES<br>VICTOR ANGEL | 08 %<br>Ocho            |

Tingo María, 22 de abril de 2025

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

C.C. Archivo



# UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Tingo María

## VICERRECTORADO DE INVESTIGACION DIRECCIÓN DE GESTIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

“Promoviendo la Calidad de la Investigación”

### REGISTRO DE PROYECTO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO UNIVERSITARIO

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| <b>Universidad</b>            | : Universidad Nacional Agraria de la Selva   |
| <b>Facultad</b>               | : Facultad de Recursos Naturales Renovable   |
| <b>Escuela Profesional</b>    | : Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental  |
| <b>Título de Tesis</b>        | : Biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos municipales a partir de filtración con carbón vegetal a escala de laboratorio.                     |
| <b>Objetivo General</b>       | : Evaluar la influencia de la filtración con carbón vegetal, en biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos municipales a escala de laboratorio. |
| <b>Autor de la Tesis</b>      | : Noreña Reyes Victor Angel  |
| <b>DNI</b>                    | : 76508926   |
| <b>Correo Electrónico</b>     | : guardia_angel_02@hotmail.com   |
| <b>Asesores de Tesis</b>      | : Dr. Paredes Salazar José Luis  |
| <b>Área de Investigación</b>  | : Ciencia y tecnología ambientales   |
| <b>Grupo de Investigación</b> | : Ciencia y tecnología ambientales   |
| <b>Línea de Investigación</b> | : Causas y efecto de la contaminación ambiental y tecnologías para su reducción.   |
| <b>Lugar de Ejecución</b>     | : Universidad Nacional Agraria de la Selva   |
| <b>Fecha de inicio</b>        | : 13 de enero 2023   |
| <b>Fecha de termino</b>       | : 15 de junio 2023   |
| <b>Presupuesto</b>            | : S/. 4,504.50   |
| <b>Financiamiento</b>         | : Propio ( x ) FEDU ( ) Externo ( )  |

-----  
Noreña Reyes Victor Angel  
Tesisista

-----  
Dr. Paredes Salazar José Luis  
Asesor

## DEDICATORIA

A Dios, por guiarme en cada paso de este viaje académico y darme la fuerza para perseverar. Gracias por ser mi fuente de fortaleza y entendimiento en este logro académico.

A mis queridos padres, Víctor Noreña y Eugenia Reyes, quienes a lo largo de sus vidas me han inculcado el respeto, el sacrificio que se hace para lograr una meta y por ser mi fuente de inspiración y por enseñarme el valor de la perseverancia y la determinación.

Para mis hermanos increíbles: Gracias por enseñarme que la vida es más divertida cuando hay compañía, incondicional, paciencia y apoyo. Los quiero a cada uno de ustedes aprecio mucho y de todo corazón aquellos momentos que pasamos juntos.

## **AGRADECIMIENTO**

- A la Universidad Nacional Agraria de la Selva Facultad de Recursos Naturales Renovables por formar parte de ella y así como también a los diferentes docentes que brindaron sus conocimientos y su apoyo en mi formación profesional.
- Al Ing. M. Sc. José Luis Paredes Salazar, asesor de mi tesis, por el haberme brindado con su experiencia y conocimientos en la culminación de esta investigación.
- Agradezco a mis hermanos Gregorio Noreña R. y Enrique Noreña R., Nancy noreña Reyes por su apoyo incondicional que me han brindado en esta etapa importante de mi vida.
- A los miembros del jurado, Ing. MSc. Franklin Dionisio Montalvo, Ing. M.Sc. Alberto Franco Cerna Cueva, Ing. Msc. Abby Solange Da Cruz Rodriguez en el presente trabajo de investigación.
- También agradezco a todos los que fueron mis compañeros de clase durante esta etapa universitaria ya que gracias al compañerismo, amistad y apoyo moral han aportado a mis ganas de seguir adelante en mi carrera profesional.

## INDICE

|   | Página |
|---|--------|
| I. INTRODUCCION.....  | 1      |
| 1.1. Objetivos.....   | 2      |
| Objetivo General: .....   | 2      |
| Objetivos específicos .....   | 3      |
| II. REVISIÓN DE LITERATURA .....  | 4      |
| 2.1. Antecedentes.....  | 4      |
| Antecedentes Internacionales .....  | 4      |
| Antecedentes nacionales.....  | 5      |
| 2.2. Definición de lixiviados .....   | 6      |
| 2.3. Composición de los lixiviados.....   | 6      |
| 2.4. Tipos de lixiviados .....  | 7      |
| 2.5. Métodos de tratamiento de lixiviado de vertederos.....   | 8      |
| 2.6. Las tecnologías de membrana en el tratamiento de lixiviado.....  | 9      |
| 2.7. Carbón vegetal.....  | 9      |
| 2.8. Características del carbón vegetal .....   | 10     |
| 2.9. Biodegradabilidad de lixiviados .....  | 11     |
| III. MATERIALES Y METODOS.....  | 12     |
| 3.1. Lugar de ejecución.....  | 12     |
| 3.2. Material y Métodos.....  | 13     |
| 3.2.1. Materiales y Equipos .....   | 13     |
| 3.2.2. Metodología.....   | 14     |
| Nivel de investigación .....  | 18     |
| Tipo de investigación .....   | 18     |
| Método de investigación.....  | 18     |
| IV. RESULTADOS Y DISCUSION .....  | 21     |
| 4.1. Determinación de la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos municipales previamente caracterizado..... | 21     |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.2.  | Determinación del efecto de la filtración con carbón vegetal con tres tamaños de partícula diferentes, en la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos municipales a escala de laboratorio. ....  | 22 |
| 4.3.  | Determinación del efecto de la filtración con carbón vegetal con tres volúmenes del lecho filtrante diferentes, en la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos municipales a escala de laboratorio. ....                               | 24 |
| 4.4.  | Determinación del efecto de la filtración con carbón vegetal con tres tamaños de partícula y tres volúmenes del lecho filtrante diferentes, en la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos municipales previamente caracterizado. .... | 25 |
| 4.5.  | Resultados del análisis estadístico.....  | 27 |
| V.    | CONCLUSIONES.....   | 29 |
| VI.   | PROPUESTAS A FUTURO .....   | 30 |
| VII.  | REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....  | 31 |
| VIII. | ANEXO .....   | 35 |
| 8.1.  | Datos experimentales de la investigación.....   | 35 |
| 8.2.  | Resultados del análisis estadístico con el software estadístico InfoStat (Versión libre)<br>.....   | 38 |

## INDICE DE TABLAS

| Tabla   | Página |
|---|--------|
| 1. Tipos de lixiviados de un relleno sanitario y sus principales características.....   | 8      |
| 2. Descomposición del carbón vegetal por efecto de la temperatura. ....   | 10     |
| 3. Variables de investigación.....  | 18     |
| 4. Niveles para los factores de la investigación.....   | 19     |
| 5. Matriz de diseño de la investigación .....   | 19     |
| 6. Caracterización fisicoquímica básica del lixiviado. ....   | 21     |
| 7. Efecto del tamaño de partícula de carbón vegetal en la biodegradabilidad del lixiviado. .  | 22     |
| 8. Efecto del volumen del lecho filtrante de carbón vegetal en la biodegradabilidad del lixiviado.....  | 24     |
| 9. Efecto del tamaño de partícula y volumen del lecho filtrante de carbón vegetal en la biodegradabilidad del lixiviado. ....                           | 26     |
| 10. Caracterización fisicoquímica del lixiviado de la investigación. ....   | 35     |
| 11. Determinación de la variación de la biodegradabilidad del lixiviado por efecto del tamaño de partícula de carbón.....                               | 35     |
| 12. Determinación de la variabilidad del lixiviado por efecto del volumen del filtro del lecho filtrante. ....  | 36     |
| 13. Determinación de la variación de la biodegradabilidad del lixiviado por efecto del tamaño de partícula de carbón y volumen del lecho filtrante..... | 37     |

## INDICE DE FIGURAS

| Figura   | Página |
|--|--------|
| 1. Acumulación de lixiviados.....  | 6      |
| 2. Composición de los lixiviados en el tiempo.....   | 7      |
| 3. Pirólisis de la madera para producir carbón vegetal .....   | 11     |
| 4. Ubicación Geográfica de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. ....   | 13     |
| 5. Esquema experimental para el acondicionamiento del carbón vegetal.....  | 15     |
| 6. Esquema experimental para evaluación del efecto del tamaño de partícula del lecho filtrante en la biodegradabilidad del lixiviado .....                             | 15     |
| 7. Esquema experimental para evaluación del efecto de volumen de lecho filtrante en la biodegradabilidad del lixiviado .....   | 16     |
| 8. Esquema experimental para evaluación del efecto de volumen de lecho filtrante y tamaño de partícula del filtro de carbón en la biodegradabilidad del lixiviado..... | 18     |
| 9. Variación de la biodegradabilidad del lixiviado con filtración de carbón con diferentes tamaños de partícula. ....  | 23     |
| 10. Variación de la biodegradabilidad del lixiviado con filtración de carbón con diferentes volúmenes de lecho filtrante. ....   | 25     |
| 11. Variación de la biodegradabilidad del lixiviado con filtración de carbón con diferentes volúmenes de lecho filtrante y diferentes tamaños de partícula.....        | 26     |
| 12. Resumen estadístico básico de los resultados de los tratamientos .....   | 28     |
| 13. Gráfico de barras de los tratamientos aplicados a diferentes tamaños de partícula y diferente volumen de lecho filtrante.....                                      | 28     |
| 14. Resultados del análisis de varianza de los datos experimentales. ....  | 38     |
| 15. Colección del lixiviado de la investigación.....   | 39     |
| 16. Medición de parámetros fisicoquímicos insitu y en el laboratorio .....   | 39     |
| 17. Molienda del carbón vegetal .....  | 40     |
| 18. Tamizaje del carbón vegetal.....   | 40     |
| 19. Incubación de muestras para análisis de DBO .....  | 41     |

|  |    |
|--|----|
| 20. Llenado de bureta con el carbón vegetal .....                              | 41 |
| 21. Carbón vegetal con tres diámetros de partícula para los tratamientos ..... | 42 |
| 22. Aplicación de tratamiento de filtración de lixiviado.....                  | 42 |
| 23. Croquis de los puntos de muestreo en la poza de lixiviados.....            | 43 |

## RESUMEN

En la presente investigación se pretende conocer el efecto de la filtración con carbón vegetal en la biodegradabilidad de los lixiviados de residuos sólidos municipales. El lixiviado fue colectado de las celdas transitorias del relleno sanitario de la Municipalidad Provincial de Leoncio Prado, el cual fue caracterizado con parámetros fisicoquímicos básicos resultando con una biodegradabilidad de 0.26. Las pruebas experimentales se realizaron a escala de laboratorio, utilizando carbón vegetal con tres tamaños de partícula de 4mm, 2mm y 1mm, así también tres tamaños de volúmenes de lecho filtrante 20ml, 10 ml y 5 ml, para la filtración se utilizaron buretas de 50 ml. Se realizaron pruebas preliminares para ver el efecto individual del tamaño de partícula y de volumen de lecho filtrante, posteriormente se aplicaron los tratamientos con un diseño factorial  $2^3$  con tres repeticiones. Los resultados demostraron que tanto el tamaño de partícula como el volumen de lecho filtrante, son variables que influyen en la reducción de la biodegradabilidad del lixiviado mediante la filtración, siendo 49% de reducción de la biodegradabilidad el valor más alto obtenido, cuando se realizó la filtración con un volumen de lecho filtrante de 20 ml y un tamaño de partícula de 1mm. Las pruebas estadísticas realizadas, demostraron una baja variabilidad en los datos experimentales y después de un análisis de varianza aplicando la prueba de Tukey, se demostró que existe una diferencia significativa entre los tratamientos aplicados.

**Palabras clave:** Lixiviado, carbón vegetal, biodegradabilidad, filtración, DQO, DBO.

## **The Biodegradability of a Leachate from Municipal Solid Waste Using Carbon Filtering on a Laboratory Scale**

### **Abstract**

In the present research the intent was to understand the effect of carbon filtration on the biodegradability of the leachates from municipal solid waste. The leachate was collected from transitory cells from the Leoncio Pardo province municipality's landfill, which was characterized with basic physicochemical parameters, resulting in a biodegradability of 0.26. The experimental tests were carried out on a laboratory scale, using charcoal, with three particle sizes: 4mm, 2mm and 1mm, as well as three sizes for the filtration beds, 20ml, 10 ml and 5 ml; for the filtration, 50 ml burettes were used. Preliminary tests were used to see the individual effect of the particle size and the volume of the filtration bed; later, the treatments were applied with a factorial design of  $2^3$ , with three repetitions. The results demonstrated that the particle size, as much as the volume of the filtration bed, were variables that influenced the reduction of the biodegradability of the leachate through the filtration, with 49% being the highest value obtained in the reduction of the biodegradability, when the filtration was done with a 20 ml volume filtration bed and a particle size of 1mm. The statistical tests that were done demonstrated a low variability for the data from the experiment, and after a variance analysis was done using the Tukey test, it was demonstrated that a significant difference existed between the applied treatments.

**Keywords:** leachate, charcoal, biodegradability, filtration, COD (DQO), BOD (DBO)

## I. INTRODUCCION

Durante los últimos años, la población mundial ha atravesado por diversos cambios, que se asocian al desarrollo de cada país, unos más que otros, estos cambios tienen su base en los avances tecnológicos de los diversos sectores de la vida del hombre, ya que si bien es cierto, se habla de la mejora en la calidad de vida, sin embargo este cambio genera un desequilibrio, tanto económico como ambiental, ya que países que procesan y consumen los productos derivados de las nuevas tecnologías, así como aquellos países que importan esos productos, los cuales a la par y en forma paralela, se convierten en generadores de residuos sólidos, los cuales van apareciendo como productos desconocidos y es menester reevaluar la gestión de los residuos ya existentes, a fin de clasificarlos y darle el tratamiento adecuado para reducir los daños en el medio ambiente producto de compuestos que emanan de la descomposición de los mismos.

La generación de lixiviados de los rellenos sanitarios y botaderos de residuos sólidos domiciliarios se ha convertido en un gran reto en cuanto a su manejo y tratamiento, debido a la cantidad que se generan, más aún en zonas tropicales que tienen altos índices de precipitación, donde el volumen de lixiviado incrementa en periodos de lluvia y termina contaminando el suelo y las fuentes de aguas más cercanas.

Pozo et al. (2020), realizaron un estudio para estimar el caudal de lixiviados en un relleno sanitario de un distrito en Cuba, estos investigadores presentan una información numérica acerca de la caracterización de lixiviados en diversos países entre los cuales menciona la biodegradabilidad de los lixiviados de Brasil con 0.04 en un lixiviado viejo y Colombia con 0,64 en un lixiviado joven, por otro lado destacan los valores de biodegradabilidad en lixiviados jóvenes de Hong Kong en China e Italia con 0.27 y 0,2 respectivamente.

En el Perú se generan cada día 21 millones de toneladas de residuos sólidos de los cuales sólo se recupera el 1%. (Servindi, 2024). La composición de los residuos municipales son los siguientes: 9,2% peligrosos, 13,7% no aprovechables, 22,5% inorgánicos, 54,6% orgánico. Existen 47 rellenos sanitarios y 6 rellenos sanitarios de seguridad. (SINÍA; 2019).

Puertas et al. (2024) menciona que Tingo María cuenta con una celda transitoria para la eliminación segura de residuos sólidos cuyo objetivo es reducir los impactos adversos que podrían acarrear un a disposición de residuos sólidos urbanos, esta celda cuenta con un estanque para recolección de lixiviados los cuales se generan desde 5500 m<sup>3</sup> a 13000 m<sup>3</sup> por año, caudales que podrían incrementarse considerando que en Tingo María puede llegar a tener precipitaciones de 3500 mm al año.

El manejo de lixiviados generados en los rellenos sanitarios, se ha convertido en todo un reto para los especialistas y autoridades responsables del cuidado del medio ambiente, gran parte de la complejidad en el manejo de estos efluentes, se debe a la variabilidad de factores climáticos, como la temperatura ambiental, las precipitaciones, que actúan catalizando el poder contaminante de estos lixiviados, ya que el escurrimiento de aguas pluviales a través de los residuos sólidos no segregados correctamente en la fuente, son el vehículo que transporta la carga orgánica que se desprende por efecto de los microorganismos en temperaturas adecuadas, generalmente elevadas y se mezclan con otros compuestos no biodegradables que emanan probablemente de productos procesados con alta gama de tecnología.

Es importante realizar estudios con materiales de bajo costo y que de una u otra manera, ya han sido objeto de estudio en otras aplicaciones, como es el caso del carbón vegetal. El carbón vegetal es un recurso que se obtiene con la combustión de la madera en un medio anaeróbico por un tiempo determinado, es considerado un importante combustible por su gran demanda y capacidad calorífica. La carbonización de la madera se denomina pirólisis, en este proceso se obtienen muchos subproductos que influyen en la reactividad del material y son capaces de depurar efluentes líquidos con los que puedan tener contacto.

Ante la problemática que representa la generación permanente de lixiviados de residuos sólidos urbanos es necesario investigar y proponer alternativas de tratamiento que contribuyan con la eficiencia de la depuración de lixiviados, ante tal situación y con conocimiento de los recursos existentes, nos planteamos la siguiente interrogante: ¿Cuál es la influencia de la filtración con carbón vegetal, en la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos municipales a escala de laboratorio?, planteándose la siguiente hipótesis: La filtración con carbón vegetal incrementa la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos municipales a escala de laboratorio más del 45%.

## **1.1. Objetivos**

### **Objetivo General:**

Evaluar la influencia de la filtración con carbón vegetal, en la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos municipales a escala de laboratorio.

**Objetivos específicos**

Determinar la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos municipales previamente caracterizado.

Determinar la influencia de la filtración con carbón vegetal con tres tamaños de partícula diferentes, en la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos municipales a escala de laboratorio.

Determinar la influencia de la filtración con carbón vegetal con tres volúmenes del lecho filtrante diferentes, en la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos municipales a escala de laboratorio.

Determinar la influencia de la filtración con carbón vegetal con tres tamaños de partícula y tres volúmenes del lecho filtrante diferentes, en la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos municipales previamente caracterizado

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Antecedentes

#### Antecedentes Internacionales

Rohers et al. (2021) investigaron el efecto de la filtración directa de lixiviados procedentes del tanque de equalización de lixiviados del municipio de Biguaçu en Brasil. Los estudios fueron realizados a nivel de laboratorio utilizando un lecho filtrante de arena y carbón activado, la filtración fue en flujo ascendente, entre los resultados mas importantes se menciona la eliminación de metales pesados y la variación de la biodegradabilidad de 0.3 a 0.9, recomendando este proceso como un pretratamiento de lixiviados para su próxima depuración por medios biológicos.

Kwarciak-Kozłowska et al., (2019) desarrollaron una investigación para comparar la eficacia de adsorción de contaminantes de lixiviados de vertederos en dos granulados activados carbones y biocarbón. El proceso de sorción de componentes de aguas residuales en carbones activados se llevó a cabo bajo condiciones estáticas condiciones durante 72 horas. Las dosis de adsorbentes utilizadas variaron de 2–8 g·dm<sup>-3</sup>. Los resultados de la eliminación de DQO se estimaron sobre la base de capacidad de adsorción y eficiencia de eliminación de DQO. Después de 72 h del proceso en las dosis más altas (8 g·dm<sup>-3</sup>), la tasa de eliminación de DQO osciló entre el 40 % al 60% con los carbones activados. En el caso del biocarbón, la tasa de adsorción de DQO fue 53%.

Nai Yuh Yek et al. (2021), desarrollaron un nuevo enfoque que integra el pirólisis por microondas de autopurga y la activación pirolítica para transformar los racimos de frutas vacíos, que son un desperdicio abundante en las plantaciones de palma aceitera, en biocarbón modificado por microondas. Se comparó el rendimiento del vapor y el CO<sub>2</sub> como agente activador y, a continuación, se aplicó el biochar modificado producido posteriormente para tratar los lixiviados reales del vertedero mediante una operación de adsorción discontinua y continua. Usando un sistema de microondas monomodo, el enfoque de pirólisis que integra la activación de vapor o CO<sub>2</sub> mostró una alta tasa de calentamiento y una temperatura de proceso de hasta 170 °C/min y 600 °C, respectivamente. Los resultados demuestran que el pirólisis por microondas combinada con la activación con CO<sub>2</sub> es una técnica auspiciosa preferible a la activación con vapor para la generación de metilbromuro deseable a partir de desechos de palma aceitera para tratar los peligrosos lixiviados de los vertederos.

Igwegbe et al. (2024), desarrollaron una investigación para conocer la capacidad del biocarbón obtenido de la paja de trigo, para remover el nitrógeno en un lixiviado caracterizado con un valor de biodegradabilidad de 0.23 que fue colectado en el relleno sanitario de la municipalidad de Zgorzelec, Polonia. Las pruebas experimentales fueron realizadas a nivel de laboratorio y utilizaron como patrón de comparación de adsorción de nitrógeno una solución de cloruro de amonio y carbón activado comercial. Los resultados evidenciaron la mayor capacidad del biocarbón para remover el nitrógeno del lixiviado donde este material consiguió una eficiencia de 95.08% comparado con el 93.11% de eficiencia obtenido con el carbon activado.

### **Antecedentes nacionales**

Ticona y Pineda (2023), realizaron un estudio basado en la aplicación de un proceso de oxidación avanzada específicamente un proceso foto-fenton a un lixiviado obtenido en la celda transitoria de la municipalidad de Huanuyo, Juliaca el lixiviado tuvo 5140 mg/L y 61300 mg/L para DBO5 y DQO respectivamente y 6.8 de pH. Los resultados obtenidos fueron una reducción de 83.29% de materia orgánica aplicando 30 minutos de proceso con una dosis de 15mL/L de peróxido de Hidrógeno al 50% y 2000 ppm de fierro divalente. La biodegradabilidad varió de 0.08 a 0.5 por lo cual se recomendó este tratamiento como uno previo al tratamiento biológico.

Yaranga (2021), investigó en el tratamiento de lixiviados del botadero el Porvenir, ubicado en el distrito el Tambo. Huancayo, aplicando los procesos de oxidación fenton y foto fenton, los resultados permitieron conocer la dosis de peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso, evaluando también el efecto del pH. Entre los valores óptimos obtenidos reportaron el proceso a un pH 4, la relación peróxido de hidrógeno y sales de fierro de 2:1, así mismo una eficiencia en la remoción de DQO de 53,66% para el tratamiento Fenton y 90,68% para el tratamiento foto-Fenton.

Ninan y Zambrano (2019), desarrollaron una investigación en tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario del distrito Santiago en Cusco-Perú mediante electrocoagulación, el estudio fue realizado a nivel de laboratorio, utilizando reactores batch de 2 litros de capacidad con electrodos de aluminio como ánodo y acero inoxidable como cátodo, el tiempo de reacción fue de 120 minutos, utilizando dos lixiviados de diferentes edades. Los valores de DBO y SST fueron removidos de manera considerable a los 30 minutos y la DQO fue reducida de manera no significativa donde los autores mencionan que sería necesario más tiempo para mayor eficiencia de remoción de DQO. Los mejores resultados fueron en el lixiviado de mayor edad

donde la remoción de DBO fue 70% y de la DBO 20%, con una densidad de corriente de 10 mA/cm<sup>2</sup> y una distancia entre electrodos de 2cm.

## 2.2. Definición de lixiviados

El lixiviado se define como un subproducto de la descomposición de los residuos sólidos municipales por efecto de factores físicos, químicos y biológicos y se formará en ambientes de acumulación de procesamiento o acumulación temporal de residuos sólidos siendo un fluido con alta resistencia y toxicidad. La contaminación por lixiviados es un fenómeno que necesita ser controlado a la actualidad se ha convertido en un duro desafío para la población mundial que se ha enfocado principalmente en reducir las fuentes contaminantes. (Zhao Youcai, 2019).

Son efluentes líquidos que necesitan un tratamiento idóneo antes de su vertimiento en los cuerpos receptores de agua o alternativamente la aplicación de un tratamiento integrado para su aprovechamiento o reciclaje (Hans-Jürgen y Stegmann, 2018).



**Figura 1.** Acumulación de lixiviados

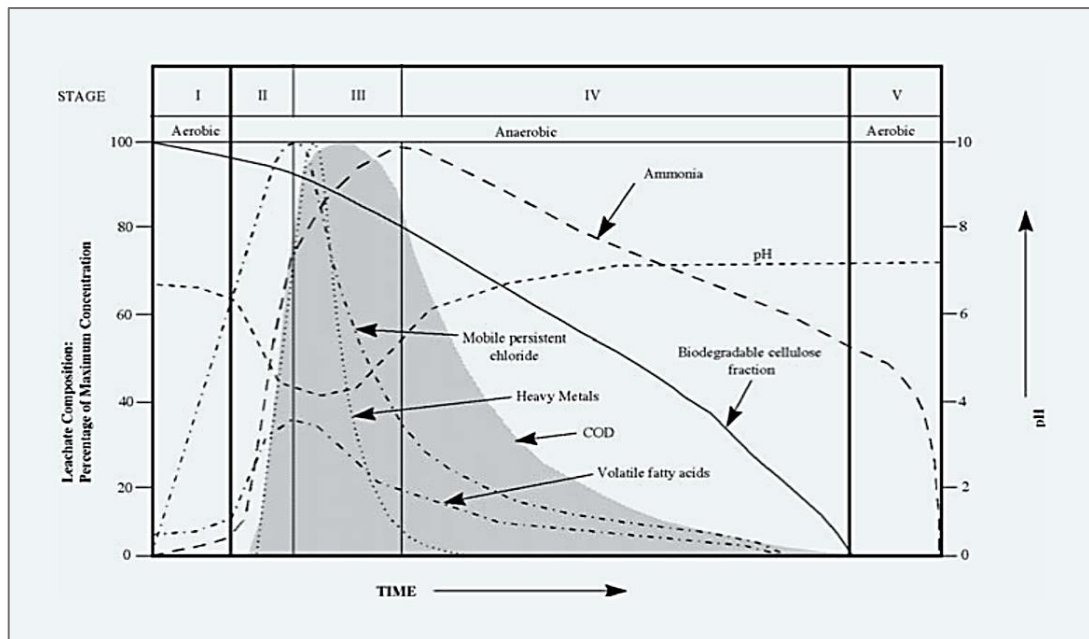
Fuente: Agua Sigma (2021).

## 2.3. Composición de los lixiviados

El lixiviado es un fluido proveniente de la descomposición de los residuos sólidos que se percola a través de los rellenos sanitarios y contiene compuestos orgánicos e inorgánicos solubles, partículas en suspensión y metales pesados y otro tipo de iones que se relacionan a la calidad de residuos. Como resultado de los procesos físicos, químicos y microbiológicos que tienen lugar dentro del relleno sanitario, los lixiviados absorben una serie de sustancias, y como consecuencia se convierten en aguas residuales altamente contaminadas. La composición de los lixiviados es dinámica y variable en el tiempo, dependiendo, entre otras cosas, de la naturaleza de los residuos depositados y de los procesos de descomposición química y bioquímica que

tienen lugar en ellos, del nivel de estabilización de los residuos depositados, de la recogida sistema, así como la ubicación del vertedero y los factores hidrológicos (Wowczyk y Szymańska-Pulikowska, 2020).

Se caracteriza por un color marrón oscuro o negro con altísimas concentraciones de demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno amoniacal, metales pesados y otros contaminantes orgánicos e inorgánicos. Tiene un alto potencial para contaminar el suelo y las aguas subterráneas cercanas, si no se recolecta y trata. Por lo tanto, la gestión de lixiviados es un aspecto importante de la gestión de residuos sólidos y todos los vertederos de residuos peligrosos y la mayoría de los vertederos municipales están equipados con un sistema de recolección de lixiviados para su recolección segura, que luego se envía para su tratamiento en el sitio o fuera del sitio (Pratibha y Sunil, 2021).



**Figura 2.** Composición de los lixiviados en el tiempo.

Fuente: Telwesa (2019).

## 2.4. Tipos de lixiviados

El tipo de lixiviados está en función de las características de los lixiviados del vertedero que se expresan mediante los parámetros básicos DQO, DBO, relación DBO/DQO, pH, sólidos en suspensión (SS), nitrógeno amónico ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ), Kjeldahl total nitrógeno (TKN) y metales pesados. En general, la calidad de los lixiviados puede ser afectada por muchos factores, como la antigüedad del vertedero, la precipitación, la variación climática estacional, el tipo de desechos y composición, pero se han definido tres tipos de lixiviados según la edad del vertedero como se muestra en la Tabla 1 (Tu Anqi et al., 2020).

**Tabla 1.** Tipos de lixiviados de un relleno sanitario y sus principales características.

| <b>Parámetro</b>                     | <b>Joven</b>              | <b>Intermedio</b>                                 | <b>Maduro</b>                                       |
|--------------------------------------|---------------------------|---|---|
| Edad (años)                          | <5                        | 5 - 10  | >10   |
| Ph                                   | 3 - 6                     | 6,0 - 7,5   | 7,5   |
| DQO (mg/L)                           | 50.000 - 10.000           | 20.000 - 4.000                                    | <5.000  |
| DBO <sub>5</sub> (mg/L)              | 25.000 - 10,000           | 4.000 - 1.000                                     | <1.000  |
| Nitrógeno amoniacal                  | 4.250 - 1.500             | 700 - 250   | 200 - 30 o <30                                      |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)  |                           |   |   |
| Alcalinidad (mg/L)                   | 18.000 - 8.000            | 6.000 - 4.500                                     | -   |
| Fósforo (mg/L)                       | 300 - 100                 | 100 - 10  | <10   |
| Sulfatos                             |                           |   |   |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L) | 2.000 - 500               | 1.000 - 200                                       | 200 - 50 o <50                                      |
| Sólidos disueltos totales (mg/L)     | 25.000 - 10.000           | 10.000 - 5.000                                    | 5.000 - 1.000 o <1.000                              |
| Compuestos orgánicos                 | Principalmente AGV (~80%) | 5-30% de AGV y resto de ácidos húmicos y fúlvicos | Ácidos húmicos y fúlvicos (altamente recalcitrante) |
| Carga en metales pesados             | Baja- media               | Baja  | Baja  |
| Biodegradabilidad                    | Alta                      | Media   | Baja  |

Fuente: Agua Sigma (2021).

## 2.5. Métodos de tratamiento de lixiviado de vertederos

En la actualidad, hay tres tipos de métodos convenientes para el tratamiento de lixiviados: método de transferencia de lixiviados, método de biodegradación y método fisicoquímico. Hay dos tipos de transferencia de lixiviados de vertedero, uno es el tratamiento combinado con aguas residuales domésticas, el otro es el reciclaje de lixiviados. Las ventajas del tratamiento combinado con aguas residuales domésticas son el fácil mantenimiento y sus bajos costos de operación. Sin embargo, debido a la existencia de compuestos orgánicos de baja biodegradación compuestos y metales pesados en el lixiviado, la eficiencia del tratamiento puede reducirse y el efluente puede aumentar la concentración, este método es cuestionado.

Los procesos físicos y químicos incluyen flotación, coagulación/floculación, adsorción, química oxidación y reducción de sólidos en suspensión, partículas coloidales, flotadores, colores y tóxicos compuestos. El tratamiento físico/químico de los lixiviados de los vertederos también se utiliza para la línea de tratamiento (pretratamiento o purificación final) o para el tratamiento de contaminantes específicos. El tratamiento biológico suele ayudar a eliminar una gran cantidad de lixiviados con alta concentración de DBO, las sustancias orgánicas y nitrogenadas de los lixiviados jóvenes. Cuando la relación DBO/DQO es superior a 0,5, el tratamiento biológico es muy eficaz por su menor contenido de sustancias refractarias. El

tratamiento biológico se puede dividir en proceso de tratamiento biológico anaeróbico y proceso de tratamiento biológico aeróbico. Con el proceso anaeróbico se pueden eliminar algunos metales, refractarios y materias orgánicas. Sin embargo, las altas concentraciones de metano disuelto, nitrógeno amoniacal, sulfuro y aminos resultantes no cumplen con los estándares de descarga de aguas superficiales. La presencia de gas metano y sulfuro evitan su vertimiento al alcantarillado hace necesario la aplicación de un tratamiento anaeróbico para oxidar la materia orgánica en dióxido de carbono y agua, y eliminar el nitrógeno amoniacal por oxidación a nitrato. Los procesos químico-físicos-biológicos integrados pueden reducir las desventajas de un solo proceso y mejorar la eficiencia del tratamiento general. Sin embargo, con la mejora continua de los estándares de descarga en la mayoría de los países del mundo y el envejecimiento de los vertederos con lixiviados cada vez más estables, métodos de tratamiento convencionales (biológicos, físicos y químicos) no son suficientes para reducir completamente el nivel de depuración requerido por la descarga de aguas residuales y el impacto negativo de los lixiviados de los vertederos en el medio ambiente (Tu Anqi et al.,2020).

## **2.6. Las tecnologías de membrana en el tratamiento de lixiviado**

Uno de los métodos de tratamiento emergentes que se ha considerado abordar las limitaciones de los métodos tradicionales de tratamiento de lixiviados es tecnología de membrana que implica el uso de una película semipermeable para separar los contaminantes del lixiviado. Este método ofrece una alternativa prometedora que podría mejorar la eficiencia del tratamiento de separación de lixiviados, además de reducir la huella del sistema, lo que lleva a una reducción Impacto ambiental de los lixiviados. Actualmente existe un biorreactor de membrana que combina el proceso de tratamiento biológico convencional con microporosos. La tecnología de membrana es la tecnología de membrana más utilizada para tratamiento de lixiviados de vertederos. En general, un biorreactor de membrana podría ofrecer varias ventajas únicas como calidad constante del efluente y reducción de lodos, logrando altas tasas de eliminación de sólidos suspendidos y orgánicos. Sin embargo, tiene algunas limitaciones, incluida la ineficacia para eliminar objetos pesados, iones metálicos y algunas sustancias químicas presentes en los lixiviados (Tan et al.,2024).

## **2.7. Carbón vegetal**

El carbón vegetal es un combustible producto de la combustión anaeróbica de la madera, es decir una combustión sin oxígeno, sólo madera expuesta a altas temperaturas durante un tiempo determinado. Esta reacción de carbonización es llamada pirólisis (Díaz et al.,2010).

Los recientes avances en el conocimiento de la producción y las propiedades del carbón vegetal presagian su uso ampliado como fuente renovable, combustible, reductor, adsorbente y enmienda del suelo. La pirólisis de la biomasa es un proceso de conversión termoquímica fundamental que es de importancia tanto industrial como ecológica. Más del 90% de las tecnologías de carbón emplean calentamiento interno basado en la combustión parcial de la materia prima para fabricar carbón vegetal. En esta categoría se encuentran los hornos que están hechos de hormigón o ladrillo. El diseño del horno es simple y los costes de inversión suelen ser bajos (Wanida Kajina et al., 2019)

El carbón vegetal es producto de la descomposición de la lignina, celulosa, hemicelulosa y de la pérdida de extraíbles producto de la exposición de la madera a altas temperaturas y baja concentración de oxígeno, generando combustión completa. Este proceso puede variar según la especie, sección del árbol e inclusive de la técnica de carbonización empleada (Valverde et al., 2018).

## 2.8. Características del carbón vegetal

Un buen carbón vegetal comercial debería contener Carbono Fijo, carbono puro, alrededor del 75%; para lo cual se requiere que el proceso de carbonización llegue a una temperatura de 500°C.

En la producción de carbón vegetal la especie de madera influye debido a la concentración de componentes que la constituyen (celulosa, hemicelulosa y lignina). Algunos componentes de la madera tienen mayor o menor influencia en el desarrollo de la carbonización y en la obtención de productos de la misma, como carbono fijo, volátiles y contenido de cenizas. La densidad de la madera es otro factor que influye en la calidad del carbón, a mayor densidad básica corresponde una mayor producción de carbón. Bajo condiciones de pirólisis, cada material presenta características únicas en función a la proporción de sus constituyentes principales, hemicelulosa, celulosa y lignina, que juntos representan una compleja matriz (Mesa et al., 2014).

**Tabla 2.** Descomposición del carbón vegetal por efecto de la temperatura.

| Temperatura de Carbonización(°C) | Carbono fijo (%) | Material volátil (%) |
|----------------------------------|------------------|----------------------|
| 300                              | 68               | 31                   |
| 500                              | 86               | 13                   |
| 700                              | 92               | 7                    |

Fuente: Díaz et al. (2010).



**Figura 3.** Pirólisis de la madera para producir carbón vegetal

Fuente: Ruiz y Miganjos (2023).

### 2.9. Biodegradabilidad de lixiviados

La relación entre la demanda biológica de oxígeno ( $DBO_5$ ) y la demanda química de oxígeno (DQO) es un indicador comúnmente utilizado de la biodegradabilidad de los lixiviados. Según la edad del vertedero, la relación  $DBO_5 / DQO$  puede variar de 0,4 en lixiviados jóvenes (menos de 5 años), a  $< 0,2$  en lixiviados medianos (5-10 años) y 0,1 en lixiviados viejos ( $> 10$  años). Por lo tanto, el  $BOD_5 / COD$  se usa a menudo como punto de referencia para establecer la idoneidad de los procesos biológicos para el tratamiento de lixiviados. De hecho, tales procesos se revelaron muy efectivos en la remoción de materia orgánica de los lixiviados bajo condiciones de alta  $DBO_5 / DQO$  ( $> 0,3$ ), mientras que un valor más bajo da como resultado rendimientos de eliminación bajos, inadecuados para justificar la aplicación de un proceso de base biológica (Corsino et al., 2020).

Giraldo (2014), hace referencia sobre la materia orgánica fácilmente biodegradable, la cual tiene un contenido de humedad alto, y se degrada rápidamente en el relleno sanitario, produciendo a su vez altas concentraciones de ácidos grasos volátiles y de amoníaco, producto de la fermentación inicial. A su vez, estos ácidos se diluyen fácilmente en el lixiviado del relleno sanitario, le bajan el pH y contribuyen a la solubilización de los metales presentes en los residuos dispuestos en el relleno. La biodegradabilidad de un lixiviado está en función a su edad y se estima con la relación  $DBO / DQO$ , de esta manera, el valor numérico de esta relación, para un lixiviado joven es alta, indicando una buena biodegradabilidad, mientras que para un lixiviado viejo es baja indicando una pobre biodegradabilidad de la materia orgánica.

### **III. MATERIALES Y METODOS**

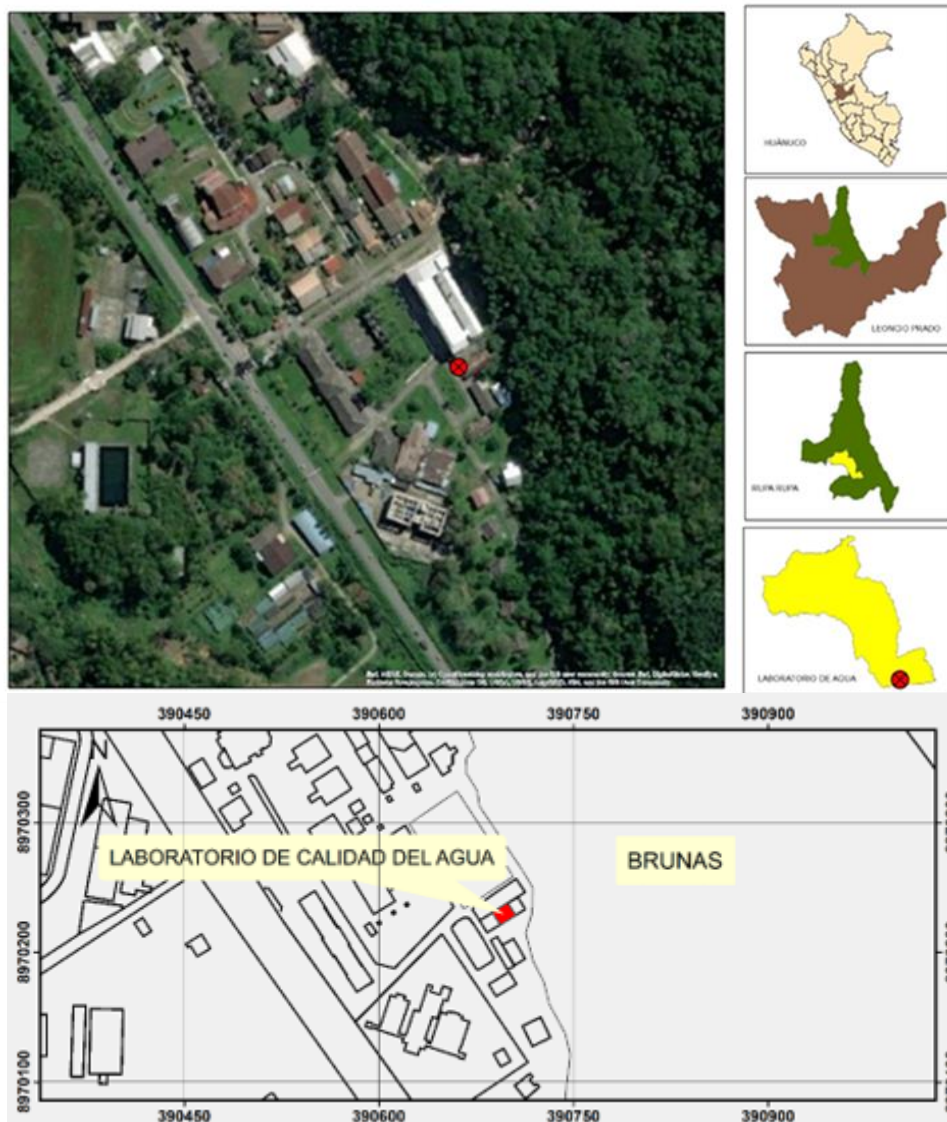
#### **3.1. Lugar de ejecución**

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.

Políticamente la institución mencionada se encuentra en el distrito Rupa Rupa de la provincia de Leoncio Prado en la región Huánuco, mientras que, al considerar la posición geográfica, dicho laboratorio se ubica en las coordenadas UTM: Este: 390312 y Norte: 8970772.

Las condiciones climáticas de la zona son: temperatura máxima de 29,4°C, la mínima de 19,2°C, y un promedio de 24,3°C; la precipitación acumulada anualmente es 3300 mm, la humedad relativa es 87,0% y la altitud sobre el nivel del mar es 660 m; considerando los tipos de zonas de vida, la ciudad de Tingo María viene a ser la capital del distrito Rupa Rupa y se ubica en la formación vegetal de bosque muy húmedo Pre-montano Tropical (bmh - PT). De acuerdo con las regiones naturales del Perú (Pulgar, 1938) corresponde a la selva alta o Rupa Rupa.

En términos de ecología, según la clasificación de áreas importantes o composición vegetal de organismos y mapa biológico. Tingo María fue encontrado en el muy húmedo premontano tropical de formación vegetal bmh-PT. Según el área natural del Perú, corresponde a Rupa Rupa o Selva Alta.



**Figura 4.** Ubicación Geográfica de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

### 3.2. Material y Métodos.

#### 3.2.1. Materiales y Equipos

Los materiales de vidrio de laboratorio serán materiales de vidrio de uso común, Cámara de\_DBO, multiparamétrico marca Hanna, Oxímetro Marca Lamotte, Termómetro digital, agua de bidón (Gota pura), 5 L de lixiviado, 28 recipientes de vidrio con capacidad de 3L, botellas de vidrio de color negro, Guantes quirúrgicos, Tapaboca, mortero, Papel filtro, Cámara de Incubación, Estufa digital marca Memmert, carbón vegetal

#### Reactivos

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

### **3.2.2. Metodología**

#### **3.2.2.1. Determinación de la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos municipales previamente caracterizado.**

El lixiviado fue colectado de las celdas transitorias de la Municipalidad Provincial de Leoncio Prado, realizando un muestreo compuesto, en puntos de accesibilidad en el sitio, utilizando un recipiente de plástico de 4 L de volumen atado a una cuerda de 3m de longitud, se tomaron muestras de 1 L hasta completar un volumen total de 5 L de lixiviado, en el sitio, se midieron, el pH y la temperatura, posteriormente el lixiviado fue filtrado y caracterizado con los parámetros fisicoquímicos básicos: DBO<sub>5</sub>, DQO, sólidos totales disueltos, conductividad.

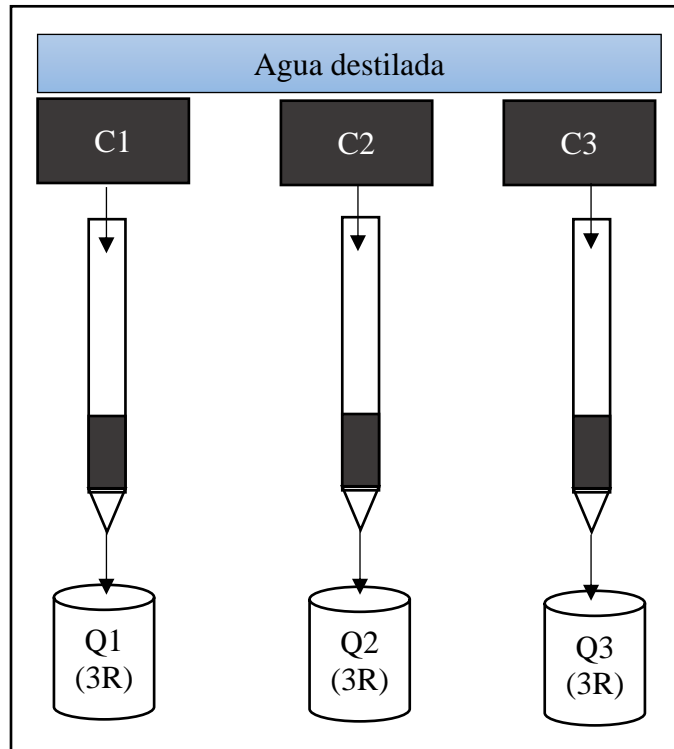
##### **Determinación de la biodegradabilidad del lixiviado.**

La biodegradabilidad fue determinada por la relación DBO<sub>5</sub>/ DQO (Giraldo, 2014), la cual permite determinar la edad del lixiviado, de esta manera si el valor es menor a 0.1, se considera un lixiviado maduro y estable, si es de 0.5-1.0 joven, 0.1-0.5 es intermedio (Zalani et al.,2018).

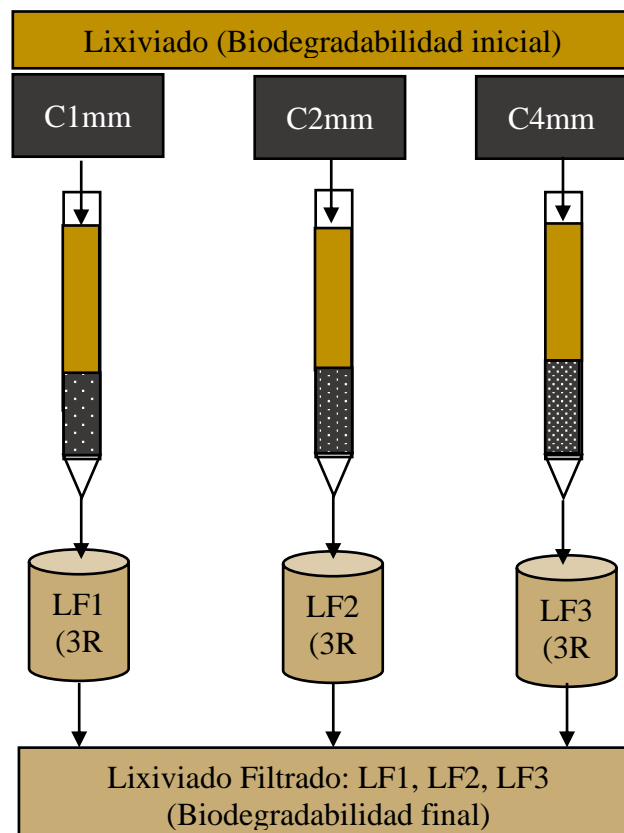
#### **3.2.2.2. Determinación de la influencia de la filtración con carbón vegetal con tres tamaños de partícula diferentes, en la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos municipales a escala de laboratorio.**

##### **Acondicionamiento del filtro de carbón vegetal**

El carbón vegetal fue obtenido en los establecimientos de venta de estos productos, con un mortero se trituró y utilizando las mallas N° 5, 10 y 18, se tamizó y obtuvo los tamaños de partícula deseados, seguidamente se humedeció con agua destilada las partículas de carbón vegetal por 12 horas en agitación(Aragón-Monter et al.,2013) y luego en 03 buretas de 50 mL, se colocaron 10 ml de carbón vegetal con los diferentes tamaños de partícula, con tres repeticiones y se reguló el caudal para obtener un tiempo de retención de 72 horas (Kwarciak-Kozłowska et al., 2019).



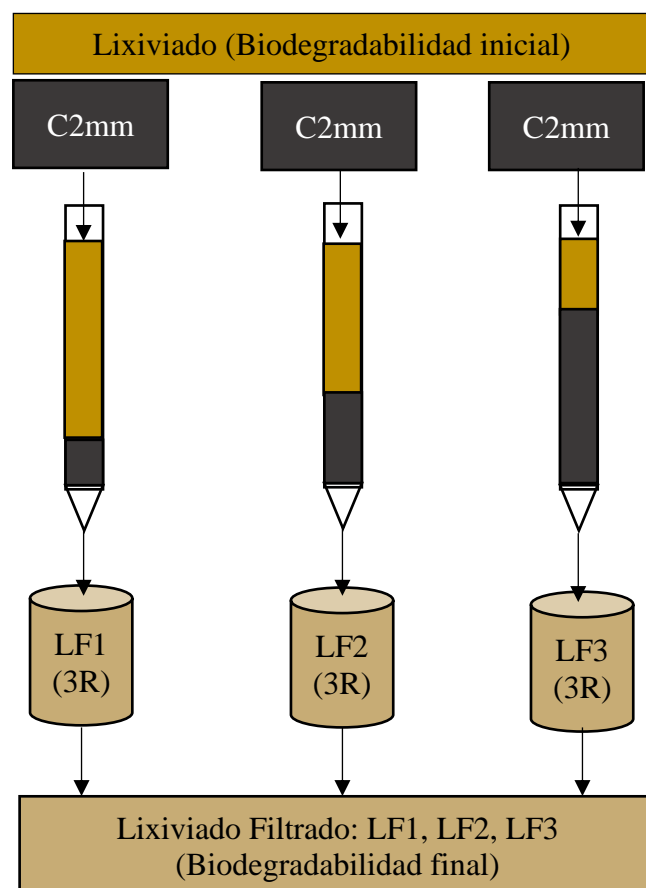
**Figura 5.** Esquema experimental para el acondicionamiento del carbón vegetal.



**Figura 6.** Esquema experimental para evaluación del efecto del tamaño de partícula del lecho filtrante en la biodegradabilidad del lixiviado

**3.2.2.3. Determinación de la influencia de la filtración con carbón vegetal con tres volúmenes del lecho filtrante diferentes, en la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos municipales a escala de laboratorio.**

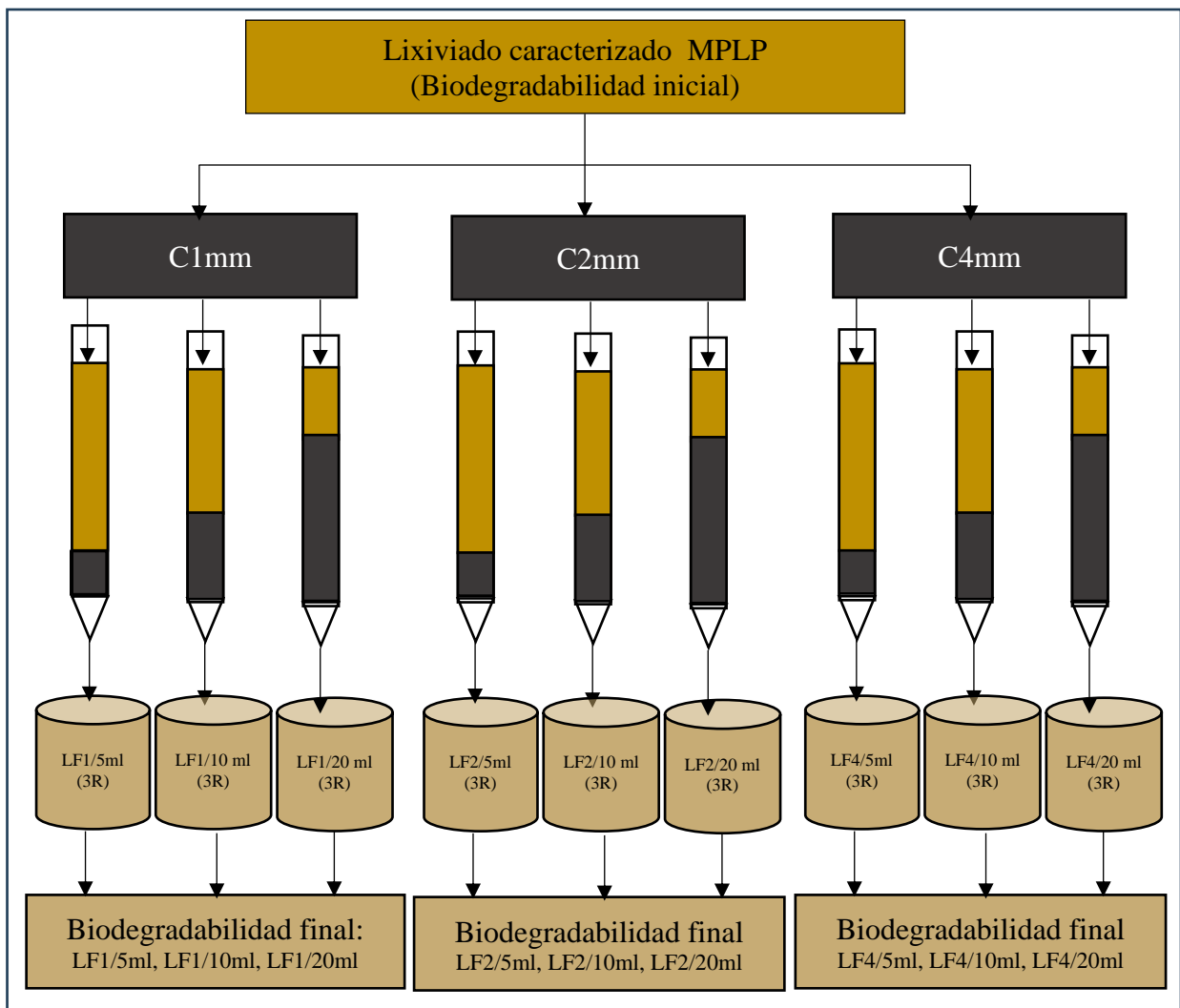
En este objetivo se utilizó el lixiviado colectado de las celdas transitorias de la Municipalidad de Leoncio Prado, el cual fue previamente caracterizado como ya se mencionó, así también el carbón será acondicionado según lo descrito en el objetivo anterior utilizando un tamaño de partícula de 2 mm tomando como referencia la metodología de Aragón-Monter et al. (2013). Utilizando 03 buretas de 50 mL se colocarán, 5 mL, 10 mL y 20 mL de carbón vegetal y se vació el lixiviado para proceder a regular un caudal que permita un tiempo de retención de 72 horas (Kwarciak-Kozłowska et al., 2019). Luego se determinó la biodegradabilidad del lixiviado por la relación  $DBO_5/DQO$ , según Zalani et al. (2018).



**Figura 7.** Esquema experimental para evaluación del efecto de volumen de lecho filtrante en la biodegradabilidad del lixiviado

**3.2.2.4. Determinación de la influencia de la filtración con carbón vegetal con tres tamaños de partícula y tres volúmenes del lecho filtrante diferentes, en la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos municipales previamente caracterizado.**

En este objetivo se utilizó el lixiviado colectado de las celdas transitorias de la Municipalidad de Leoncio Prado, el cual fue previamente caracterizado como ya se mencionó, así también el carbón fue acondicionado según lo descrito en el objetivo anterior, y se tamizaron a tres tamaños de partícula: 1mm, 2 mm y 4 mm. Luego utilizando 09 buretas de 50 mL se colocarán, 5 mL, 10 mL y 20 mL de carbón vegetal y se vaciará el lixiviado para proceder a regular un caudal que permita un tiempo de retención de 72 horas (Kwarciak-Kozłowska et al., 2019). Cada tratamiento fue realizado con tres réplicas. Luego se determinó la biodegradabilidad del lixiviado por la relación  $DBO_5/DQO$ , según Zalani et al. (2018).



**Figura 8.** Esquema experimental para evaluación del efecto de volumen de lecho filtrante y tamaño de partícula del filtro de carbón en la biodegradabilidad del lixiviado

### 3.2.2.5. Criterios de estudio

#### Nivel de investigación

La presente investigación tiene un nivel explicativo, ya que se utilizó la recolección de datos de las variables en estudio, para probar una hipótesis con base en la medición numérica (Hernández et al., 2010).

#### Tipo de investigación

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

#### Método de investigación

El método de investigación fue inductivo y analítico, el primer método utiliza el razonamiento para obtener conclusiones que parten de hechos aceptados como válidos, mientras que con el método analítico se estudió y conocieron los resultados obtenidos.

#### Diseño de investigación

Considerando la manipulación de las variables independientes, el diseño fue experimental y factorial  $2^3$ , es decir dos factores y tres niveles (Hernández et al., 2014).

**Tabla 3.** Variables de investigación

| Tipos de variable | Descripción de la variable                     | Dimensiones  | Indicadores   |
|-------------------|--|--|---|
| Independientes    | La filtración con carbón vegetal del lixiviado | 1.El tamaño de partícula de carbón vegetal           | Medida de la partícula de carbón: 1 mm, 2mm, 4mm.   |
|                   |  | 2.El volumen del lecho filtrante del carbón vegetal. | Medida del espacio ocupado por el lecho: 5 ml, 10 ml, y 20 ml.                                      |
| Dependiente       | La biodegradabilidad del lixiviado.            | Valor del cociente de la DBO y la DQO del lixiviado. | Variación del valor del cociente de DBO/DQO del lixiviado antes y después de aplicar la filtración. |

**Tabla 4.** Niveles para los factores de la investigación

| Factores | Nivel (1) | Nivel (2) | Nivel (3) |
|----------|-----------|-----------|-----------|
| A        | A1        | A2        | A3        |
| B        | B1        | B2        | B3        |

Donde:

A: El tamaño de partícula del carbón vegetal: A1: 1mm, A2: 2 mm, A3: 4mm

B: El volumen del lecho filtrante de carbón vegetal: B1: 5ml, B2: 10 ml, B3: 20 ml

**Tabla 5.** Matriz de diseño de la investigación

| N° | A                               | B                                       | Biodegradabilidad del lixiviado |
|----|---------------------------------|---|---------------------------------|
|    | (Tamaño de partícula de carbón) | (Volumen del lecho filtrante de carbón) | (unidades)                      |
| 1  | -1                              | 0                                       | -                               |
| 2  | -1                              | -1                                      | -                               |
| 3  | -1                              | +1                                      | -                               |
| 4  | 0                               | 0                                       | -                               |
| 5  | 0                               | +1                                      | -                               |
| 6  | 0                               | -1                                      | -                               |
| 7  | +1                              | 0                                       | -                               |
| 8  | +1                              | -1                                      | -                               |
| 9  | +1                              | +1                                      | -                               |

A cada tratamiento se le realizó tres réplicas.

Donde:

A: El tamaño de partícula del carbón vegetal: A1: 1mm, A2: 2 mm, A3: 4 mm

B: El volumen del lecho filtrante de carbón vegetal: B1: 5ml, B2: 10 ml, B3: 20 ml

### **3.2.2.6. Análisis estadístico**

Se utilizó el programa InfoStat para realizar un análisis de varianza y establecer la significancia de los resultados obtenidos de los tratamientos.

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSION

##### 4.1. Determinación de la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos municipales previamente caracterizado.

**Tabla 6.** Caracterización fisicoquímica básica del lixiviado.

| Parámetro               | Unidad               | Valor promedio |
|-------------------------|----------------------|----------------|
| DBO <sub>5</sub>        | mg O <sub>2</sub> /L | 2856.00        |
| DQO                     | mg O <sub>2</sub> /L | 10818.33       |
| pH                      | Unidades de pH       | 7.93           |
| Conductividad Eléctrica | μS/cm                | 31580.00       |
| Sólidos Totales         | mg/L                 | 8096.67        |
| Turbidez                | UNT                  | 5675.00        |
| Biodegradabilidad       | -----                | 0.264          |

En la tabla 6, se puede observar que la biodegradabilidad del lixiviado muestreado es baja, esto se debe a la alta concentración de compuestos orgánicos e inorgánicos, de naturaleza no biodegradable, procedentes de la descomposición de los residuos sólidos.

La composición del lixiviado es variable y está en función a los constituyentes de los desechos, el contenido de humedad, la etapa de biodegradación alcanzada por los residuos y otros factores determinantes como el tipo de microbiota, las condiciones climáticas y la antigüedad del vertedero o procedimientos operativos (Šabić et al.,2019).

Los lixiviados de vertederos son efluentes acuosos complejos, por su naturaleza cualitativa y cuantitativa, que se forman debido a la percolación del agua de lluvia a través de los desechos, el agua que contienen los desechos y los procesos bioquímicos que permiten la descomposición de estos dentro de las celdas del vertedero. La calidad de los lixiviados se rige por varios factores tales como la tipología de residuos, las condiciones climáticas regionales y, especialmente, la antigüedad del vertedero, se consideran entre los principales factores que afectan la composición de los lixiviados de los vertederos (Corsino et al.,2020).

La consecuencia del vertido de residuos en vertederos es la formación de lixiviados, el rasgo característico de los cuales es la variable cantidad y calidad a lo largo del tiempo,

dependiendo del tipo de residuos depositados y del método de explotación del vertedero (Talalaj,2019).

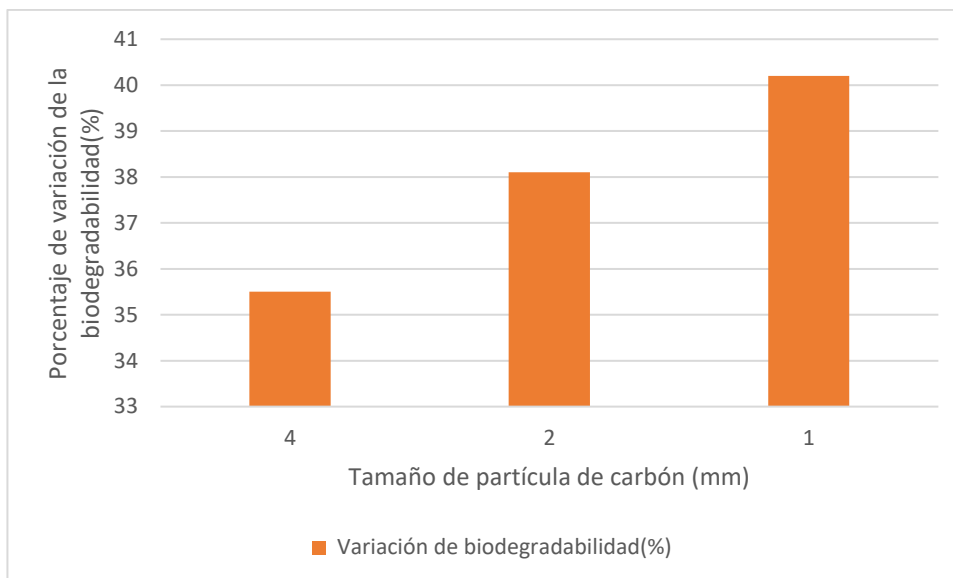
#### 4.2. Determinación de la influencia de la filtración con carbón vegetal con tres tamaños de partícula diferentes, en la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos municipales a escala de laboratorio.

**Tabla 7.** Efecto del tamaño de partícula de carbón vegetal en la biodegradabilidad del lixiviado.

| Biodegrad.<br>Inicial<br>Lixiviado | Tamaño<br>partícula<br>de<br>carbón<br>(mm) | Lixiviado Filtrado           |   |                              | Variación de<br>biodegradabilidad<br>(%) |                     |
|------------------------------------|---|------------------------------|---|------------------------------|--|---------------------|
|                                    |   | Tto.<br>de<br>carbón<br>(mm) | DBO <sub>5</sub><br>(mgO <sub>2</sub> /L) | DQO<br>(mgO <sub>2</sub> /L) |  | Biodegrad.<br>Final |
| 0.264                              | TT1   | 4                            | 2342.0                                    | 6543.3                       | 0.36                                     | 35.6                |
|                                    | TT2   | 2                            | 2383.6                                    | 6536.0                       | 0.36                                     | 38.1                |
|                                    | TT3   | 1                            | 2349.9                                    | 6356.2                       | 0.37                                     | 40.2                |

En la tabla 7, se puede observar que la filtración con partículas de carbón de menor tamaño incrementa la biodegradabilidad del lixiviado. En este experimento se comprobó que la DQO disminuye en forma directa al tamaño de partícula del carbón, este efecto puede ser producto del incremento del área superficial que se obtiene en el lecho filtrante cuando disminuye el tamaño de partícula, además no se puede descartar el desarrollo de fuerzas de atracción que puede tener la superficie del carbón, que si bien es cierto no se trata de una superficie activada, como el caso de un carbón activado, puede haber presencia de compuestos del carbón que reaccionen con los compuestos no biodegradables del lixiviado.

La figura 9, nos permite visualizar en forma más clara la relación de proporcionalidad que tiene el efecto del tamaño de partícula de carbón sobre la variación de la biodegradabilidad del lixiviado, donde predomina una relación inversa entre estos factores.



**Figura 9.** Variación de la biodegradabilidad del lixiviado con filtración de carbón con diferentes tamaños de partícula.

Olabisi et al. (2023), desarrollaron una investigación en Nigeria referente a la caracterización fisicoquímica del carbón, basados en el conocimiento del efecto de la temperatura del proceso de carbonización y de la composición de la biomasa leñosa utilizada como materia prima del proceso, para esto trabajaron con cuatro muestras de biomasa leñosa, se analizaron eficazmente en cuanto a composición, productos de descomposición térmica y cinética de descomposición térmica. Dado que la identificación reveló niveles más altos de lignina, cenizas y extractos en la biomasa leñosa y en las muestras de carbón generado, hubo cambios notables en la composición de estas muestras de biomasa. Se determinó que la degradación térmica de la biomasa relevante involucraba predominantemente procesos de reacción complejos y de múltiples pasos.

El biocarbón y el carbón común, son materiales que son producidos de una manera similar, utilizando residuos de biomasa vegetal, sin embargo se distinguen por el uso que se les da, que puede ser como mejorador de suelos si es biocarbón o como combustible, que es el carbón común. El biocarbón, es obtenido a temperaturas que fluctúan entre los 450 °C y los 700 °C, según la clasificación de la Iniciativa Internacional de Biocarbón, sin embargo, algunas investigaciones reportan temperaturas de obtención de 250 °C a 300 °C resultando un producto con mayor rendimiento y gran capacidad de intercambio catiónico (Shaaban et al., 2014).

El biocarbón o carbón vegetal presenta partículas de tamaños variados, característica que se asocia al origen y volumen de la biomasa. Después de su proceso térmico,

resultan con una alta porosidad de distintas formas y tamaños de poros. Presentan macroporos formados debido a los espacios propios de la biomasa y microporos formado por el proceso de obtención. Es debido a los poros que pueden ejercer la adsorción de compuestos líquidos, sólidos y gaseosos, que se ve favorecida por el área superficial y la presencia de grupos funcionales en la superficie del biocarbón, constituyendo una alternativa para su uso en remoción de contaminantes en diversos efluentes (Présiga- López et al.,2021).

#### 4.3. Determinación de la influencia de la filtración con carbón vegetal con tres volúmenes del lecho filtrante diferentes, en la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos municipales a escala de laboratorio.

**Tabla 8.** Efecto del volumen del lecho filtrante de carbón vegetal en la biodegradabilidad del lixiviado.

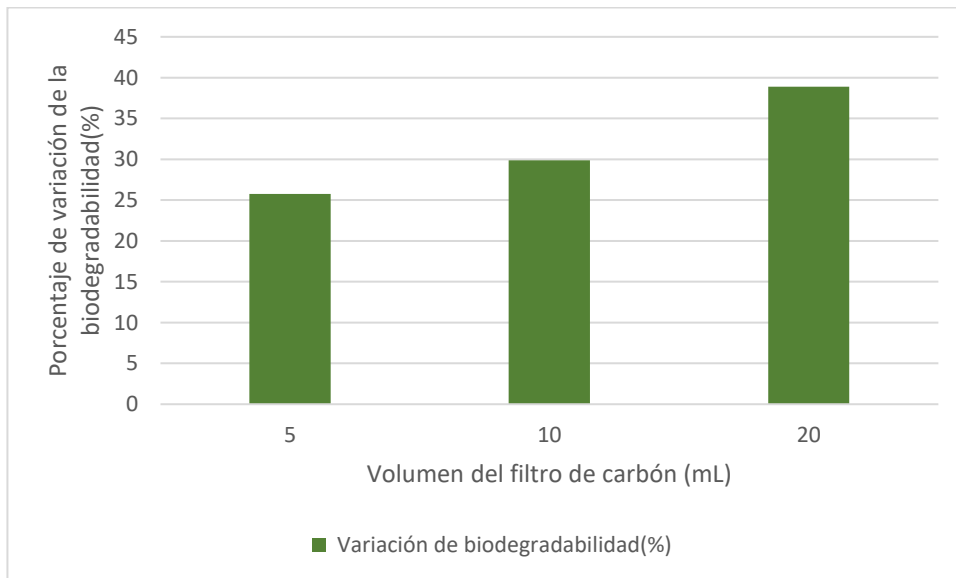
| Biodegrad.<br>inicial | Trat. | Volumen<br>de filtro<br>de carbón<br>(ml) | Lixiviado Filtrado                        |                              | Variación de        |                          |
|-----------------------|-------|---|---|------------------------------|---------------------|--------------------------|
|                       |       |   | DBO <sub>5</sub><br>(mgO <sub>2</sub> /L) | DQO<br>(mgO <sub>2</sub> /L) | Biodegrad.<br>Final | biodegradabilidad<br>(%) |
| 0.264                 | TV1   | 5   | 2603.78                                   | 7843.33                      | 0.33                | 25.76                    |
|                       | TV2   | 10  | 2096.62                                   | 6115.33                      | 0.34                | 29.86                    |
|                       | TV3   | 20  | 1854.05                                   | 5056.67                      | 0.37                | 38.89                    |

En la Tabla 8, se observa que cuando el volumen del lecho filtrante es mayor, la biodegradabilidad del lixiviado se incrementa, esto se debería al incremento de área superficial del lecho filtrante que implica la mayor retención de partículas suspendidas de tamaño coloidal, sino también la posibilidad de ejercer de manera más prolongada la adsorción de compuestos iónicos presentes en el lixiviado, procesos que al desarrollarse reducen carga orgánica.

Con la figura 10, se puede visualizar que a mayor volumen de lecho filtrante, mayor es el porcentaje de variación de la biodegradabilidad lixiviado, la cual tiende a disminuir proporcionalmente al incremento de volumen de filtro empleado.

Souza et al. (2021), realizaron una investigación para conocer el efecto de la reducción de la profundidad del lecho filtrante de un filtro lento de arena, aquí se experimentó con agua de río pretratada mediante sedimentación y se evaluaron la variación parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, estos investigadores trabajaron con dos filtros y probaron dos niveles de

profundidad uno de 50 cm y el otro de 25 cm, la filtración fue ejecutada en flujo continuo, el agua de río fue desinfectada con hipoclorito de sodio después de la filtración. Los resultados indicaron que la reducción de la profundidad del medio no obstaculizó el rendimiento continuo del filtro lento de arena para casi todos los parámetros evaluados. Sin embargo, puede haber afectado la retención de quistes de *Giardia*, que pasaron por los medios más delgados en un día de evaluación. La desinfección fue eficaz para reducir las bacterias restantes del agua filtrada; sin embargo, fue ineficaz para inactivar los protozoos. La reducción de la capa de filtración no afectó la calidad o cantidad general del agua filtrada. Estos resultados difieren de los obtenidos en la presente investigación, donde la profundidad del lecho filtrante si ha tenido un efecto significativo, cabe destacar la diferencia del material del medio filtrante, donde el carbón vegetal, puede desarrollar, no solo retención de partículas suspendidas, si no también, una adsorción.

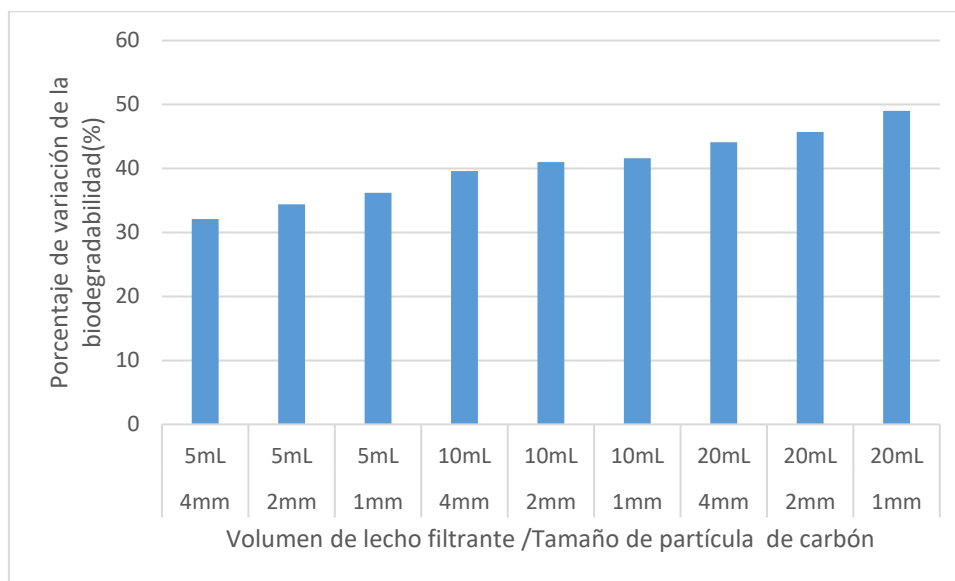


**Figura 10.** Variación de la biodegradabilidad del lixiviado con filtración de carbón con diferentes volúmenes de lecho filtrante.

**4.4. Determinación de la influencia de la filtración con carbón vegetal con tres tamaños de partícula y tres volúmenes del lecho filtrante diferentes, en la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos municipales previamente caracterizado.**

**Tabla 9.** Efecto del tamaño de partícula y volumen del lecho filtrante de carbón vegetal en la biodegradabilidad del lixiviado.

| Biodegrad. inicial | Tto | Tamaño de partícula de carbón (mm) | Volumen de filtro de carbón (ml) | Lixiviado Filtrado                     |                           |                  | Variación de biodegradabilidad (%) |
|--------------------|-----|------------------------------------|----------------------------------|--|---------------------------|------------------|------------------------------------|
|                    |     |                                    |                                  | DBO <sub>5</sub> (mgO <sub>2</sub> /L) | DQO (mgO <sub>2</sub> /L) | Biodegrad. Final |                                    |
| 0.264              | T1  | 4                                  | 5                                | 2343.0                                 | 6717.3                    | 0.349            | 32.1                               |
|                    | T2  | 2                                  | 5                                | 2157.2                                 | 6079.7                    | 0.355            | 34.4                               |
|                    | T3  | 1                                  | 5                                | 2629.5                                 | 7313.0                    | 0.360            | 36.2                               |
|                    | T4  | 4                                  | 10                               | 2421.6                                 | 6570.7                    | 0.369            | 39.6                               |
|                    | T5  | 2                                  | 10                               | 2589.4                                 | 6955.0                    | 0.372            | 41.0                               |
|                    | T6  | 1                                  | 10                               | 2268.4                                 | 6067.7                    | 0.374            | 41.6                               |
|                    | T7  | 4                                  | 20                               | 2362.7                                 | 6212.0                    | 0.380            | 44.1                               |
|                    | T8  | 2                                  | 20                               | 2202.3                                 | 5725.7                    | 0.385            | 45.7                               |
|                    | T9  | 1                                  | 20                               | 2299.1                                 | 5843.0                    | 0.393            | 49.0                               |



**Figura 11.** Variación de la biodegradabilidad del lixiviado con filtración de carbón con diferentes volúmenes de lecho filtrante y diferentes tamaños de partícula.

En la Tabla 9, se ve el efecto que tiene el tamaño de partícula y de manera paralela el volumen del lecho filtrante en estos resultados resalta la influencia del tamaño de partícula, el cual al ser menor, permite incrementar la eficiencia de filtración del lixiviado, aquí debemos mencionar que la disposición del filtro con distintos tamaños de partícula, para este caso del carbón vegetal, no solo evita la retención de partículas por la reducción de espacios filtrantes

que retiene mayor variedad de partículas, si no también desarrolla un campo eléctrico el cual es más fuerte, cuando las partículas son más pequeñas, ya que se encuentran a una distancia más corta, este campo eléctrico coadyuva no solo a la retención en el filtro por impacto de partículas, si, no que puede eliminar cargas eléctricas de partículas en suspensión y finalmente retenerla en su superficie.

Cheng y Peng (2021), realizaron una importante investigación que permite entender los efectos del tamaño de partícula en la filtración realizada en esta investigación y aunque los materiales de filtración, son diferentes, estos investigadores respaldan el efecto que tiene el tamaño de partícula. La investigación consistió, en probar la diferencia en las eficiencias de filtración, utilizando diferentes tamaños de partículas de un medio filtrante que consistió en un compuesto preparado a partir de partículas de cloruro de sodio y de plata, estos autores midieron las cargas eléctricas a diferentes tamaños de partícula utilizando como indicador de la distribución de Boltzmann. Con los resultados obtenidos, manifiestan que las cargas de las partículas antes del ingreso del efluente al filtro estaban efectivamente en la carga estacionaria de la distribución de Boltzmann, sin embargo, a la salida del filtro del efluente, las partículas se encontraban dentro de un cierto rango de tamaño. Para partículas de menos de 30 nm de tamaño, solo estaban presentes partículas neutras a la salida del filtro. A medida que aumentó el tamaño de las partículas, la fracción neutra de las partículas a la salida del filtro se redujo, pero permaneció más alto que el valor dado por la distribución de carga teórica de Boltzmann, hasta el tamaño aproximado de 500 nm. Este resultado se debe a la acumulación de más partículas cargadas que neutras. Por tanto, la diferencia de la fracción neutra entre las partículas a la entrada y a la salida del filtro es insignificante ya que el tamaño de partícula se reduce a menos de 10 nm, porque la fracción cargada de partículas en la distribución de carga de Boltzmann es insignificante en ese rango. Para partículas de gran tamaño, su captura por los mecanismos electrostáticos en medios electretos se reduce considerablemente debido a la reducción de la movilidad eléctrica.

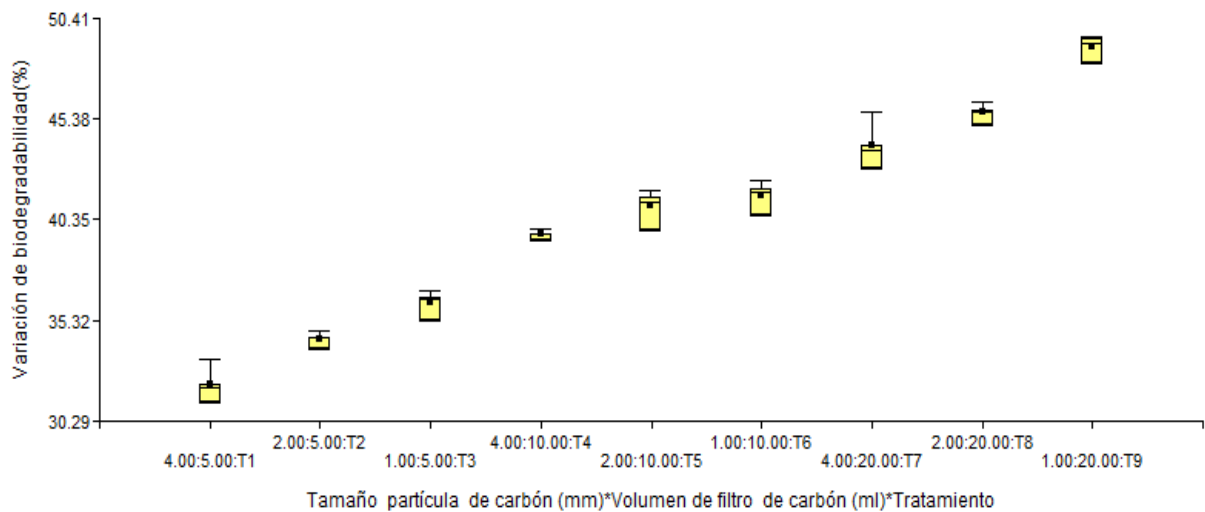
#### **4.5. Resultados del análisis estadístico.**

Del análisis estadístico aplicado con el software Info Stat, con los resultados de la prueba de Tukey se puede afirmar que existe diferencia significativa entre los tratamientos aplicados, tanto para tamaño de partícula, como para volumen del lecho filtrante, es decir la eficiencia de filtración del lixivado con carbon vegetal es estadísticamente diferente en cada caso. En cuanto a la dispersión de datos como se puede ver en la Figura 13, que los valores de desviación

estandar son relativamente bajos, es decir hay una baja variabilidad en los datos experimentales.

| Medidas resumen               |    |         |        |         |         |
|-------------------------------|----|---------|--------|---------|---------|
| Variable                      | n  | Media   | D.E.   | Min     | Máx     |
| Tamaño partícula de carb..    | 36 | 2.33    | 1.26   | 1.00    | 4.00    |
| Volumen de filtro de carb..   | 36 | 11.67   | 6.32   | 5.00    | 20.00   |
| DBO5 Lixiviado Filtrado (mg.. | 36 | 2363.70 | 161.73 | 2066.20 | 2745.90 |
| DQO Lixiviado Filtrado (mg..  | 36 | 6387.11 | 526.10 | 5368.00 | 7620.00 |
| Biodegrad Lixiviado Filtr..   | 36 | 0.37    | 0.01   | 0.35    | 0.40    |
| Variación de biodegradabil..  | 36 | 40.42   | 5.28   | 31.20   | 49.50   |

**Figura 12.** Resumen estadístico básico de los resultados de los tratamientos



**Figura 13.** Gráfico de barras de los tratamientos aplicados a diferentes tamaños de partícula y diferente volumen de lecho filtrante.

## V. CONCLUSIONES

La biodegradabilidad del lixiviado de los residuos sólidos municipales, fue baja, siendo la DBO la tercera parte de la DQO.

El menor tamaño de partícula de carbón vegetal, permitió el mayor incremento de la biodegradabilidad del lixiviado.

El mayor volumen de lecho filtrante de carbón vegetal, permitió el mayor incremento de la biodegradabilidad del lixiviado.

Con el menor tamaño de partícula y mayor volumen de lecho filtrante de carbón vegetal, se obtuvo mayor incremento de la biodegradabilidad del lixiviado.

Solo dos de los nueve tratamientos aplicados, el T8 y T9 cumplieron con lo planteado en la hipótesis de la investigación: el incremento de la biodegradabilidad de un lixiviado de residuos sólidos municipales a escala de laboratorio por influencia de la filtración con carbón vegetal más del 45%.

## **VI. PROPUESTAS A FUTURO**

Con los resultados obtenidos, se puede realizar una investigación que permita evaluar el beneficio costo, de la utilización del carbón activado como un material que mejora la biodegradabilidad de los lixiviados.

Realizar una investigación, en la cual se evalúe la eficiencia del carbón vegetal como un medio de soporte para microorganismos eficientes que puedan ser usados en la mejora del tratamiento de lixiviados.

Desarrollar una investigación en depuración del lixiviados, con el uso de carbón vegetal, considerando su efecto sobre los metales pesados y el tiempo de vida útil que tendría este material.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Agua Sigma (2021). Lixiviados: soluciones eficaces para el medio ambiente y tratamientos propuestos por SIGMA, <https://aguasigma.com/es/articulos-tecnicos/tratamiento-de-lixiviados-en-vertederos>.
- Aragón -Monter, J., Ramírez-Godínez, J., Coronel-Olivares C., Lucho-Constantino, C., Vázquez-Rodríguez, G. (2013). Uso de Carbón Activado Granular (CAG) en un biofiltro para el tratamiento de efluentes acuícolas, Simposio Iberoamericano Multidisciplinario de Ciencias e Ingeniería, [https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/6239/2013\\_memoria\\_simci\\_roberto.pdf](https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/6239/2013_memoria_simci_roberto.pdf).
- Corsino S., Capodici M., Di Trapani D., Torregrossa M., Viviani G. (2020). Assessment of landfill leachate biodegradability and treatability by means of allochthonous and autochthonous biomasses. *New Biotechnology* (55),91-97. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2019.10.007>.
- Chen D., Peng Wang (2021). On the Filtration Efficiency of Composite Media Composed of Multiple Layers of Electret Media. *Aerosol and Air Quality Research*,21,6. <https://doi.org/10.4209/aaqr.210005>.
- Díaz, M., Gonzales,A., Sifuentes,D.,González, E.,(2010). El carbón vegetal: alternativa de energía y productos químicos. *Xilema* 23 (1), <https://doi.org/10.21704/x.v23i1.813>.
- 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.
- Hans-Jürgen E. , Stegmann R.,(2018). Chapter 10.2 - Leachate Quality, Editor(s): Raffaello Cossu, Rainer Stegmann, Solid Waste Landfilling, Elsevier, Pages 511-539, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407721-8.00026-7>
- Hernández R., Fernández C. Baptista M. (2010). Metodología de la Investigación, Mcgraw-Hill / Interamericana editores, S.A. de C.V. Quinta Edición.
- Igwegbe, C.A.; Kozłowski, M.; Wąsowicz, J.; Pęczek, E.; Białowiec, A. (2024). Nitrogen Removal from Landfill Leachate Using Biochar Derived from Wheat Straw. *Materials* , 17, 928. <https://doi.org/10.3390/ma17040928>.

- Kwarciak-Kozłowska, A., Włodarczyk R., Wystalska, K.,(2019) Biochar compared with activated granular carbon for landfill leachate treatment. *E3S Web of Conferences 100*, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/2019100000> EKO-DOK 2019 42 42.
- Mesa-Pérez, J. M., Cortez, L. A. B., Marín-Mesa, H. R., Rocha, J. D., Peláez-Samaniego, M. R., & Cascarosa, E. (2014). A statistical analysis of the auto thermal fast pyrolysis of elephant grass in fluidized bed reactor based on produced charcoal. *Applied Thermal Engineering*, 65(1-2), 322-329. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.12.072>.
- Nai Yuh Yek,P., Cheng Li, Wanxi Peng, Chee Swee Wong, Rock Keey Liew, Wan Adibah Wan Mahari, Christian Sonne, Su Shiung Lam(2021)Production of modified biochar to treat landfill leachate using integrated microwave pyrolytic CO<sub>2</sub> activation, *Chemical Engineering Journal*,425,131886,<https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131886>.
- Nath A., Debnath A.(2022) A short review on landfill leachate treatment technologies, *Materials Today: Proceedings 67*, 8, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.109>
- Ninan K., Zambrano M. (2019). Tratamiento de los lixiviados del relleno sanitario de Jaquira por electrocoagulación. [Tesis para optar el título de Ingeniero Químico, Universidad Nacional San Antonio de Abad de Cusco].
- Olabisi, Adebayo, Balogun, Ayokunle, Oni, Taiwo, Fakinle, Bamidele, Sotoudehnia, Farid, Mcdonald, Armando Ikubanni, Peter. (2023). Physicochemical Characterization of Woody Lignocellulosic Biomass and Charcoal for Bio-energy Heat Generation. *Scientific Reports*. 13. [10.1038/s41598-023-46054-7](https://doi.org/10.1038/s41598-023-46054-7).
- Pozo J., García J., Vasquez Y. (2020). Estimación del caudal medio de lixiviados generados en el vertedero de Viñales, Pinar del Río. *Avances*,22(3).
- Pratibha G., Sunil K. (2021). Characterisation of Hazardous Waste Landfill Leachate and its Reliance on Landfill Age and Seasonal Variation: A Statistical Approach, *Journal of Environmental Chemical Engineering*,9, 4. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105496>.
- Présiga-López, D., Rubio-Clemente, A., & Pérez, J. F. (2021). Uso del biocarbón como material alternativo para el tratamiento de aguas residuales contaminadas. *Revista UIS Ingenierías*, 20(1), 121-134. <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n1-2021011>
- Puerta, R., Aguirre, C., Guerra, J., Cerna-Cueva, A. F., Ríos, W., Dueñas, M., & Paredes, C. (2024). Impact of leachate on soil microbial diversity and its treatment. *Scientia Agropecuaria*, 15(2), 301-310. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2024.023>.
- Rohers F., Dalsasso R., Nadaleti W., Seleme M., Borges de Castilhos A., (2021).Physical–chemical pre-treatment of sanitary landfill raw leachate by direct ascending filtration, *Chemosphere*, 285,131362,<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131362>.

- Ruiz F., Miganjos O. (2023). El carbón vegetal: proceso de producción, calidad y rendimiento. *Noticiencia Forestal*, volumen 4. [file:///C:/Users/U/Downloads/Noticiencia\\_Forestal\\_No\\_4\\_El\\_carbon\\_vegetal.pdf](file:///C:/Users/U/Downloads/Noticiencia_Forestal_No_4_El_carbon_vegetal.pdf).
- Šabić Runjavec, M., Kučić Grgić, D., Vuković Domanovac, M. (2019). Evaluation of biodegradability and environmental impact of biowaste leachate. *The holistic approach to environment* 1, 1 – 7. <http://dx.doi.org/10.33765/thate.9.1.1>.
- Servindi (2024). La realidad de los residuos sólidos en el Perú | Servindi - Servicios de Comunicación Intercultural. [www.servindi.org/actualidad-noticias/12/07/2022/larealidad-de-los-residuos-solidos-en-el-peru](http://www.servindi.org/actualidad-noticias/12/07/2022/larealidad-de-los-residuos-solidos-en-el-peru).
- SINIA (2019). Informe Nacional sobre el Estado del Ambiente 2014-2019. Recuperado de: [sinia.minam.gob.pe/inea/indicadores/numero-de-rellenossanitarios-por-departamento-2019/](http://sinia.minam.gob.pe/inea/indicadores/numero-de-rellenossanitarios-por-departamento-2019/).
- Shaaban, A., Se, S. M., Dimin, M. F., Juoi, J. M., Mohd Husin, M. H., & Mitan, N. M. M. (2014). Influence of heating temperature and holding time on biochars derived from rubber wood sawdust via slow pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 107, 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.01.021>.
- Souza B., Costa U., De Melo N., Fava, L., Sabogal-Paz P.(2021).Filter media depth and its effect on the efficiency of Household Slow Sand Filter in continuous flow, *Journal of Environmental Management*, 288, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112412>.
- Tałałaj, I. A. (2019). Quality of Leachate from Landfill with Reverse Osmosis Concentrate Recirculation. *Journal of Ecological Engineering*, 20(8), 205-211. <https://doi.org/10.12911/22998993/111711>.
- Tan Y., Lau W., Mohd Nawi N., Roslan R., Soon Ng P.(2024). Assessing Membrane Performance for Landfill Leachate Treatment in Accordance with Local Regulatory Requirements. *Journal of Membrane Sciences & Research*.10,1. <https://doi.org/10.22079/jmsr.2023.2001956.1610>.
- Telwesa (2019). Lixiviados de vertedero de residuos sólidos urbanos. *Telwesa*. <https://telwesa.com/lixiviados-de-vertedero-de-residuos-solidos/>.
- Ticona-Ramos, J. A. & Pineda-Tapia, J. L. (2023). Tratamiento de los lixiviados de residuos sólidos en las celdas de Huanuyo mediante oxidación avanzada foto - fenton. *ÑAWPARISUN – Revista de Investigación Científica de Ingenierías*, 4(3), 85-92. DOI: <https://doi.org/10.47190/nric.v4i3.268>.

- Tu Anqi , Zhang Zhiyong , Hao Suhua , Li Xia (2020). Review on landfill leachate treatment methods. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 565 012038.
- Valverde, J., Arias, D., Campos, R., Guevara, M. (2018). Caracterización física y química del carbón de tres segmentos de fuste y ramas de *Eucalyptus camadulensis* Dehnh. proveniente de plantaciones dendroenergéticas. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 15 (1): 16-24, DOI: 10.18845/rfmk.v15i1.3774.
- Vázquez, G., Beltrán, R, (2004). Pruebas Normalizadas para la Evaluación de la Biodegradabilidad de Sustancias Químicas. Estado de Hidalgo, México.
- Wanida K., Agapol J., Savitri G., Orachorn K., Promporn K., Rousset P.(2019). Charcoal production processes: an overview. *Journal of Sustainable Energy & Environment* (10) 19-25.
- Wdowczyk A, Szymańska-Pulikowska A (2020). Diferencias en la composición de lixiviados de vertederos de residuos municipales activos y no operativos en Polonia. *agua* 12(11):3129. <https://doi.org/10.3390/w12113129>.
- Yaranga J. (2021). Eficiencia de la oxidación Fenton y Foto Fenton en la remoción de DQO en lixiviados del botadero “El Porvenir”, distrito de El Tambo, Huancayo, Junín. [Tesis de para obtener el título de Ingeniero Ambiental, Universidad César Vallejo]
- 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/riium.v18n35a8>.
- Zhao Youcai (2019). Tecnología de Control de Contaminación para Lixiviados de Residuos Sólidos Municipales, <https://doi.org/10.1016/C2017-0-03224-X>.
- Zalani L., Andan N., Zin, N.(2018) Characterization of Leachate at Simpang Rengam Landfill Site, Johor, Malasya., *IOP, Confer. Ser Earth an Environmental Science* 140,012053, doi :10.1088/1755-1315/140/1/012053.

## VIII. ANEXO

### 8.1. Datos experimentales de la investigación

**Tabla 10.** Caracterización fisicoquímica del lixiviado de la investigación.

| Parámetro               | Unidad               | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 | Promedio |
|-------------------------|----------------------|-----------|-----------|-----------|----------|
| DBO <sub>5</sub>        | mg O <sub>2</sub> /L | 2467      | 3973      | 2128      | 2856.00  |
| DQO                     | mg O <sub>2</sub> /L | 11325     | 10240     | 10890     | 10818.33 |
| pH                      | Unidades de pH       | 7.9       | 8.1       | 7.8       | 7.93     |
| Conductividad Eléctrica | μS/cm                | 31450     | 32510     | 30780     | 31580.00 |
| Sólidos Totales         | mg/L                 | 8690      | 7620      | 7980      | 8096.67  |
| Turbidez                | UNT                  | 6240      | 5420      | 5365      | 5675.00  |
| Biodegradabilidad       | -----                | 0.216     | 0.384     | 0.192     | 0.264    |

**Tabla 11.** Determinación de la variación de la biodegradabilidad del lixiviado por efecto del tamaño de partícula de carbón.

| Biodegrad. inicial | Tto. | Tamaño partícula de carbón (mm) | Lixiviado Filtrado                     |                           |            | Variación de biodegradabilidad (%) |
|--------------------|------|---------------------------------|--|---------------------------|------------|------------------------------------|
|                    |      |                                 | DBO <sub>5</sub> (mgO <sub>2</sub> /L) | DQO (mgO <sub>2</sub> /L) | Biodegrad. |                                    |
| 0.264              | TT1  | 4                               | 2373.0                                 | 6542.0                    | 0.36       | 37.4                               |
|                    |      | 4                               | 2098.6                                 | 5968.0                    | 0.35       | 33.2                               |
|                    |      | 4                               | 2554.4                                 | 7120.0                    | 0.36       | 35.9                               |
|                    | TT2  | 2                               | 2454.5                                 | 6520.0                    | 0.38       | 42.6                               |
|                    |      | 2                               | 2570.5                                 | 6935.0                    | 0.37       | 40.4                               |
|                    |      | 2                               | 2292.5                                 | 6124.0                    | 0.37       | 41.8                               |
|                    | TT3  | 1                               | 2346.1                                 | 6180.0                    | 0.38       | 43.8                               |
|                    |      | 1                               | 2298.2                                 | 5890.0                    | 0.39       | 47.8                               |
|                    |      | 1                               | 2135.7                                 | 5560.0                    | 0.38       | 45.5                               |

**Tabla 12.** Determinación de la variabilidad del lixiviado por efecto del volumen del filtro del lecho filtrante.

| Biodegrad.<br>inicial | Tto | Volumen<br>de filtro<br>de carbón<br>(ml) | Lixiviado Filtrado                        |                              | Biodegrad. | Variación de<br>biodegradabilidad<br>(%) |
|-----------------------|-----|---|---|------------------------------|------------|--|
|                       |     |   | DBO <sub>5</sub><br>(mgO <sub>2</sub> /L) | DQO<br>(mgO <sub>2</sub> /L) |            |  |
|                       |     | 5   | 2584.7                                    | 7845.0                       | 0.33       | 24.8                                     |
| 0.264                 | TV1 | 5   | 2851.1                                    | 8563.0                       | 0.33       | 26.12                                    |
|                       |     | 5   | 2375.6                                    | 7122.0                       | 0.33       | 26.35                                    |
|                       |     | 10  | 2141.77                                   | 6258.00                      | 0.34       | 29.64                                    |
| 0.264                 | TV2 | 10  | 2121.13                                   | 6124.00                      | 0.35       | 31.20                                    |
|                       |     | 10  | 2026.98                                   | 5964.00                      | 0.34       | 28.74                                    |
|                       |     | 20  | 1839.84                                   | 5106.00                      | 0.36       | 36.49                                    |
| 0.264                 | TV3 | 20  | 1826.00                                   | 4989.00                      | 0.37       | 38.64                                    |
|                       |     | 20  | 1896.33                                   | 5075.00                      | 0.37       | 41.54                                    |

**Tabla 13.** Determinación de la variación de la biodegradabilidad del lixiviado por efecto del tamaño de partícula de carbón y volumen del lecho filtrante

| Biodegrad. inicial | Tto. | Tamaño partícula carbón (mm) | Volumen de filtro carbón (ml) | Lixiviado Filtrado                     |                           |            | Variación de biodegrad. (%) |
|--------------------|------|------------------------------|-------------------------------|--|---------------------------|------------|-----------------------------|
|                    |      |                              |                               | DBO <sub>5</sub> (mgO <sub>2</sub> /L) | DQO (mgO <sub>2</sub> /L) | Biodegrad. |                             |
| 0.2639963          | T1   | 4                            | 5                             | 2310.6                                 | 6561.0                    | 0.352      | 33.4                        |
|                    | T1   | 4                            | 5                             | 2338.0                                 | 6750.0                    | 0.346      | 31.2                        |
|                    | T1   | 4                            | 5                             | 2380.3                                 | 6841.0                    | 0.348      | 31.8                        |
|                    | T2   | 2                            | 5                             | 2114.6                                 | 5982.0                    | 0.353      | 33.9                        |
|                    | T2   | 2                            | 5                             | 2170.6                                 | 6113.0                    | 0.355      | 34.5                        |
|                    | T2   | 2                            | 5                             | 2186.4                                 | 6144.0                    | 0.356      | 34.8                        |
|                    | T3   | 1                            | 5                             | 2569.2                                 | 7114.0                    | 0.361      | 36.8                        |
|                    | T3   | 1                            | 5                             | 2745.9                                 | 7620.0                    | 0.360      | 36.5                        |
|                    | T3   | 1                            | 5                             | 2573.5                                 | 7205.0                    | 0.357      | 35.3                        |
|                    | T4   | 4                            | 10                            | 2442.8                                 | 6614.0                    | 0.369      | 39.9                        |
|                    | T4   | 4                            | 10                            | 2374.9                                 | 6458.0                    | 0.368      | 39.3                        |
|                    | T4   | 4                            | 10                            | 2447.1                                 | 6640.0                    | 0.369      | 39.6                        |
|                    | T5   | 2                            | 10                            | 2617.4                                 | 6992.0                    | 0.374      | 41.8                        |
|                    | T5   | 2                            | 10                            | 2592.0                                 | 7023.0                    | 0.369      | 39.8                        |
|                    | T5   | 2                            | 10                            | 2558.9                                 | 6850.0                    | 0.374      | 41.5                        |
|                    | T6   | 1                            | 10                            | 2341.9                                 | 6234.0                    | 0.376      | 42.3                        |
|                    | T6   | 1                            | 10                            | 2250.7                                 | 6008.0                    | 0.375      | 41.9                        |
|                    | T6   | 1                            | 10                            | 2212.6                                 | 5961.0                    | 0.371      | 40.6                        |
|                    | T7   | 4                            | 20                            | 2369.4                                 | 6250.0                    | 0.379      | 43.6                        |
|                    | T7   | 4                            | 20                            | 2404.0                                 | 6250.0                    | 0.385      | 45.7                        |
|                    | T7   | 4                            | 20                            | 2314.8                                 | 6136.0                    | 0.377      | 42.9                        |
|                    | T8   | 2                            | 20                            | 2271.8                                 | 5886.0                    | 0.386      | 46.2                        |
|                    | T8   | 2                            | 20                            | 2268.9                                 | 5923.0                    | 0.383      | 45.1                        |
|                    | T8   | 2                            | 20                            | 2066.2                                 | 5368.0                    | 0.385      | 45.8                        |
|                    | T9   | 1                            | 20                            | 2352.3                                 | 5960.0                    | 0.395      | 49.5                        |
|                    | T9   | 1                            | 20                            | 2200.0                                 | 5623.0                    | 0.391      | 48.2                        |
|                    | T9   | 1                            | 20                            | 2345.2                                 | 5946.0                    | 0.394      | 49.4                        |

## 8.2. Resultados del análisis estadístico con el software estadístico InfoStat (Versión libre)

| Análisis de la varianza      |    |                |                   |      |  |
|------------------------------|----|----------------|-------------------|------|--|
| Variable                     | N  | R <sup>2</sup> | R <sup>2</sup> Aj | CV   |  |
| Variación de biodegradabil.. | 36 | 0.97           | 0.97              | 2.26 |  |

| Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I) |        |    |        |        |         |
|---|--------|----|--------|--------|---------|
| F.V.  | SC     | gl | CM     | F      | p-valor |
| Modelo.                                       | 950.04 | 4  | 237.51 | 283.63 | <0.0001 |
| Tamaño partícula de carb..                    | 80.95  | 2  | 40.47  | 48.33  | <0.0001 |
| Volumen de filtro de carb..                   | 869.10 | 2  | 434.55 | 518.92 | <0.0001 |
| Error   | 25.96  | 31 | 0.84   |        |         |
| Total   | 976.00 | 35 |        |        |         |

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.91947  
 Error: 0.8374 gl: 31

| Tamaño partícula de carb.. | Medias | n  | E.E. |   |
|----------------------------|--------|----|------|---|
| 4.00                       | 38.60  | 12 | 0.26 | A |
| 2.00                       | 40.38  | 12 | 0.26 | B |
| 1.00                       | 42.28  | 12 | 0.26 | C |

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

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.91947  
 Error: 0.8374 gl: 31

| Volumen de filtro de carb.. | Medias | n  | E.E. |   |
|-----------------------------|--------|----|------|---|
| 5.00                        | 34.24  | 12 | 0.26 | A |
| 10.00                       | 40.74  | 12 | 0.26 | B |
| 20.00                       | 46.27  | 12 | 0.26 | C |

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

Figura 14. Resultados del análisis de varianza de los datos experimentales.



**Figura 15.** Colección del lixiviado de la investigación



**Figura 16.** Medición de parámetros fisicoquímicos insitu y en el laboratorio



**Figura 17.** Molienda del carbón vegetal



**Figura 18.** Tamizaje del carbón vegetal



**Figura 19.** Incubación de muestras para análisis de DBO



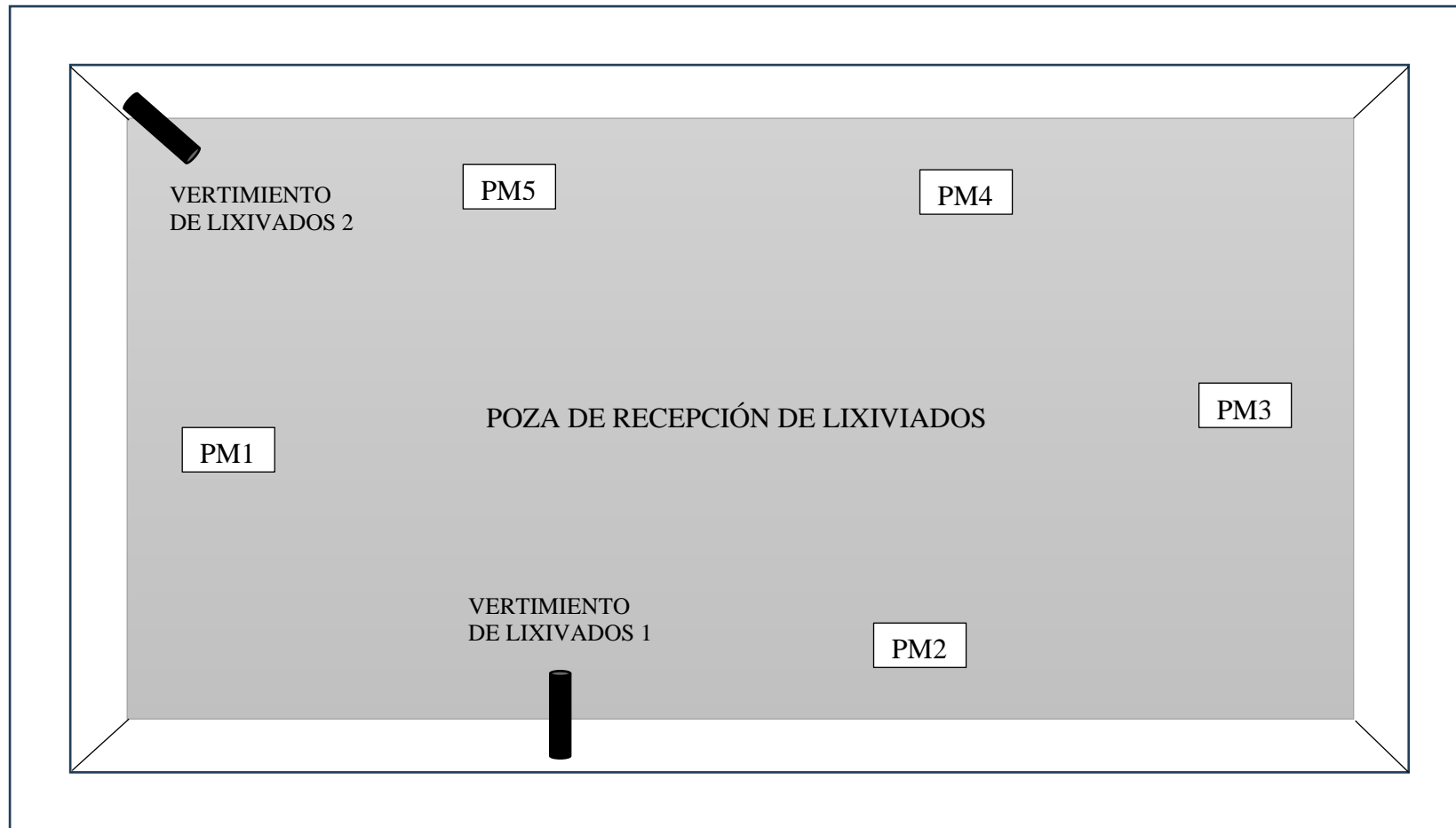
**Figura 20.** Llenado de bureta con el carbón vegetal



**Figura 21.** Carbón vegetal con tres diámetros de partícula para los tratamientos



**Figura 22.** Aplicación de tratamiento de filtración de lixiviado.



Leyenda : PM: Punto de Muestreo

**Figura 23.** Croquis de los puntos de muestreo en la poza de lixiviados.