

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Ambiental



TESIS

**Evaluación de la influencia de la composición de residuos
sólidos municipales en la generación de lixiviados con el método
de biorreactores semiaerobios**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Ambiental

Elaborado por

Bianca Gabriela Reyes Castillo

 [0000-0003-4581-01060](https://orcid.org/0000-0003-4581-01060)

Asesor

MSc. Norvin Plumieer Requena Sánchez

 [00000-0001-6584-1466](https://orcid.org/00000-0001-6584-1466)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Reyes Castillo [1]
Referencia/Reference	[1] B. Reyes Castillo, " <i>Evaluación de la influencia de la composición de residuos sólidos municipales en la generación de lixiviados con el método de biorreactores semiaerobios</i> " [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Reyes, 2025)
Referencia/Reference	Reyes, B. (2025). <i>Evaluación de la influencia de la composición de residuos sólidos municipales en la generación de lixiviados con el método de biorreactores semiaerobios</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

A mis padres Pedro Reyes y Verónica Castillo, por enseñarme a ser una profesional con ética y valores personales; y por, sobre todo, su ejemplo de trabajo arduo y perseverancia que me ha inspirado a alcanzar mis metas.

A todos aquellos familiares, amigos y colegas por brindarme apoyo y aliento durante este trayecto académico.

Agradecimientos

Agradezco a mi asesor MSc. Norvin Requena Sánchez, por su orientación experta y dedicación durante el proceso de la investigación, asimismo por brindarme la confianza y guía necesaria para alcanzar mis metas académicas. Al Grupo de Investigación en Residuos para el Desarrollo Sostenible y Equipo técnico de Residuos Sólidos de la FIA-UNI por su apoyo y amistad para el desarrollo de la tesis. Al Vicerrectorado de Investigación de la UNI por brindar financiamiento de los equipos convocados mediante la Resolución Rectoral N.º 2363-2022-UNI.

Y a nuestros docentes por compartir con nosotros sus amplios conocimientos en la ingeniería, contribuyendo así a la formación de profesionales comprometidos con la mejora continua en la gestión ambiental del país.

Resumen

Ante la implementación de infraestructuras de disposición final con tecnología semiaerobia promovida por el gobierno peruano desde 2012 como alternativa para mitigar gases de efecto invernadero y mejorar la estabilización de residuos, resulta fundamental evaluar su desempeño en el contexto nacional, considerando factores críticos como la variación en la composición de los residuos acorde a las políticas de valorización, que pueden influir significativamente en su impacto ambiental.

Este estudio evaluó el comportamiento de tres biorreactores a escala piloto diseñados para simular rellenos sanitarios semiaerobios. La investigación evaluó la influencia de los porcentajes de segregación de residuos municipales (0 %, 25 % y 50 %) sobre las características del lixiviado. La composición de los residuos ingresados se basó en la generación de residuos municipales de la Municipalidad Metropolitana de Lima (2019–2022). Se analizaron parámetros tanto de las características de los residuos (peso, volumen, sólidos volátiles y totales, densidad de compactación, temperatura y tasa de asentamiento) como del lixiviado (pH, conductividad eléctrica, turbidez, sólidos totales y volátiles, demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno). El análisis estadístico se realizó utilizando ANOVA y la prueba de correlación de Pearson.

Los resultados mostraron que pH, conductividad eléctrica, sólidos totales y volátiles no presentaron diferencias significativas entre biorreactores, esta condición podría estar asociada a la alta proporción de residuos inorgánicos, cuya estabilidad dificulta la biodegradación. En cambio, la turbidez sí mostró diferencias significativas, revelando una fuerte correlación negativa con el porcentaje de aprovechamiento de los residuos: a menor segregación, mayor turbiedad en los lixiviados.

Palabras claves: biorreactores semiaerobios, lixiviados, residuos sólidos, composición.

Abstract

In light of the implementation of final disposal infrastructures using semi-aerobic technology promoted by the Peruvian government since 2012 as an alternative to mitigate greenhouse gas emissions and improve waste stabilization. It is essential to evaluate their performance within the national context, considering critical factors such as variations in waste composition according to waste valorization policies, which may significantly influence their environmental impact.

This study evaluated the behavior of three pilot-scale bioreactors designed to simulate semi-aerobic landfills. The research assessed the influence of municipal waste segregation rates (0 %, 25 %, and 50 %) on leachate characteristics. The input waste composition was based on municipal solid waste data from the Metropolitan Municipality of Lima (2019–2022). Parameters were analyzed for both waste properties (weight, volume, volatile and total solids, compaction density, temperature, and settlement rate) and leachate quality (pH, electrical conductivity, turbidity, total and volatile solids, biochemical oxygen demand and chemical oxygen demand). Statistical analysis was performed using ANOVA and Pearson's correlation test.

Results showed no significant differences in pH, electrical conductivity, total solids, or volatile solids among the bioreactors, a condition likely associated with the high proportion of inorganic waste, whose stability hinders natural biodegradation. In contrast, turbidity exhibited significant differences, revealing a strong negative correlation with waste segregation: lower segregation percentages resulted in higher leachate turbidity.

Keywords: *semiaerobic biorreactors, leachates, solid waste, composition.*

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xiii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Descripción del problema de investigación	1
1.1.1 Formulación del problema	2
1.2 Objetivos del estudio	3
1.2.1 Objetivo general	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Hipótesis	3
1.3.1 Variables e indicadores	4
1.4 Antecedentes	5
1.4.1 Antecedentes a nivel internacional	5
1.4.2 Antecedentes a nivel nacional	8
1.4.3 Justificación e importancia de la investigación.....	8
Capítulo II. Marco teórico y legal	10
2.1 Marco teórico.....	10
2.1.1 Gestión de residuos sólidos municipales	10
2.1.2 Segregación en la fuente de residuos sólidos.....	12
2.1.3 Infraestructuras de disposición final.....	14
2.1.4 Aspectos generados en el relleno sanitario	18

2.1.5	Procesos bioquímicos	22
2.2	Marco legal e institucional	27
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de tesis.....		29
3.1	Tipo y nivel de investigación.....	30
3.2	Unidad de análisis	31
3.3	Población de estudio	31
3.4	Población de estudio	31
3.5	Metodología	33
3.5.1	Caracterización de los residuos sólidos.....	33
3.5.2	Implementación de los biorreactores	35
3.5.3	Puesta en marcha	38
3.5.4	Monitoreo de los parámetros de los residuos sólidos y lixiviados	39
3.5.5	Procesamiento y análisis de datos	46
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados		48
4.1	Análisis de datos	48
4.1.1	Resultados fisicoquímicos de los residuos	48
4.1.2	Resultados fisicoquímicos de los lixiviados	51
4.1.3	Relación estadística	53
4.2	Discusión de resultados	55
4.2.1	Comparación con la normativa	78
4.2.2	Contrastación de la hipótesis.....	80
Conclusiones		82
Recomendaciones		85

Referencias bibliográficas.....	86
Anexos	96

Lista de Tablas

Tabla 1: Variables y su operacionalización	4
Tabla 2: Parámetros fisicoquímicos del lixiviado a diferentes edades de los rellenos sanitarios	20
Tabla 3: Parámetros fisicoquímicos de la calidad de los lixiviados de acuerdo con los tipos de rellenos sanitarios	21
Tabla 4: Principales parámetros de lixiviado y los rangos de concentración de acuerdo con la fase de biodegradación.....	26
Tabla 5: Peso de los residuos sólidos ingresados por biorreactor.....	34
Tabla 6: Técnicas de recolección de información.....	39
Tabla 7: Resultado de los parámetros fisicoquímicos de los residuos en la fase de puesta en marcha	48
Tabla 8: Resultados de parámetros fisicoquímicos de los lixiviados generados en los biorreactores semiaerobios	50
Tabla 9: Resultados de la ratio de asentamiento de los residuos sólidos en los biorreactores.....	51
Tabla 10: Resultados de parámetros fisicoquímicos de los lixiviados generados en los biorreactores semiaerobios	52
Tabla 11: Resultados de parámetros fisicoquímicos de los lixiviados generados en los biorreactores semiaerobios	52
Tabla 12: Resultados de los análisis de varianza de un factor de los parámetros de interés.....	53
Tabla 13: Resultados de los análisis de varianza de un factor de los parámetros de interés.....	55
Tabla 14: Tabla de correlación de la variable composición de residuos sólidos y composición de lixiviados	80

Lista de Figuras

Figura 1: Mecanismo de los rellenos sanitarios semiaeróbicos.....	17
Figura 2: Esquema del proceso de degradación anaerobia	24
Figura 3: Ubicación del módulo de investigación	29
Figura 4: Diagrama de investigación	30
Figura 5: Esquema de biorreactor semiaeróbicos	32
Figura 6: Procesos de implementación de los residuos en los biorreactores	37
Figura 7: Ubicación de las mediciones de temperatura en los residuos	40
Figura 8: Medición de los parámetros de campo: pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y turbiedad del lixiviado	42
Figura 9: Medición de la Demanda Bioquímica de Oxígeno al 5to día en el laboratorio de la FIA	44
Figura 10: Medición de los sólidos totales y sólidos volátiles de los lixiviados	46
Figura 11: Comportamiento del registro de temperatura ambiente en el periodo de investigación	49
Figura 12: Peso y volumen de los residuos ingresados en los biorreactores.	58
Figura 13: Características fisicoquímicas de los residuos sólidos en los biorreactores.....	59
Figura 14: Comportamiento de la temperatura de los residuos sólidos en los tres biorreactores.....	61
Figura 15: Comportamiento de la temperatura en las tuberías de los tres biorreactores.....	63
Figura 16: Comportamiento de la tasa de asentamiento en los lixiviados de los 3 biorreactores durante el proceso de investigación	65
Figura 17: Comportamiento del pH en los lixiviados de los 3 biorreactores durante el proceso de investigación.....	68
Figura 18: Comparación conductividad eléctrica y turbiedad de los lixiviados de los 3 biorreactores durante el proceso de investigación.....	71

Figura 19: Comparación sólidos totales y sólidos volátiles de los lixiviados de los 3 biorreactores durante el proceso de investigación.....	73
Figura 20: Comparación DBO ₅ , DQO y ratio DBO ₅ /DQO de los lixiviados de los 3 biorreactores durante el proceso de investigación	77
Figura 21: Comparación de pH, DBO ₅ y DQO de los lixiviados de los 3 biorreactores con la norma de Austria (2019)	79
Figura 22: Diagrama de cajas y bigotes de la turbiedad del lixiviado de acuerdo con los porcentajes de aprovechamiento de los residuos sólidos	81

Introducción

Actualmente el Perú afronta problemas en el manejo de los residuos sólidos por la escasez de lugares adecuados para la disposición final de los residuos para atender la demanda de la población, se estima que el país requiere 375 infraestructuras de disposición final de residuos sólidos (Ministerio del Ambiente, 2024); sin embargo, al 2023, el Perú cuenta con 71 rellenos sanitarios y 5 celdas transitorias. Cabe precisar que de acuerdo con Sistema de Información para la Gestión de Residuos Sólidos (SIGERSOL) durante el 2023, el 37.73% de los residuos sólidos fueron dispuestos inadecuadamente en Perú, generándose más 3226 áreas degradadas por residuos sólidos municipales y no municipales (Ministerio del Ambiente, 2024), deteriorando la calidad ambiental en el aire, suelo y agua. Por tal motivo, uno de los objetivos prioritarios del Ministerio del Ambiente es incrementar la disposición adecuada de los residuos sólidos, asimismo, enfocándose en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Ante esta realidad, esta entidad promueve desde el 2012, la construcción de rellenos sanitarios con tecnología Fukuoka o semiaerobios en el país, como una medida orientada a la mitigación de gases de efecto invernadero, aceleración de la biodegradación de la materia orgánica y mejora de la calidad de los lixiviados (Ministerio del Ambiente, 2022).

Por lo cual, la presente investigación tiene como objetivo evaluar la influencia de la composición de los residuos orgánicos en la generación de lixiviados considerando las características específicas de condiciones climatológicas y variabilidad de la composición de residuos en términos de segregación.

En el Capítulo I se describen las investigaciones a nivel internacional y nacional relacionadas con el diseño de los rellenos sanitarios semiaerobios, resultados y recomendaciones que obtienen en dichos trabajos. Estos resultados muestran el interés de la comunidad científica por diseñar biorreactores con mayores eficiencias

para la reducción del impacto ambiental del sistema de disposición final. Asimismo, se formuló el alcance e importancia de la investigación.

En el Capítulo II Marco teórico y legal, se describe las teorías que fundamentan al trabajo de investigación, además de normas nacionales que se aplican en relación con los diseños de los rellenos semiaerobios y gestión de residuos sólidos.

En el Capítulo III Desarrollo de trabajo de tesis, se describe los procedimientos desarrollados para la evaluación del comportamiento de los lixiviados en los biorreactores asimismo los recursos y materiales empleados.

En el Capítulo IV Análisis y discusión, se describe los resultados de las mediciones efectuadas del comportamiento de la composición de los lixiviados de los biorreactores semiaerobios a diferente composición de residuos sólidos municipales.

Se incluyen las conclusiones y recomendaciones pertinentes; así como, las referencias bibliográficas y anexos.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Descripción del problema de investigación

El Perú es un país de baja generación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) tanto a nivel per cápita y total, representando solo el 0.3% sobre el total de emisiones de GEI a nivel mundial, de las cuales aproximadamente la mitad es producto del cambio de uso de suelo y silvicultura. Sin embargo, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) califica al país como un país particularmente vulnerable, debido a los procesos antropogénicos que causan la degradación de ecosistemas y contaminación ambiental (Ministerio del Ambiente, 2016).

En el marco de las iniciativas de la Contribución Prevista y Determinada a Nivel Nacional (INDC, por sus siglas en inglés) del Perú para mitigar los GEI, se propuso la implementación de la tecnología semiaeróbica en los rellenos sanitarios como una alternativa en el sector de residuos (Ministerio del Ambiente, 2016), lo cual a nivel normativo en el Decreto Supremo N.º 014-2017-MINAM (Decreto Legislativo aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos - D.L. N.º 1278), establece condiciones para los rellenos sanitarios que gestionen hasta 200 toneladas diarias de residuos sólidos, deben implementar sistemas de captura y quema convencional de gases u otras medidas orientadas a la mitigación de GEI, siendo este último relacionado con la implementación de rellenos sanitarios semiaerobios.

Desde el 2012, el Ministerio del Ambiente, la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) ejecutan el Programa de Desarrollo de Sistemas de Gestión de Residuos Sólidos en 16 zonas prioritarias conformada por Puno, Piura, Ancash, Tumbes, Apurímac, Ica, Huánuco, Puerto Maldonado, San Martín, Junín, Lambayeque, Loreto, Ayacucho, Amazonas, Lima y Pasco. Este programa contempla la implementación de 31 sistemas de gestión integral de residuos sólidos en las regiones, de los cuales en 20 se desarrollan con la tecnología semiaerobios (Ministerio del Ambiente, 2022).

Sin embargo, debido a la reciente implementación de la tecnología semiaerobia en las infraestructuras de disposición final residuos sólidos en el Perú, la información del desempeño es limitada, debido a sus características específicas de condiciones climatológicas tropicales y variabilidad de la composición de residuos por la progresiva implementación de los programas de segregación en la fuente en las municipalidades distritales.

Cabe precisar que de acuerdo con el Decreto Supremo N.º 014-2017-MINAM, el Minam establece metas anuales para la valorización de residuos municipales, con el fin de que gradualmente las municipalidades ejecuten los programas de recolección selectiva y realicen la valorización de acuerdo con su capacidad operativa. En el 2024, el Ministerio de Economía y Finanzas, aprobó las metas para el cumplimiento de los compromisos del Programa de Incentivos a la Mejora de la Gestión Municipal presentando metas de valorización para los residuos orgánicos desde 0.237 % a 81.324%, e inorgánicos desde 0.324% a 24.387 % para las municipalidades distritales.

Por las razones expuestas, se realiza la presente investigación con la finalidad de evaluar la influencia de la composición de los residuos sólidos municipales en la calidad de lixiviados generados en los rellenos sanitarios de tipo semiaeróbicos en Lima, a escala piloto.

1.1.1 Formulación del problema

De acuerdo con la descripción de la realidad problemática y los antecedentes analizados se define el problema que ante la actual implementación de las infraestructuras de disposición final de residuos sólidos con la tecnología semiaeróbicos en el país y el enfoque de economía circular mediante los programas de segregación, se realiza la formulación del estudio de cómo influye la composición de los residuos sólidos municipales en la composición de lixiviados con el método de biorreactores semiaeróbicos.

1.2 Objetivos del estudio

1.2.1 Objetivo general

Evaluar la influencia de la composición de los residuos sólidos municipales en la generación de lixiviados con el método de biorreactores semiaeróbicos.

1.2.2 Objetivos específicos

Para afrontar el trabajo de investigación y dar cumplimiento al objetivo general se han establecido los siguientes objetivos específicos:

- Identificar la composición de residuos sólidos generados en la municipalidad de estudio.
- Caracterizar los parámetros fisicoquímicos de los residuos sólidos a ingresar a los biorreactores (humedad y densidad).
- Analizar el comportamiento de los parámetros: pH, conductividad eléctrica, turbiedad, sólidos totales y sólidos volátiles de los lixiviados en los biorreactores semiaeróbicos a diferentes composiciones de residuos sólidos municipales.
- Analizar el comportamiento de concentración de DBO₅ y DQO de los lixiviados en los biorreactores semiaeróbicos a diferentes composiciones de residuos sólidos municipales.

1.3 Hipótesis

En esta investigación se plantea que la composición de los residuos sólidos municipales tiene una influencia significativa en la composición de los lixiviados generados en biorreactores semiaeróbicos. Se espera que, al incrementar el porcentaje de aprovechamiento de los residuos sólidos dispuestos bajo condiciones semiaerobias, la concentración de materia orgánica en los lixiviados, medida en términos de DBO₅ y DQO, disminuya.

1.3.1 Variables e indicadores

Para esta investigación se estableció la variable independiente cuantitativa composición de los residuos sólidos municipales que implica la proporción de residuos sólidos (orgánicos e inorgánicos) que se genera en el ámbito municipal y su indicador es el porcentaje de peso de residuos.

Además, la variable dependiente cuantitativa se consideró a las características fisicoquímicas del lixiviado que implica la concentración de materia orgánica (DBO₅ y DQO), turbiedad, pH, conductividad eléctrica, sólidos totales y sólidos volátiles. En la Tabla 1 se presenta las variables y su operacionalización.

Tabla 1

Variables y su operacionalización

Variable	Variables	Definición	Tipo por su naturaleza	Indicador
Independiente	Composición de residuos sólidos municipales orgánicos	Proporción de residuos sólidos: orgánicos, inorgánicos, peligrosos.	Cuantitativa	% Peso de residuos
Dependiente	Características fisicoquímicas del lixiviado generado en los biorreactores	Concentración de materia orgánica, turbiedad, pH, conductividad eléctrica, sólidos totales y sólidos volátiles del lixiviado	Cuantitativa	Concentración DBO ₅ , DQO, oxígeno disuelto conductividad pH, sólidos totales y sólidos volátiles

1.4 Antecedentes

1.4.1 Antecedentes a nivel internacional

Numerosos estudios se han enfocado en el concepto de los rellenos semiaerobios, muchos de ellos mediante lisímetros en laboratorio o a escala piloto, evidenciando que los rellenos semiaeróbicos aceleran la biodegradación de la materia orgánica, mejoran la calidad de los lixiviados, reducen las emisiones de GEI con una menor proporción de gases de metano, y, además, promueven la oxidación de amoníaco mejorando la eliminación general de nitrógeno en comparación con los rellenos sanitarios anaerobios de acuerdo a Lavagnolo et al.(2018) y Ahmadifar (2016). Sutthasil et al., (2014) realizó la evaluación del desempeño de los rellenos semiaerobios en condiciones tropicales, determinando la reducción del más del 90 % la fracción orgánica del lixiviado en un periodo de 60 días y la reducción del 90 % de nitrógeno amoniacal a pesar de las condiciones de alta humedad de los residuos, sin embargo, precisa que el proceso de compactación debe ser controlado para facilitar el flujo de aire.

Asimismo, investigaciones realizadas en condiciones de campo en rellenos sanitarios, como la de Azis et al. (2010), confirmaron que los rellenos semiaerobios lograron una mayor estabilización a comparación de un relleno anaerobio y generaron una reducción considerable en la concentración de diversos contaminantes. Para el monitoreo de estas fases de descomposición y la estabilización de los residuos sólidos biorreactores, Mohammad et al. (2022) proponen varios parámetros claves conformados por el pH, la conductividad eléctrica, demanda química de oxígeno (DQO), carbono orgánico, el nitrato, nitrógeno amoniacal, azúcares y ácidos volátiles grasos, debido a que estos parámetros presentan una rápida reducción y posterior estabilización en un valor constante, lo cual es un indicio de que los residuos sólidos han alcanzado la estabilidad.

Ante ello han evaluado el rendimiento de los vertederos de biorreactores semiaerobios, mecanismo de descontaminación y parámetros de comportamiento como se detalla a continuación:

Grossuele y Lavagnolo (2020) determinaron que el mejor rendimiento del proceso semiaerobio es alcanzando una disponibilidad del agua en los residuos sólidos aproximadamente de 1.5 a 2.4 kg H₂O/kg de sólidos totales, en condiciones de residuos sólidos putrescibles bajo condiciones secas y residuos poco putrescibles con disponibilidad de agua controlada. Jiang et al. (2017) evaluaron el impacto del diámetro de la tubería de ventilación en las características de la degradación de los residuos sólidos a escala piloto, determinando que el incremento del diámetro de la tubería de ventilación de 25 mm a 50 mm promueve una ligera mejora en la degradación de los residuos sólidos, asimismo, con respecto a la tubería con diámetro de 75 mm, se incrementó significativamente la degradación de los residuos sólidos en términos de sustancias húmicas, ácido fúlvicos y triptófano.

También se evaluaron los efectos de la cantidad de recirculación del lixiviado y estabilización de los residuos sólidos. Ma et al. (2021) determinaron que el incremento de la cantidad de recirculación es efectivo para la aceleración de la biodegradación de contaminantes, principalmente en DQO (81 % - 92 %), NH₄⁺(86 % - 95 %). Luo et al. (2019) determinaron que una mayor frecuencia de recirculación del lixiviado incrementa la tasa de degradación de nitrógeno total de 0.03698 a 0.02054 mg/L día, amoníaco de 0.01814 - 0.01903 mg/L. día, DQO de 0.01488 a 0.01814 mg/L. día y COT de 0.01166 a 0.01203 mg/l día. Además, Yang (2011) determinó que mediante la recirculación de los lixiviados se obtuvo la reducción de DQO a 260 mg/L, DBO₅ a 31 mg/L, amoníaco a 50 mg/L, metano a 11 % y sólidos volátiles a 15.8 %.

Asimismo, Ma y Li (2021), así como Wu et al. (2017), realizaron simulaciones del proceso de biodegradación, debido a que la degradación en los vertederos es un fenómeno complejo en el que predominan las reacciones bioquímicas. Diversos estudios han desarrollado múltiples parámetros específicos para los lixiviados, los sólidos y los gases, con el fin de determinar el grado de degradación de los residuos.

Con respecto a la generación de gases durante el proceso de los rellenos sanitarios anaerobios. Wu et al. (2017) evaluaron la variación espacio- temporal del gas generado por 2 rellenos semiaeróbicos y anaeróbicos a escala piloto durante 5 años, obteniendo que existe diferencias significativas en la generación de metano y dióxido de carbono. En el sistema semiaerobio registró valores de 2.82 % de metano y 4.13 % de dióxido de carbono mientras que en el anaeróbico el metano registró 5.26 % y dióxido de carbono de 11.98 %. Sin embargo, con respecto a las propiedades de mineralización de los residuos, se observaron pequeñas diferencias.

En otra investigación realizada por Dos Muchangos y Tokai (2022) analizaron la emisión de los gases de efecto invernadero de un botadero a cielo abierto y un relleno semiaerobios en Mozambique, en el cual emplearon la metodología del IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) para predecir los impactos ambientales generación de gases de efecto invernadero (CH₄, CO₂ y N₂) de la reconversión del botadero, obteniendo que la emisión desde 1980 a 2030 en el botadero a cielo abierto fue de 2455 Gg CO₂-eq, de los cuales 568 Gg CO₂-eq corresponde a la contribución de las actividades de quema a cielo abierto. Mientras tanto, las emisiones del relleno semiaerobios desde el 2020 al 2030 fueron de 685 Gg CO₂-eq, lo que corresponde a 40 % menos de las emisiones totales. Dentro de la investigación determinó las siguientes limitaciones: calidad y fiabilidad de los datos, y la proyección de la generación de gases, así como la posibilidad de que los valores puedan modificarse de acuerdo con la operación de los rellenos.

Además, en otras investigaciones evaluaron el desempeño ambiental de los rellenos sanitarios semiaerobios mediante el modelo del Ciclo de Vida, a fin de cuantificar los impactos ambientales. Mazzi et al. (2022), determinaron los impactos ambientales en un relleno semiaerobios hipotético en Italia desde la construcción y operación (20 años), mantenimiento (40 años) cierre (1 año) y conversión (39 años), describiendo que las fases de mayor impacto ambiental son operación y el mantenimiento, debido a la alta generación

de lixiviados de una duración que puede continuar por décadas mientras que la producción del biogás decrece en el tiempo, por lo que el investigador concluye es necesario evaluar tecnologías para la reducción de concentración de las descargas hacia los cuerpos de agua a fin de reducir el impacto ambiental de los rellenos sanitarios, así como la viabilidad económica de la implementación de esta tecnología en los países en desarrollo. Además, Chong et al. (2005), analizaron el costo total del relleno sanitario semiaerobio en Malasia, presentando un costo de inversión de \$ / 1,312,895 o \$/.0.84/ ton residuo, el costo de operación es \$11,132,536 o \$ 7.15 /ton residuos y el costo de cierre es de \$1,138,526 o \$0.89/ton residuos.

1.4.2 Antecedentes a nivel nacional

A nivel nacional se realizaron dos investigaciones sobre el análisis de la implementación de los rellenos sanitarios semiaerobios en el país. La primera investigación desarrollada por Valverde (2021), donde evalúa la implementación de un relleno sanitario en Mariscal Castilla-Alto Utcubamba, provincia de Luya y Chachapoyas, Amazonas, Perú, investigo los términos de disposiciones legales de diseño de la infraestructura disposición final, procedimiento constructivo del relleno sanitario y costos de construcción de infraestructuras de disposición final de los rellenos con el método Fukuoka. La segunda investigación elaborada por Gallegos y Nieto (2023), donde desarrollan una propuesta de disposición final de residuos sólidos basada en el método Fukuoka para el relleno sanitario de Chancay, provincia de Huaral - departamento de Lima, considerando el enfoque ambiental y social.

1.4.3 Justificación e importancia de la investigación

Ante la implementación y construcción de infraestructuras de disposición final con tecnología semiaerobios promovido por el gobierno peruano como una alternativa para la mitigación de los gases de efecto invernadero y mejora en la estabilización de los residuos sólidos, es de suma importancia la evaluación su desempeño en el territorio nacional tomando en consideración uno de los parámetros críticos la variación de la composición

de los residuos que pueden influir considerablemente en el impacto ambiental, por lo que la investigación busca evaluar la influencia de la composición de los residuos sólidos municipales en la calidad de lixiviados generados en los rellenos sanitarios de tipo semiaeróbicos permitiendo generar información para la gestión ambiental y diseño de rellenos sanitarios municipales de acuerdo a los factores propios de cada localidad para asegurar su sostenibilidad.

Los resultados también permitirán comunicar a la población los efectos ambientales que generan los rellenos semiaeróbicos, facilitando el diseño de estrategias para la participación ciudadana de la población y aprobación de los rellenos como una tecnología más eficiente en la disposición de los residuos en su entorno; asimismo, se enfoca en la importancia de la implementación de la segregación en la fuente por parte de la población.

Capítulo II. Marco teórico y legal

2.1 Marco teórico

2.1.1 *Gestión de residuos sólidos municipales*

La gestión de residuos sólidos municipales integra diversos aspectos que incluyen la planificación, ingeniería, organización, administración, y los componentes financieros y legales relacionados con esta actividad. El proceso de la gestión de los residuos incluye diversas etapas que comprenden desde la generación, segregación, almacenamiento, recolección, transferencia, transporte, procesamiento y disposición final de los residuos sólidos (Tchobanoglous et al., 1993). Como señala Schübeler (1997), esta gestión es una tarea compleja que requiere seleccionar y aplicar soluciones técnicas apropiadas para cada etapa del proceso, lo cual depende de la organización y la cooperación entre las comunidades, empresas privadas y autoridades municipales.

En el Perú, el Decreto Legislativo 1278, que aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, define los residuos sólidos municipales como:

...los residuos domiciliarios, los provenientes del barrido y limpieza de espacios públicos, incluyendo las playas, actividades comerciales y otras actividades urbanas no domiciliadas cuyos residuos se pueden asimilar a los servicios de limpieza pública, en todo el ámbito de su jurisdicción.

Además, este decreto establece en su artículo 53 que el manejo integral de los residuos sólidos municipales debe ser coordinado y concertado, en armonía con las acciones de las autoridades nacionales y sectoriales, así como con las políticas de desarrollo nacional y regional. Asimismo, se precisa que el diseño e implementación de los planes de gestión de residuos deben considerar la caracterización de los residuos, objetivos concretos de segregación y valorización con enfoque de sostenibilidad, y la participación vecinal responsable.

De manera similar, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (2014), define los residuos sólidos municipales como residuos no peligrosos de origen domiciliario, comercial e institucional, recolectados y controlados por la autoridad local o municipal. Estas tres categorías de generadores principales son:

- Domiciliario: Residuos provenientes de viviendas unifamiliares y multifamiliares (restos de alimentos, papel, botellas, latas, pañales, descartables entre otros).
- Comerciales: Residuos provenientes de tiendas, oficinas, restaurantes, mercados y otras actividades de no manufactura.
- Institucionales: Residuos provenientes de los servicios públicos (limpieza de calles, poda de árboles, entre otros).

El Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (2002), menciona que la tendencia para resolver de forma eficiente y eficaz los problemas ambientales y sanitarios generados por los residuos sólidos es de forma jerárquica, considerando primero la reducción en la fuente, en segundo lugar, el reciclaje, tercero tratamiento y por último la disposición final en rellenos sanitarios. El manejo integral de residuos sólidos es necesario para el diseño, construcción, operación y cierre.

Por lo tanto, la implementación de los rellenos sanitarios es necesaria, bien sea como solución exclusiva o como destino de rechazo de otros sistemas (Amaya, 2019). Al respecto, el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (1997) destaca la necesidad de ejecutar estos proyectos con una visión integral considerando los factores específicos de cada localidad para garantizar la sostenibilidad. Esto implica la integración de aspectos técnicos y económicos (como la fácil implementación, operación, mantenimiento sencillo, el uso de recursos humanos y materiales locales), el aspecto social (fomentando la participación y promoción de la comunidad), la salud (mediante la implementación de programas de prevención de enfermedades infecciosas), y el aspecto ambiental (previniendo impactos negativos en el suelo, agua y aire).

2.1.2 Segregación en la fuente de residuos sólidos

De acuerdo con el Ministerio del Ambiente en el 2021, define como un instrumento técnico en el cual se formulan estrategias para facilitar la segregación en la fuente por parte de los generadores, así como el diseño de la recolección selectiva, este documento es elaborado por las municipalidades provinciales y distritales.

La segregación de los residuos en sí implica la separación de los materiales posconsumo en el punto de generación (Oduro-Kwarteng et al., 2016), y se debe considerar sus características únicas para definir los procesos de tratamiento posterior (Yang et al., 2011). Asimismo, otro factor importante a considerar es su valor económico para que pueda ser categorizado en residuos para disposición final o para reciclaje. (Kumar et al., 2024).

La clasificación de los residuos municipales aprovechables de acuerdo con el Ministerio del Ambiente (2019) comprende los residuos aprovechables orgánicos, como restos de alimentos, maleza y poda; mientras que los residuos aprovechables inorgánicos comprenden el papel (blanco, periódico y mixto), cartón (blanco, marrón y mixto), vidrio (transparente y de otros colores), diversos tipos de plásticos (PET, PEAD, PEBD, PP, PS, PVC, Tetra Pak), metales (latas, acero, fierro y aluminio), así como textiles, caucho, cuero. Y los residuos no aprovechables comprenden las bolsas de plástico de un solo uso, residuos sanitarios, pilas, tecnopor (poliestireno expandido), residuos inertes, residuos de medicamentos, envolturas de snack y otros no categorizados.

El gobierno central a fin de promover la mejora de la calidad de los servicios públicos provistos por las municipalidades a nivel nacional crea el programa de incentivos a la mejora de la gestión municipal, específicamente en la Meta 3: Implementación de un sistema integrado de manejo de residuos sólidos municipales, en el cual tiene como objetivo garantizar la protección de la salud y medio ambiente (Ministerio del Ambiente, 2021). En ese contexto, se están impulsando las siguientes actividades:

- Valorización de residuos sólidos inorgánicos municipales, cuya finalidad es disminuir la cantidad de residuos sólidos que se disponen inadecuadamente, reduciendo la contaminación.
- Valorización de residuos sólidos orgánicos municipales: Inclusión de los residuos orgánicos a un ciclo productivo a través del compostaje, humus o biogás.
- Erradicar los puntos críticos y prevenir puntos críticos potenciales.
- Generación de información sobre la recolección de residuos sólidos municipales.

Es importante señalar que el Ministerio del Ambiente ha establecido diversos criterios específicos para definir las metas de valorización de residuos municipales en los últimos cinco años. En 2019, estableció que el aprovechamiento de residuos orgánicos en ciudades con menos de 10,000 habitantes deberá ser, como mínimo, del 20 %; mientras que para ciudades con más de 10,000 habitantes será del 10 %. En cuanto al aprovechamiento de residuos inorgánicos, el porcentaje será definido por cada municipalidad y dependerá tanto de la cantidad de residuos inorgánicos aprovechables, basada en los datos del estudio de caracterización, como del análisis de las opciones de comercialización disponibles (Ministerio del Ambiente, 2019).

En el 2021, el Ministerio del Ambiente define el potencial de segregación efectiva según los hábitos de segregación en la población, por lo que para programas que se están en procesos de implementación se recomienda del 5 % al 20 %, además si cuentan con programas ya consolidados con más de tres años de implementación, su potencial de segregación es de 25% a más (Ministerio del Ambiente, 2021).

En el 2024, el Ministerio de Economía y Finanzas, aprobó la fichas técnicas y metas para el cumplimiento de los compromisos del Programa de Incentivos a la Mejora de la Gestión Municipal correspondientes al Tramo I para el año 2024 mediante la Resolución Directoral N.º 0006-2024-EF/50.01 y Resolución Directoral N.º 0023-2024-EF/50.01, donde establece las metas acordes a su capacidad operativas, así como de su generación de residuos sólidos orgánicos e inorgánicos por municipalidad.

La efectividad de la segregación en la fuente de los residuos sólidos dependerá del trabajo conjunto entre la población, las autoridades y el gobierno, así como de la comprensión de los factores que influyen en el comportamiento público frente a la segregación, como la conciencia ambiental, los hábitos de reciclaje, normas morales, normas sociales y las condiciones socioeconómicas (Kumar et al., 2024).

De acuerdo con Rangga et al. (2024)., se ha demostrado que la minimización de residuos y el reciclaje son los mejores métodos para reducir la cantidad de residuos que se vierten en vertederos, así como la generación de lixiviados, así también promueve la conservación de recursos y minimizando los impactos ambientales asociados a la generación de residuos.

2.1.3 Infraestructuras de disposición final

De acuerdo con el Ministerio del Ambiente (2017), describe como una instalación destinada a la disposición segura y ambientalmente adecuada de los residuos municipales, ya sea en superficie o bajo tierra, utilizando principios y métodos de la ingeniería sanitaria y ambiental. En esta infraestructura se confinan los residuos en un área mínima y se reduce su volumen a lo mínimo, para prevenir la contaminación o sin perjudicar al ambiente, salud y seguridad pública; y, mediante la restauración, el espacio disponible puede usarse para otro propósito.

Las infraestructuras de residuos sólidos son diseñadas dentro o sobre el suelo, en donde el residuo se separa del área que la rodea; este aislamiento se logra con el uso de un revestimiento inferior y una cubierta diaria de suelo. De acuerdo con Huy y Kohata (2020), especifica que es una instalación de disposición final de residuos de forma sanitaria y ambientalmente segura y debidamente equipada y operada. Se puede clasificar de acuerdo con el tipo de residuo (sanitario, industrial, mixto), tipo de operación (manual, semi-mecanizado, mecanizado), método de construcción (método de trinchera, método área) y por último por su proceso de descomposición (aerobia, anaerobia y semiaerobios). A

continuación, se detalla los tipos de rellenos sanitarios según su proceso de descomposición.

2.1.3.1 Relleno sanitario anaerobio. Es una configuración caracterizada por la ausencia de oxígeno dentro del sistema. Por la ausencia de oxígeno, la materia orgánica es transformada en ácidos orgánicos volátiles (ácido acético) y se convierte en gas metano y dióxido de carbono, mientras que el nitrógeno y sulfuro es transformada en amoníaco, amina, sulfuro de hidrógeno y mercaptanos, el cual emite mal olor y afecta negativamente el entorno de vida de los alrededores (Cerminara, 2014).

2.1.3.2 Relleno sanitario aeróbico. De acuerdo con Tepordei (2014), los rellenos aeróbicos operan a través de la inyección controlada de oxígeno en la masa de residuos mediante tuberías. La adición de aire ha demostrado el aumento en el proceso de degradación de residuos en los rellenos sanitarios que en comparación a los procesos anaerobios. La descomposición de la materia orgánica bajo condiciones aerobias produce compuestos como: dióxido de carbono, agua, sustancias húmicas. Sin embargo, debido a la heterogeneidad de la estructura de los residuos, el oxígeno no alcanza la misma cantidad en todos los lugares del relleno, por lo cual su concentración es determinada mediante la humedad de los residuos y porosidad.

El proceso aerobio favorece los procesos de nitrificación y volatilización de los compuestos de nitrógeno, además el nivel de pH genera la reducción de la movilización de los metales y la temperatura alta incrementa la evaporación, que resulta en la pérdida significativa de volumen de lixiviado.

2.1.3.3 Rellenos sanitarios semiaerobios. De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (2014), los rellenos sanitarios semiaerobios también es denominado el método Fukuoka desarrollada en la Universidad de Fukuoka en el año 1975, esta tecnología consiste en la descomposición de residuos en presencia de oxígeno. Matsufiji y Tachifuji (2007), menciona el método de aireación de los residuos se desarrolla de forma natural con el aire atmosférico a través de una red de tuberías de

recolección de lixiviados horizontales conectadas a tuberías de ventilación. El aire ingresa a la tubería horizontal principal debido a un efecto de flotabilidad por la diferencia de temperaturas entre a masa de los residuos y el aire externo y en la tubería vertical principal se descarga a la atmósfera. Además, Huy y Kohata (2020), describe que existe limitaciones en las fuerzas pasivas en la aireación y la presencia de zonas anaerobias dentro del relleno sanitario semiaerobio debido a que el proceso biológico ocurre más lentamente que en un relleno sanitario aireado.

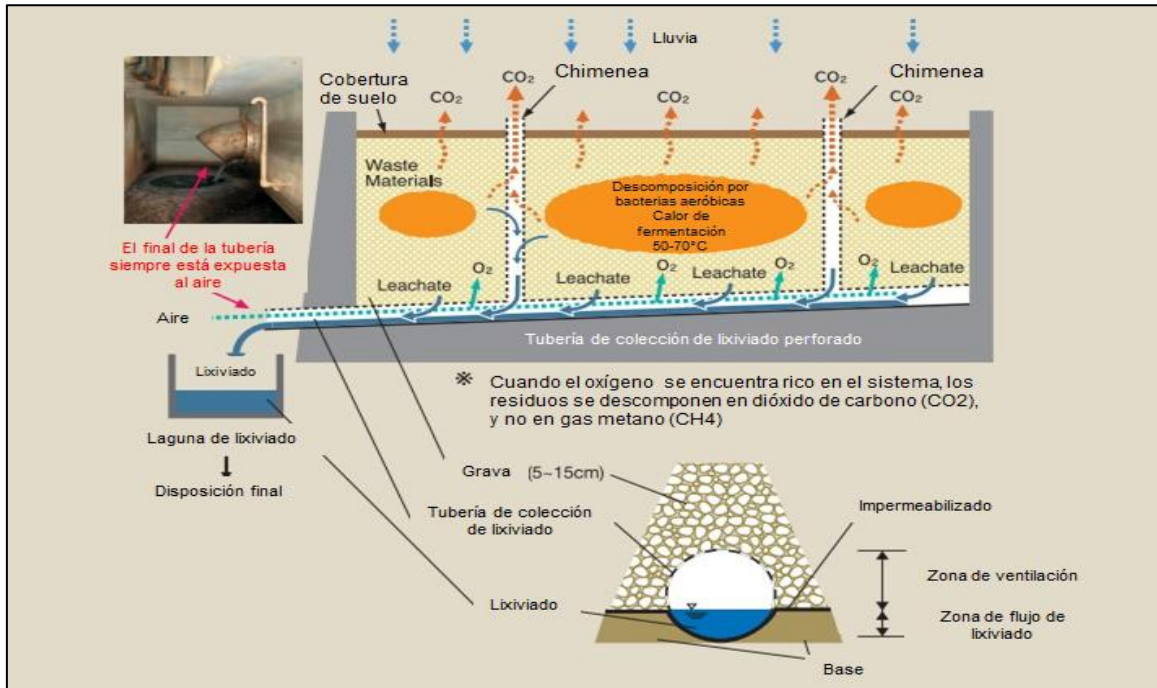
El sistema de colección de lixiviados de este tipo de infraestructura consiste en una tubería horizontal central con ramales perforados a ambos lados colocados a un intervalo adecuado, asimismo las tuberías están incrustadas en grava (5-15 cm) e instalada a una adecuada pendiente. La colección principal de lixiviados está diseñada para contener la tercera parte y este termina en una laguna de colección abierta (Ritzkowski y Stegmann, 2012). El uso conjunto de las tuberías de recolección y la grava no solo complementa la resistencia de las tuberías, sino que también mejora la calidad del agua del lixiviado y permite una difusión efectiva del aire (*Fukuoka City Environmental Bureau Japan, 2013*).

Este sistema de recolección permite la aceleración del drenaje de los lixiviados, previniendo su estancamiento en el material de desecho. Además, facilita la penetración de aire fresco, promoviendo condiciones aeróbicas en la capa de desecho en contacto con la tubería. Estas condiciones aeróbicas incrementan la actividad microbiana y, consecuentemente, aceleran la descomposición de los residuos. (*Fukuoka City Environmental Bureau Japan, 2013*).

En la Figura 1.se presenta el esquema de los rellenos sanitarios semiaeróbicos.

Figura 1

Mecanismo de los rellenos sanitarios semiaeróbicos



Nota: Adaptado de *Semi-aerobic Landfill Mechanism* (p. 3), por *Fukuoka City Environmental Bureau Japan, 2013, The Fukuoka Method What is the semi-aerobic landfill?*

De acuerdo con *Fukuoka City Environmental Bureau Japan (2013)*, las ventajas de los rellenos semi aeróbicos son:

- Utiliza la capacidad inherente de la autodepuración natural para estabilizar los residuos. Además, las condiciones aerobias aumentan las actividades microbianas para la descomposición acelerada de los residuos.
- La calidad del lixiviado es significativamente mejor debido a la descomposición acelerada de los residuos.
- Reduce la producción de gas metano y contribuye en la prevención del calentamiento global.
- Se espera que el uso temprano del relleno sanitario mejora de la estabilización. Asimismo, este requerirá un mantenimiento adecuado del uso y monitoreo durante el período de operación.

- El método es de bajo costo, simple, efectivo y de fácil construcción, operación y mantenimiento, además que permite un alto grado de libertad en la elección de los materiales.

El Método Fukuoka se presenta como una solución eficaz para la disposición final de los residuos en países en desarrollo, principalmente por su bajo costo de implementación y no requiere de alta asistencia técnica. Sin embargo, de acuerdo con Matsufuji (2021), existen limitaciones y restricciones que deben evaluarse para su implementación tales como:

- Capacidad financiera y técnica: La población potencial beneficiaria a menudo carece de los recursos económicos y la formación técnica necesarios para garantizar la sostenibilidad del proyecto.
- Condiciones climáticas: No recomienda en climas con temperaturas extremadamente bajas debido a la reducción de la actividad microbiana, ni en zonas con precipitaciones extremadamente escasas, ya que la generación de lixiviados sería mínima.
- Topografía: Debe evitarse en áreas pantanosas de tierras bajas o con un nivel freático alto, dado que implicaría el uso de bombas para evitar el contacto con los lixiviados, lo que incrementaría significativamente los costos.
- Cimientos del terreno: La base del terreno no debe ser blanda o susceptible de colapsar, ya que se requiere apilar y compactar los residuos. Asimismo, el terreno no debe presentar características permeables, ya que generaría un costo adicional por las infiltraciones.

2.1.4 Aspectos generados en el relleno sanitario

2.1.4.1 Lixiviados. De acuerdo con Huy y Kohata (2020), los lixiviados son los líquidos producto de la infiltración y precipitación de la composición de los residuos en los rellenos. Los lixiviados es un compuesto complejo combinado de sólidos orgánicos e inorgánicos solubles, microorganismo y sólidos suspendidos. Además Olisa et al., (2016)

menciona que debido a la descomposición microbiana, los lixiviados contienen una variedad de compuestos químicos derivados de la solubilización de los materiales depositados en el relleno sanitario, el cual está representado por una amplia variedad de contaminantes orgánicas usualmente medidos en demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), hidrocarburos halogenados, amoníaco, sales inorgánicas, demanda química de oxígeno (DQO), concentraciones significativas de metales pesados y sólidos suspendidos.

Mukherjee et al., (2014) menciona que las características del lixiviado de un relleno sanitario está influenciado por una serie de factores: condiciones climáticas e hidrogeológicas (precipitación, intrusión de aguas subterráneas y deshielo), problemas en el manejo y operación del relleno (compactación, pretratamiento, cobertura de vegetación, recirculación, entre otros), características de los residuos (tamaño de partículas, densidad, composición química, biodegradabilidad, contenido de humedad inicial), proceso internos del relleno sanitario (descomposición de materia orgánica, compactación, generación y transporte de calor y gas) y la edad de los rellenos sanitarios.

El comportamiento de los lixiviados principalmente está categorizado según la edad de los rellenos sanitarios (joven, intermedio, estabilizado y antiguo), y se base acorde a los cambios de la ratio de biodegradación. De acuerdo con Calace (2001), los lixiviados jóvenes son comúnmente caracterizados por un bajo peso molecular con cadenas lineares, los cuales serán sustituidos por grupos funcionales de oxígeno como carboxilo o alcohólico. Mientras los lixiviados estabilizados contienen un rango amplio de fracciones de peso molecular complejo con grupos funcionales compuestos por N, S y O. En la Tabla 2 se presenta los parámetros fisicoquímicos y biológicos del lixiviado a diferentes edades de los rellenos sanitarios.

Tabla 2*Parámetros fisicoquímicos del lixiviado a diferentes edades de los rellenos sanitarios*

Parámetros	Joven (0-5 años)	Intermedio (5-10 años)	Estabilizado (10-20 años)	Antiguo (>20 años)
pH	<6.5	6.5-7.5	>7.5	-
SDT (mg/L)	10,000-25,000	5000-10,000	2000-5000	<1000
DBO ₅ (mg/L)	10,000-25,000	1000-4000	50-1000	<50
DQO (mg/L)	>10,000	4,000-10,000	<4000	-
DBO ₅ /DQO	0.5-1.0	0.1-0.5	<0.1	
Compuestos orgánicos	80% ácidos grasos volátiles	5-30% ácidos grasos volátiles+ ácidos húmicos+ fúlvicos	Ácidos húmicos y ácidos fúlvicos	-
Nitrógeno amoniacal (mg/L)	<400	N. A	>400	-
COT/DQO	<0.3	0.3-0.5	>0.5	-
Nitrógeno Kjeldahl (mg/L)	100-200	N. A	N. A	-
Metales pesados	Bajo a medio	Bajo	Bajo	-
Ca (mg/L)	2000-4000	500-2000	300-500	<300
Na, K (mg/L)	2000-4000	500-1500	100-500	<100
Mg, Fe (mg/L)	500-1500	500-1000	100-500	<100
Zn, Al (mg/L)	100-200	50-100	10-50	<10
Cl ⁻ (mg/L)	1000-3000	500-2000	100-500	<100
Sulfato (mg/L)	500-2000	200-1000	50-200	<50
P (mg/L)	100-300	10-100	-	<10

Nota: Obtenido de Mukherjee et al. (2014).

También las características de los lixiviados se pueden clasificar de acuerdo con los procesos internos del relleno sanitario (aerobio, semiaerobio, anaerobio) y considerando la edad del relleno. En la Tabla 3 se presenta los parámetros fisicoquímicos del lixiviado de acuerdo con los tipos de rellenos sanitarios.

Tabla 3

Parámetros fisicoquímicos de la calidad de los lixiviados de acuerdo con los tipos de rellenos sanitarios

	ítem	Relleno en operación	6 meses luego de completado el relleno	1 año luego de completado el relleno	2 años luego de completado el relleno
Relleno anaeróbico	DBO (mg/L)	40000 - 50000	40000 - 50000	30000 - 40000	10000 -20000
	DQOCr (mg/L)	40000 - 50000	40000 - 50000	30000 - 40000	20000 - 30000
	NH4 +-N (mg/L)	80 - 1000	1000	800	600
	pH	Aprox. 6.0	Aprox. 6.0	Aprox. 6.0	Aprox. 6.0
	Transparencia	0.9 - 1.0	1 - 2	2-3	2 - 3
Relleno sanitario anaeróbico	DBO (mg/L)	40000 - 50000	7000 - 8000	300	200 - 300
	DQO (mg/L)	40000 - 50000	10000 - 20000	1000 - 2000	1000 - 2000
	NH4 +-N(mg/L)	800 - 1000	800	500 - 600	500 - 600
	pH	Aprox. 6.0	Aprox. 7.0	7.0 -7.5	7.0 -7.5
	Transparencia	0.9 - 1.0	1-2	1.5 - 2	1 - 2
Relleno semiaeróbica	DBO (mg/L)	40000 - 50000	5000 - 6000	100 - 200	50
	DQOCr (mg/L)	40000 - 50000	10000	1000 - 2000	1000
	NH4 +-N (mg/L)	800 - 1000	500	100 - 200	100
	pH	Aprox. 6. 0	Aprox. 8.0	Aprox. 7.5	7.0 - 8.0
	Transparencia	0.9 -1.0	1-2	3-4	5-6
Relleno aeróbico	DBO (mg/L)	40000 - 50000	200 - 300	50	10
	DQO (mg/L)	40000 - 50000	2000	1000	500
	NH4 +-N (mg/L)	800 - 1000	50	10	1-2
	pH	Aprox. 6.0	Aprox. 8.5	7-8	Aprox. 8.5
	Transparencia	0.9 - 1.0	6-7	2-3	2 - 5

Nota: Obtenido de Hanashima, y Matsufuji (1977), citado en Matsufuji (2021).

Al respecto, Erses et al. (2008), señalan los lixiviados de rellenos aeróbicos muestran una tasa de degradación de materia orgánica superior al 90% en términos de DQO. Por otro lado, los lixiviados de rellenos anaeróbicos suelen presentar altos niveles de contaminantes como DQO, COT, DBO, amoníaco, fósforo y metales alcalinos, requiriendo un mayor tiempo para alcanzar la estabilización. Además, mientras las concentraciones de amoníaco aumentan durante la fase metanogénica en los biorreactores anaeróbicos, en los reactores aeróbicos disminuyen rápidamente.

Según Matsufuji (2021), los rellenos sanitarios aerobios y semiaerobios existe una ligera diferencia en la calidad del lixiviado. No obstante, Ahmadifar (2015) señala que la

estabilización de los residuos en los rellenos semiaerobios puede requerir un tiempo mayor en comparación a los aerobios.

2.1.4.2 Generación de gases. De acuerdo con Quang (2020), los gases de los rellenos sanitarios son una mezcla de varios compuestos de gases que resulta de la descomposición de los residuos, en los cuales la mayor proporción se presentan en el gas metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), oxígeno (O_2) y nitrógeno (N_2). La tasa de generación de gas depende de la composición de los residuos orgánicos y de las características bioquímicas ambientales del relleno como la cantidad de agua, presencia de inhibidores entre otros. El gas sale de los residuos debido a la presión de la construcción.

Además, precisa Quang (2020) dentro de los rellenos semiaerobios existen las zonas aeróbica y anaeróbica ubicadas en diferentes locaciones y simultáneamente. Las zonas cercanas a las chimeneas de gas y la tubería de recolección de lixiviados son principalmente aeróbicas debido a la presencia de flujo de aire enviado del fondo del relleno sanitario y es donde predomina los microorganismos aerobios. En las locaciones lejanas a las tuberías, el oxígeno no logra alcanzar estos puntos por los que la reacción anaeróbica es la predominante.

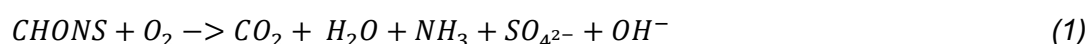
2.1.5 Procesos bioquímicos

De acuerdo con Cossu y Stegmann (2018), los rellenos sanitarios son biorreactores con procesos físicos, químicos y bioquímicos; en los cuales son controlados por la composición de los residuos, humedad, condiciones climáticas y tipo de operación (construcción de celdas o compactación). Los procesos biológicos se desarrollan en microambientes y pueden variar en pequeños intervalos, por lo que la calidad y composición de los gases y lixiviados se ve reflejado por el proceso biológico dominante en estos periodos. Los compuestos orgánicos putrescibles son usados como fuente de carbono mediante los microorganismos heterotróficos (bacteria y hongos), y como una

fuente energética por los microorganismos heterotróficos y quimioautótrofos (bacterias nitrificantes y metanogénicas).

Christensen et al. (1992), mencionaron que los mecanismos de transferencia de masa de los residuos sólidos hacia los lixiviados se dividen en tres categorías principales: (1) hidrólisis de los residuos sólidos y la degradación biológica, (2) solubilización de sales solubles contenidas en los desechos, y (3) arrastre de material particulado. En la cual, las primeras dos categorías ejercen la mayor influencia en la calidad de los lixiviados generados y se enmarcan en los conceptos de estabilización de los residuos que presentan tanto la fase de degradación aerobia y anaerobia.

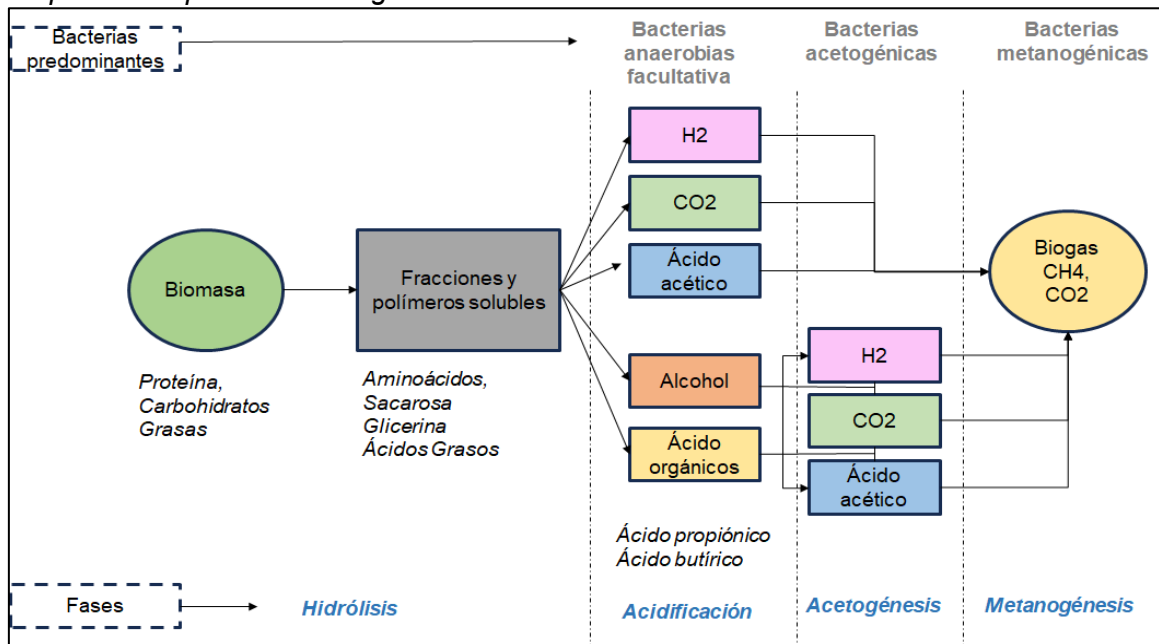
La degradación aerobia de la materia orgánica en los rellenos sanitarios es un proceso limitado en el tiempo, debido a la alta demanda de oxígeno por parte de los microorganismos y a la baja disponibilidad de este gas dentro del relleno. Generalmente, solo la capa superficial experimenta esta metabolización aerobia, ya que el oxígeno queda atrapado en los desechos frescos y es aportado por el agua de lluvia. Durante esta fase, la celulosa, que es la fracción orgánica más abundante, se descompone en glucosa para las bacterias. Las proteínas se transforman en aminoácidos, que se oxidan para producir dióxido de carbono, agua, nitratos y sulfatos. Los carbohidratos se convierten en dióxido de carbono, agua y grasas, las cuales se hidrolizan en ácidos grasos y glicerol. Finalmente, esta etapa es de reacción exotérmica, lo que puede causar un aumento significativo de la temperatura (Christensen et al., 1992). La reacción general de la degradación aerobia se muestra en la Ecuación 1 (Matsufuji, 2021).



Mientras la degradación anaeróbica, se presenta generalmente en 5 fases consecutivas de la descomposición, comenzando con la fase de hidrólisis, acidificación, acetatogénesis y metanogénesis, seguida de la fase de maduración. (Cossu y Stegmann, 2018). En la Figura 2, se detalla el proceso de degradación anaerobia.

Figura 2

Esquema del proceso de degradación anaerobia



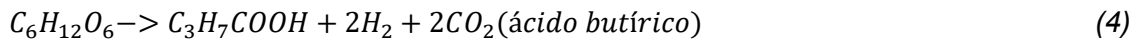
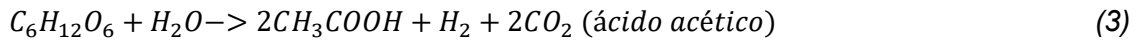
Nota: Adaptado de *Scheme of the anaerobic degradation process* (p. 97) por Cossu y Stegmann, 2018, *Solid Waste Landfill: Concepts, Processes, Technology*.

La fase de hidrólisis es una de las fases más lentas durante el proceso de degradación anaerobia, que tiene como objetivo que las enzimas extracelulares (celulosa, amilasa, lipasa y proteasa) reduzcan los polímeros complejos en compuestos suficientemente pequeños para penetrar la membrana celular. Este proceso reduce las proteínas, carbohidratos y grasas en aminoácidos, sacarosa, glicerina y ácidos grasos. Durante la fase inicial de los rellenos sanitarios predomina la fase hidrolítica en el cual contribuye en el incremento del pH, DQO y DBO₅, nitrógeno amoniacal y sulfatos (Cossu y Stegmann, 2018). La reacción general se muestra en la Ecuación 2.

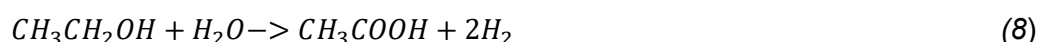
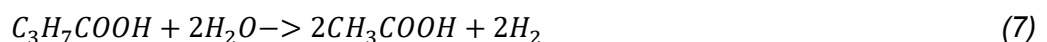
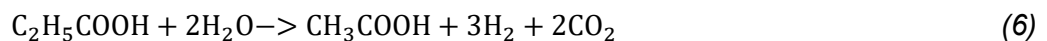


De acuerdo con Terpodei (2014), en la fase de acidogénesis consiste que los compuestos disueltos en la primera fase son utilizados por un grupo heterogéneo de microorganismos anaerobios facultativos. El producto se compone de ácidos volátiles grasos, alcohol, compuestos como dióxido de carbono, hidrógeno gaseoso, amoníaco,

sulfuro de hidrógeno y ácidos acéticos, propiónico y butírico. Las principales reacciones se muestran en las Ecuaciones 3, 4 y 5.

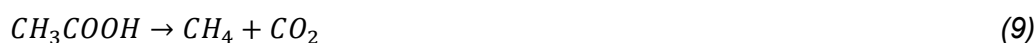


Además, precisa Tepordei (2014) que en la fase acetatogénica, los productos de la acidogénesis son convertidos en los precursores finales para la generación de metano: ácido acético (CH_3COOH), hidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2). El pH decrece debido al crecimiento de los microorganismos metanogénicos asimismo las especies metales se vuelven más solubles y se movilizan de los residuos al lixiviado. Consecuentemente, los ácidos orgánicos, iones de cloruro y iones de fosfatos se convierte en compuestos complejos con los iones metálicos; asimismo en esta fase los gases pueden formar el sulfuro de hidrógeno debido a la presencia de compuestos sulfatos que pueden reducirse por la presencia de microorganismos reductores. Las principales reacciones se muestran en las Ecuaciones 6, 7 y 8.



De acuerdo con Cossu y Stegmann (2018), en la fase metanogénica, las bacterias metanogénicas usan los compuestos CH_3COOH y H_2O como substrato para la producción de metano y dióxido de carbono. Las bacterias metanogénicas son muy especializadas, más sensibles al pH, nutrientes y temperatura. La parte inicial de esta fase es inestable debido a la variación de la composición de gas y a los microorganismos fermentativos que coexisten creando condiciones de paso. Después de ello, el proceso se convierte en un proceso estable y la concentración de metano y carbono en gas alcanza los estándares de 50-60 % CH_4 y 40-50 % CO_2 . La fase metanogénica generalmente inicia a los 10 a 20 años

después del cierre Las principales reacciones se muestran en las Ecuaciones 9, 10, 11 y 12.



Por último, en la etapa de maduración, los nutrientes y el sustrato disponible se encuentra limitado, y la actividad biológica cambia a una latencia relativa. La producción de gas cae dramáticamente y la concentración de los lixiviados permanece menor. Debido a la producción de gas en cese, los gases atmosféricos pueden volver a penetrar al relleno, y oxidar las especies de forma lenta (Karthikeyan y Joseph, 2006).

Cossu y Stegmann (2018), menciona que llas reacciones de hidrólisis, acidificación, acetatogénesis, metanogénesis, desnitrificación, reducción de sulfato y entre otras; se puede desarrollar simultáneamente o en diferentes momentos de la vida útil del relleno sanitario debido a la heterogeneidad de los sustratos. En la Tabla 4 se observa los principales parámetros de lixiviado y los rangos de concentración de acuerdo con la fase de biodegradación.

Tabla 4

Principales parámetros de lixiviado y los rangos de concentración de acuerdo con la fase de biodegradación.

Parámetros	Fase ácida		Fase metanogénica	
	Promedio	Rango	Promedio	Rango
pH	6.1	4.5-7.5	8	7.5-9
DBO ₅ (mg/L)	13000	4000-40000	180	20-550
DQO (mg/L)	2000	6000-60000	3000	500-4500
Ratio DBO ₅ /DQO	0.58		0.06	
Sulfatos (mg/L)	500	170-1750	80	10-420

Fuente: Obtenido de Kjeldsen et al.(2002).

2.2 Marco legal e institucional

El estado peruano cuenta con una serie de normas en torno a la gestión integral de los residuos sólidos, enmarcados en primer lugar desde la Constitución Política del 1993, en el Título I referente a la Persona y Sociedad, artículo 2.22, donde establece que toda persona tiene derecho a la paz, a la tranquilidad, al disfrute del tiempo libre y al descanso, así como a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de la vida.

De igual manera, en la Ley General del Ambiente 28611, artículo 119 Del Manejo de los residuos sólidos, establece que los residuos sólidos de origen doméstico, comercial o de origen distinto, son responsabilidad de los gobiernos locales. Mediante la Ley N.º 27972 Ley Orgánica de las Municipales Título V artículo 73, establece las competencias y funciones de los gobiernos locales en materia a la protección y conservación del ambiente como la formulación, aprobación y monitoreo de planes y políticas locales en materia ambiental, promoción de educación e investigación ambiental en su localidad e incentivan la participación ciudadana en todos sus niveles, así como, la coordinación con los diversos niveles del gobierno nacional, sectorial y regional para la correcta aplicación de los instrumentos de planeamiento y gestión ambiental.

En el Decreto Legislativo N.º 1278 Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos se enmarca en el desarrollo de una gestión integral de residuos sólidos bajo un enfoque de sostenibilidad con la finalidad de asegurar su calidad y continuidad teniendo como primera finalidad la prevención o minimización de la generación de residuos sólidos sobre otra alternativa y siendo la disposición final de los residuos como la última alternativa de manejo y debe realizarse en condiciones ambientalmente adecuadas. Además, se enfatiza que los rellenos sanitarios que manejan menos de 200 ton/día de residuos sólidos, deben implementar captura y quema convencional de gases u otra medida orientada a mitigación de GEI.

Asimismo, dicha norma procura que la gestión de residuos sólidos contribuya a la lucha contra el cambio climático mediante la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en referente a la Ley N.º 30754 Ley Marco sobre Cambio Climático que busca

incorporar medidas de adaptación y mitigación al cambio climático en las políticas, estrategias, planes, programas y proyectos de inversión de los tres niveles de gobierno a fin de integrar la gestión y desarrollo del país en armonía con la naturaleza, asimismo destaca la priorización de la gestión de residuos como medida de mitigación de GEI.

En Decreto Supremo N.º 014-2017-MINAM, Reglamento de la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, se establece los criterios mínimos para la selección, habilitación, construcción, operación y cierre de las infraestructuras de disposición final asimismo establece criterios para el desarrollo del Programa de Segregación en la fuente y Recolección selectiva como un instrumento de formulación de estrategia.

Mediante la Resolución Ministerial N.º 138-2021-MINAM, Guía para implementar el programa de segregación en la fuente y recolección selectiva de residuos sólidos con el objetivo de orientar a las municipales sobre la implementación del programa en los residuos aprovecharles para su valorización.

Es importante señalar que, desde 2019, mediante el Decreto Supremo N.º 029-2019-EF, emitido por el Ministerio de Economía y Finanzas (MEF), aprobó los lineamientos generales del Programa de Incentivos a la Mejora de la Gestión Municipal (PI). Este programa establece objetivos, metas y procedimientos para que las municipalidades puedan acceder a incentivos financieros a cambio de cumplir con ciertos indicadores de desempeño en áreas clave como salud, educación, gestión ambiental, seguridad ciudadana, entre otros. En el ámbito de la gestión de residuos sólidos, se incluye la Meta 3: Implementación de un sistema integrado de manejo de residuos sólidos municipales.

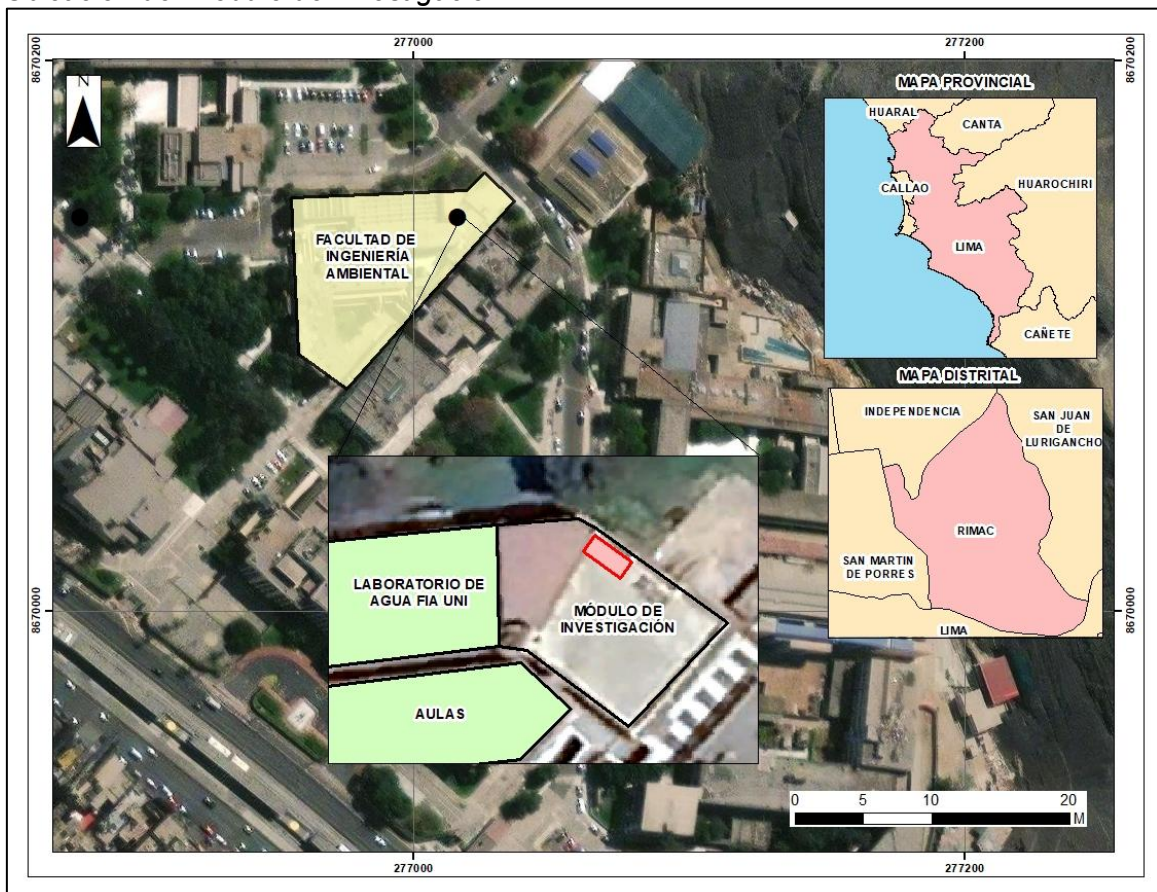
En el 2024, el Ministerio de Economía y Finanza, aprobó la fichas técnicas y metas para el cumplimiento de los compromisos del Programa de Incentivos a la Mejora de la Gestión Municipal correspondientes al Tramo I para el año 2024 mediante la Resolución Directoral N.º 0006-2024-EF/50.01 y Resolución Directoral N.º 0023-2024-EF/50.01, donde establece las metas de valorización de residuos sólidos orgánicos e inorgánicos por cada municipalidad acorde a su capacidad operativa.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de tesis

La parte experimental de la investigación se desarrolló en la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería (FIA-UNI) en el segundo piso en las instalaciones del Grupo de Investigación en Residuos para el Desarrollo Sostenible ubicado en el distrito del Rímac, provincia y departamento de Lima. El periodo de investigación se desarrolló desde de noviembre de 2023 a mayo de 2024, que contemplo las etapas de instalación y construcción de los biorreactores, puesta en marcha y operación, donde las dos últimas etapas se desarrollaron de enero a mayo de 2024. En la Figura 3 se observa la ubicación del módulo de investigación.

Figura 3

Ubicación del módulo de investigación

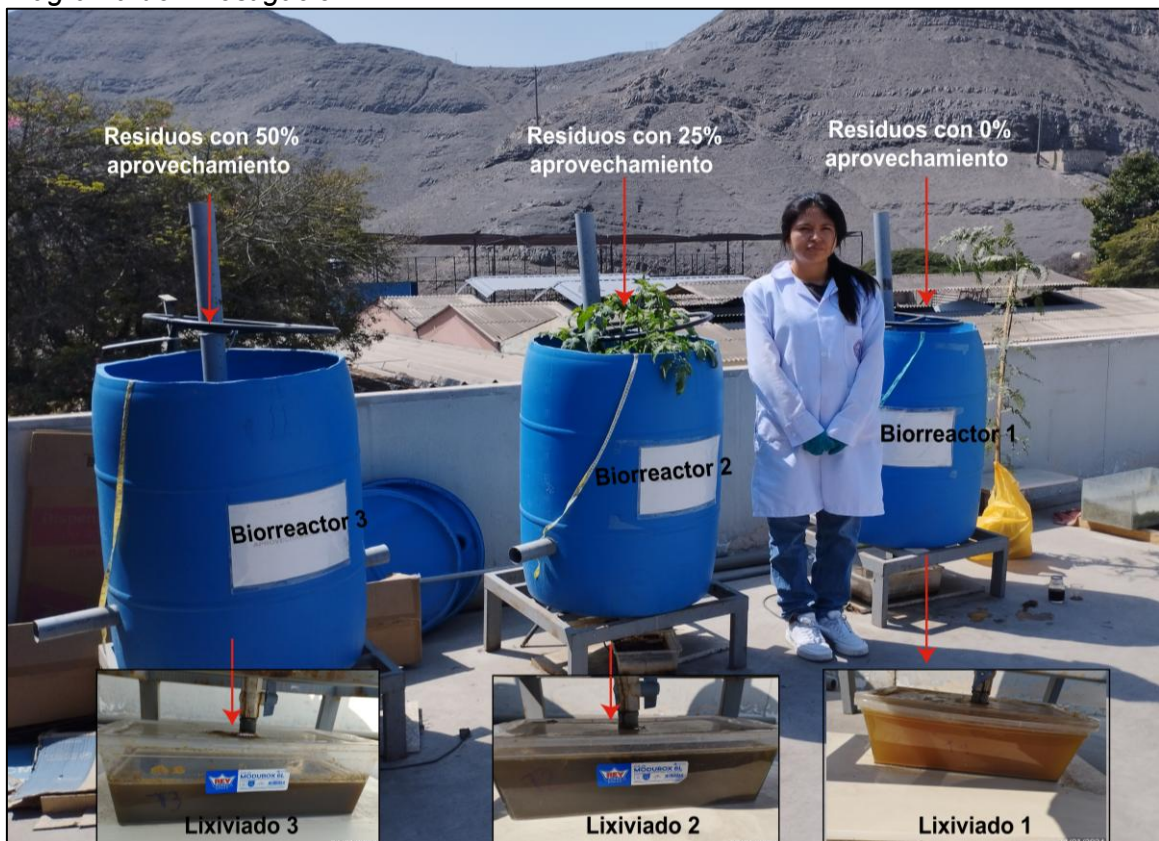


3.1 Tipo y nivel de investigación

La presente investigación es de tipo correlacional, con un enfoque cuantitativo y experimental, y un alcance analítico. La recolección de datos se realizó de manera transversal y prospectiva, ya que el diseño experimental se centra en describir el comportamiento de los lixiviados generados en tres biorreactores que simulan las condiciones de un relleno sanitario semiaerobio. Estos biorreactores se ingresan residuos sólidos municipales con diferentes porcentajes de aprovechamiento de materiales orgánicos e inorgánicos: el Biorreactor 1 contenía residuos sin aprovechamiento (0 %), el Biorreactor 2 un 25 %, y el Biorreactor 3 un 50 %. La Figura 4 presenta el diagrama del diseño de investigación.

Figura 4

Diagrama de investigación



3.2 Unidad de análisis

Para la presente investigación se utilizó la información de la caracterización de residuos sólidos de la Municipalidad Metropolitana de Lima, ubicado en el departamento de Lima, desde el año 2019 al 2022. Cabe resaltar que Lima actualmente está designado como una zona prioritaria para el desarrollo de sistema de gestión de residuos sólidos, así como del programa de recuperación de áreas degradadas por residuos sólidos (Ministerio del Ambiente, 2017). De acuerdo con los estudios de caracterización de residuos sólidos, se identificó la proporción de residuos sólidos para el estudio consisten en residuos orgánicos, maleza, papel, textiles, plásticos, metales, vidrio, material inerte y entre otros.

Además, se utilizó como información complementaria los registros del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) en la estación meteorológica San Martín de Porres ubicado aproximadamente a 4 km del módulo de investigación, donde se obtuvo las mediciones de temperatura ambiente y humedad durante el periodo de evaluación. Cabe destacar, que de acuerdo el SENAMHI (2021), Lima presenta un clima árido tipo E (d)B” con deficiencia de humedad en todas las estaciones del año y templado; donde sus condiciones climáticas son influenciadas por la cercanía al mar al oeste y la altitud hacia al este.

3.3 Población de estudio

Los residuos sólidos utilizados en los biorreactores provinieron principalmente del mercado mayorista Conzac, ubicado en el distrito de Los Olivos, provincia y departamento de Lima, donde se recolectaron residuos orgánicos de frutas y vegetales. Además, en la Universidad Nacional de Ingeniería se recolectaron los residuos orgánicos como césped, así como otros residuos sólidos inorgánicos, permitiendo obtener los diferentes tipos de residuos sólidos municipales para el estudio.

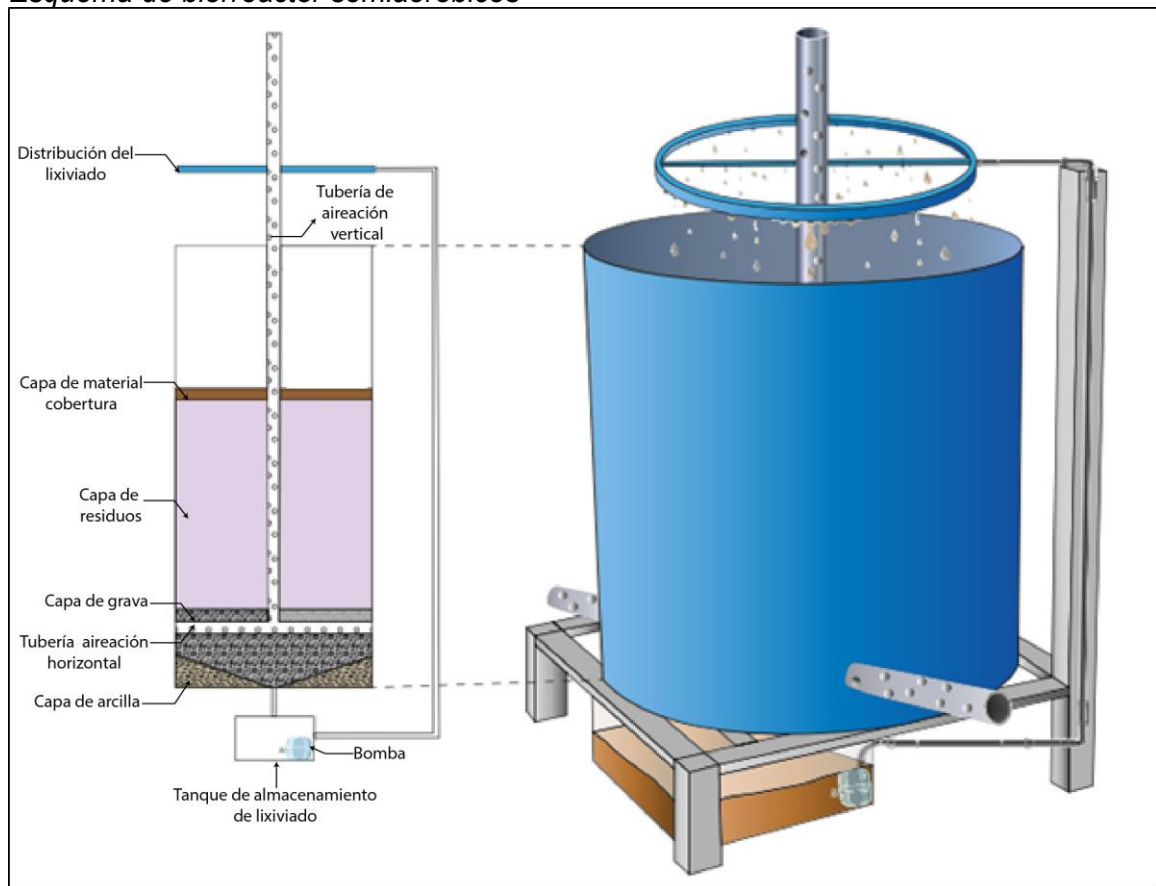
3.4 Población de estudio

Los biorreactores son contenedores de polietileno de 220 L con dimensiones de 580 mm de diámetro y 952.2 mm de altura. En la parte inferior del reactor se ubica una

tubería de aireación horizontal con diámetro de 50 mm con perforaciones de 5mm espaciados cada 100 mm; asimismo, esta tubería está conectada hacia una tubería de aireación vertical con diámetro de 50 mm con perforaciones de 5 mm y espaciados cada 100 dm que permite el movimiento pasivo del aire en el sistema. En la Figura 5 se muestra el esquema del biorreactor.

Figura 5

Esquema de biorreactor semiaeróbicos



La estratificación de las capas de los biorreactores es similar a las celdas de los rellenos sanitarios con una capa de 5 cm de arcilla distribuida de forma cónica permitiendo dirigir los lixiviados hacia el tanque de almacenamiento de lixiviados, posteriormente se agregó la capa de grava (diámetro 20 a 30 mm) con 15 cm de alto, para drenar homogéneamente el lixiviado y facilitar la circulación del aire.

La finalidad de usar la grava es para proteger las tuberías de la deformación debido a la compactación de desechos y otras fuerzas externas, reducir la obstrucción de las

perforaciones en el cuerpo, permitir que la cabeza de lixiviado fluya rápidamente y crea otra vía para que el aire del ambiente penetre en las capas de desechos (Huy y Kohata, 2020).

Mientras que en la parte superior se adicionó material de cobertura con suelo natural con textura arenoso limoso para evitar la propagación de vectores en los residuos instalados, asimismo acorde (Matsufuji , 2021) recomienda el uso de materiales de cobertura que cuenten con alta permeabilidad al aire y líquidos como suelos arenosos. Mientras en la parte inferior se instaló un tanque de almacenamiento de los lixiviados con un volumen de 6 L que permite las condiciones de sedimentación de los sólidos.

Para la recirculación se ubicó dentro del tanque de almacenamiento del lixiviado una bomba para impulsar el lixiviado hacia la parte superior mediante tuberías de 3/4" ingresando a un sistema de irrigación de lixiviado recirculado de forma circular. En la parte media se instaló con válvula de regulación de $\frac{3}{4}$, así como un punto de muestreo y purga de lodos, similar a la investigación realizada por Han et al., (2019). Cabe precisar que, la recirculación de los lixiviados se realizó únicamente en la semana 5, debido a que la cantidad de lixiviados permitieron realizar el bombeo, sin embargo, en las siguientes semanas la cantidad de lixiviados fueron reduciéndose por la evaporación, por lo que posteriormente se realizó la adición de agua destilada para alcanzar una humedad promedio de los residuos en un relleno. Murphy and Brennan (1992), citado en Eck (2000) menciona que el contenido de humedad óptimo para la biodegradación anaerobia se ejecuta entre 45 al 70% y en la degradación aerobia entre 50 al 70%.

3.5 Metodología

3.5.1 Caracterización de los residuos sólidos

Se realizó la recopilación de información de la caracterización de residuos sólidos de la Municipalidad Metropolitana de Lima de los años 2019 al 2022 a través de los reportes públicos de la plataforma Sigersol del Ministerio del Ambiente (2023). La información se encuentra clasificada en residuos aprovechables (orgánicos e inorgánicos) y no

aprovechables. En el Anexo 1 se detallan los residuos sólidos generados por año en la Municipalidad Metropolitana de Lima.

Mediante la proporción de los tipos de residuos sólidos se acondicionó y adecuó los residuos para el volumen de los reactores. Cabe resaltar que para la investigación se realizó modificaciones en el tipo de residuo que se ingresó en los biorreactores, en el caso del residuo plástico se ingresó tuberías de PVC y para metales se consideró clavos, tuberías galvanizadas y alambres, ya que su peso facilitó alcanzar los valores establecidos. Por otro lado, no se consideraron los residuos de papel higiénico debido al riesgo asociado a su potencial patogenicidad. La Tabla 5 muestra la proporción de residuos sólidos utilizada en cada biorreactor.

Tabla 5

Peso de los residuos sólidos ingresados por biorreactor

Tipo de residuo	Peso (kg)		
	Biorreactor 1 (0 % aprovechamiento)	Biorreactor 2 (25 % aprovechamiento)	Biorreactor 3 (50 % aprovechamiento)
Residuos aprovechables			
Residuos Orgánicos			
Residuos de alimentos	27,92	20,94	13,96
Residuos de maleza y poda	2,47	1,85	1,23
Otros residuos orgánicos			
Residuos Inorgánicos			
Papel			
Blanco	1,97	1,48	0,98
Periódico			
Mixto	0,94	0,71	0,47
Cartón			
Blanco (liso y cartulina)			
Marrón (Corrugado)	2,17	1,63	1,08
Mixto			
Vidrio			
Transparente			
Vidrios de otros colores	1,67	1,26	0,84
Otros			
Plástico			
Tereftalato de polietileno	3,02	2,26	1,51

Tipo de residuo	Peso (kg)		
	Biorreactor 1 (0 % aprovechamiento)	Biorreactor 2 (25 % aprovechamiento)	Biorreactor 3 (50 % aprovechamiento)
Polietileno de alta densidad			
Polipropileno			
Poliestireno			
Policloruro de vinilo			
Tetra brik			
Polietileno de baja densidad	0,61	0,45	0,30
Metales			
Lata	0,86	0,65	0,43
Acero			
Fierro	0,50	0,38	0,25
Aluminio			
Otros Metales			
Residuos no aprovechables			
Bolsas plásticas	1,97	1,97	1,97
Tecnopor (poliestireno expandido)	0,42	0,42	0,42
Residuos inertes	2,01	2,01	2,01
Textiles	0,34	0,34	0,34
Envolturas de snacks	0,25	0,25	0,25
Peso total	47.11	36.58	26.05

Cabe precisar que en el biorreactor 1 se ingresaron los residuos sólidos con las proporciones características de los generados por la Municipalidad Metropolitana de Lima, sin ningún tipo de aprovechamiento previo, tanto de los residuos orgánicos como inorgánicos, antes de su disposición final. En cambio, en el segundo y tercer biorreactor se ingresaron residuos no valorizados en un 75 % y 50 %, respectivamente, antes de su disposición final.

3.5.2 Implementación de los biorreactores

Para el acondicionamiento de los residuos sólidos que ingresaron a los reactores se realizó los siguientes procesos:

- Se cortaron o trituraron los residuos sólidos (residuos orgánicos, papeles, tecnopor, cartón, vidrio, metales y entre otros) a 2 cm, con el fin de que los residuos se

degradan de forma más rápida y sea proporcional de tamaño a los residuos que ingresan en un relleno sanitario convencional.

- Se realizó el pesaje de los residuos sólidos diferenciados después de ser trituradas a través de la balanza. Se midió 3 veces los resultados y se registró los valores obtenidos del pesaje.
- Para la medición de la densidad se utilizó un balde de 40 litros con lados homogéneos. Se colocó el contenido del cilindro dejando libre unos 10 cm de altura, para facilitar su manipulación. Posteriormente se levantó el cilindro hasta aproximadamente 10 cm a 15 cm de altura y dejar, se realizó la actividad tres veces. Se tomó el dato de la altura y pesos en la hoja de registro.
- Mezcla de los residuos sólidos sobre plástico mediante el uso de un rastrillo. Las proporciones de residuos a ingresar por reactor se realizó acorde con la Tabla 4
- Adición del material de cobertura sobre los residuos sólidos a fin de evitar la propagación de vectores.

En la Figura 6, se presenta los procesos de implementación de los residuos en los biorreactores.

Figura 6

Procesos de implementación de los residuos en los biorreactores



Nota: A) Vista del biorreactor con la capa de grava y las tuberías de ventilación horizontal y vertical B) Corte u trituración de los residuos sólidos. C) Pesaje y medición de volumen y densidad D) Combinación de los residuos sólidos E) Ingreso de los residuos sólidos en los biorreactores F) Adición de material cobertura final sobre los residuos.

Por último, se realizó el análisis fisicoquímico de los residuos sólidos mezclados para la medición de humedad, materia orgánica y pH: a una semana de la implementación. A continuación, se detalla la metodología por cada parámetro.

Para la determinación de la humedad, se seleccionó las muestras por cada tipo de residuos y se redujo el tamaño de los componentes hasta obtener tamaños hasta de 2 cm. En el análisis de laboratorio de la humedad, se tomaron los residuos municipales, luego se pesaron los residuos en la báscula adecuada. El peso húmedo pesado se mantuvo en el horno a 70 °C. Se dejó secar durante 24 horas. Después de 24 horas, los residuos secos se pesaron en la máquina de pesaje adecuada.

Para la determinación de los sólidos volátiles, el procedimiento consistió en evaluar el material combustible volátil mediante la pérdida adicional de peso por ignición a 105 °C para sólidos totales y 550 °C para sólidos volátiles.

3.5.3 Puesta en marcha

Para la puesta en marcha de los biorreactores, se adicionó agua destilada a las columnas de residuos con el fin de ajustar su contenido de humedad y favorecer la producción de lixiviado, siguiendo la investigación de Costa (2014). Para ello, se emplearon las ecuaciones 12 y 13, con el objetivo de alcanzar una humedad del 60 %, valor recomendado para una biodegradación óptima. Según lo descrito por Murphy y Brenan (1992), citado en Eck (2000), los rangos óptimos de humedad son del 45 % al 70 % para la biodegradación anaerobia y del 50 % al 70 % para la aerobia.

$$Ms + MwA + MWI = MTOT \quad (12)$$

$$MTOTx \%Moisture = MWA + MWI \quad (13)$$

Donde:

- Ms: Masa seca de los residuos (sólidos totales).
- Mwa: Cantidad de agua que debe agregarse para alcanzar el contenido de humedad.
- Mwi: Cantidad de agua presente en los residuos.
- Mtot: Masa total de los residuos después de la adición.
- %Moisture: Cantidad de humedad a alcanzar.

Para simplificar cálculos, se puede utilizar la Ecuación 14:

$$Mwa = \frac{Mwi \left(\frac{1}{\%moisture} - 1 \right) - Ms}{1 - \frac{1}{\%Moisture}} \quad (14)$$

Para al cálculo de la cantidad de agua a adicionar, es necesario medir el contenido de materia seca del residuo es decir los sólidos totales, por lo que se ingresa 3 ejemplos

de residuos sólidos en el equipo de evaporación a una temperatura de 105 °C por 12 horas. Los ejemplos fueron pesados antes y después de la evaporación mediante una balanza analítica. Asimismo, fueron triturados con un molino para analizar los sólidos hasta llegar a un diámetro de 3 mm.

3.5.4 Monitoreo de los parámetros de los residuos sólidos y lixiviados

La recopilación de datos se llevó a cabo a partir de los informes de ensayo realizados por el laboratorio acreditados por INACAL: SGS del Perú S.A., así como de la base de datos generada en el Laboratorio de Aguas Otto Rossaco Gerkes de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería, utilizando instrumentos calibrados. Se obtuvieron muestras representativas de los lixiviados generados en los tres biorreactores, y se evaluaron los parámetros fisicoquímicos durante todo el proceso de lixiviación.

Cabe precisar que en el Anexo 2 se presenta los Informes de ensayo, los cuales se encuentran en el marco de la acreditación del INACAL-DA y dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC.

A continuación, se detalla el procedimiento para las mediciones de los parámetros descritos en la Tabla 6.

Tabla 6:

Técnicas de recolección de información

	Parámetro	Método de análisis	Frecuencia	Medio de verificación
Ambiental	Temperatura	-	Diario	Ficha de datos
Residuos sólidos	Temperatura	-	Diario	Ficha de datos
	Asentamiento	-	Diario	Ficha de datos
Volumen del lixiviado	Temperatura	SMEWW-APHA- AWWA- WEF. Part 2550 B. 23	Diario	Ficha de datos
	pH, Conductividad	SMEWW-APHA- AWWA- WEF Part. 4500	Diario	Ficha de datos
	Turbiedad	Nefelométrico	Diario	Ficha de datos

Parámetro	Método de análisis	Frecuencia	Medio de verificación
DBO ₅	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B,	Bisemanal	Ficha de datos
Sólidos totales y sólidos volátiles	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 B y E	Bisemanal	Ficha de datos
DQO	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D	Bisemanal	Informe de ensayo

Nota: (-): No presenta método de análisis.

3.5.4.1 Temperatura de los residuos. Para la medición de la temperatura de los residuos, se realizó mediante un termómetro digital de acero inoxidable con un largo de 30 cm. Las mediciones se desarrollaron en 5 ubicaciones del biorreactor: 1) interior superior de los residuos, 2) externo superior de residuos, 3) medio de los residuos, 4) tubería vertical y 5) tubería horizontal, tal como se muestra en la Figura 7.

Figura 7

Ubicación de las mediciones de temperatura en los residuos



Nota: Ubicación con respecto al biorreactor: A) Interior superior. B) Exterior superior C) 3. Medio, 4. Tubería vertical y 5. Tubería Horizontal.

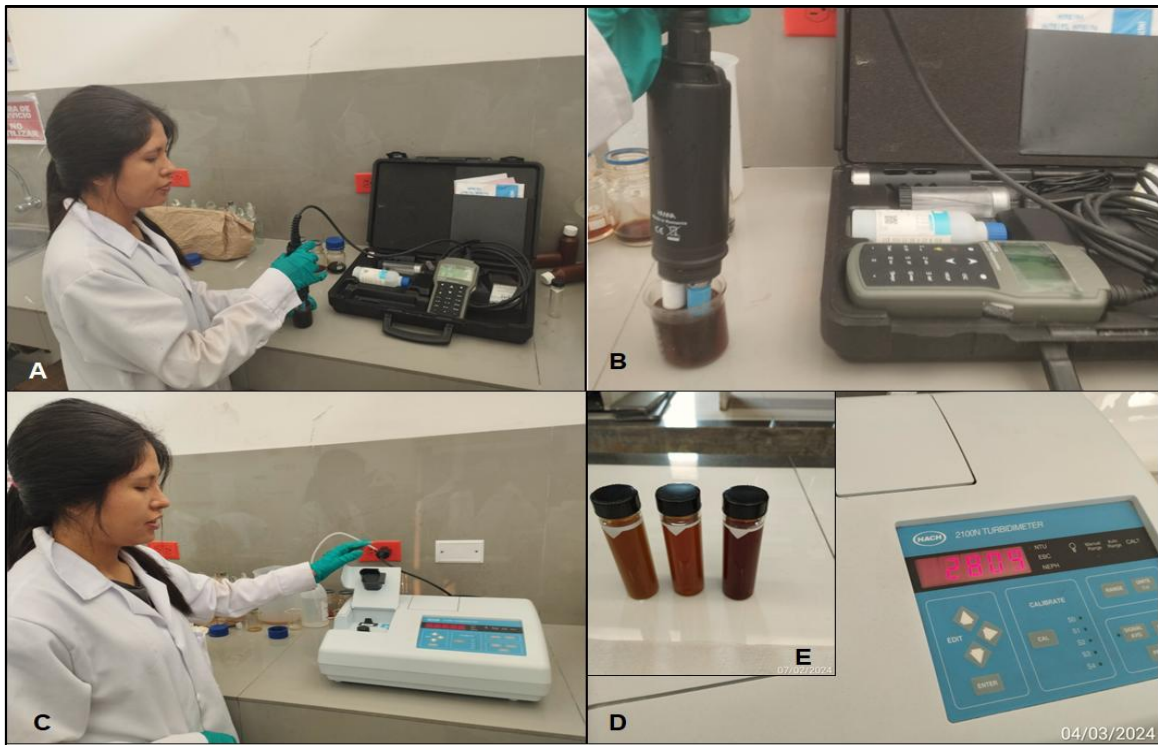
3.5.4.2 Asentamiento de los residuos. Para medir el asentamiento de los residuos, se instaló una cinta métrica en el perfil interior de los biorreactores y se realizaron mediciones diarias para registrar el descenso de los residuos a lo largo de la evaluación. Cabe precisar que se realizaron compactaciones con frecuencia semanal mediante un cachaco de concreto a fin de simular las compactaciones que presentan un relleno sanitario al ingresar nuevos residuos y las maquinarias para el desarrollo de la nivelación del material.

3.5.4.3 Potencial de hidrógeno, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y turbiedad. Para la medición de los parámetros de campo: potencial de hidrógeno, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto se utilizó el multiparámetro HANNA modelo HI98194. Se realizó mediciones diarias estableciendo un horario entre las 12 horas a las 14 horas, ya que la temperatura varía los valores de pH y conductividad eléctrica. En la Figura 8 se muestra el proceso de medición de los parámetros de campo.

La turbidez se midió utilizando un turbidímetro HACH 2100N, que ofrece un rango de medición de 0 a 4000 NTU, lo que permitió evaluar la turbidez de los lixiviados con partículas suspendidas. En la Figura 8 se muestra el proceso de medición de turbiedad.

Figura 8

Medición de los parámetros de campo: pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y turbiedad del lixiviado



Nota: A) Medición de parámetros de campo mediante el multiparámetro. B) Vista de medición de lixiviados C) Medición mediante el turbidímetro, D) Vista del turbidímetro, E) Celdas de turbidímetro con lixiviados.

3.5.4.4 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅). Para la determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días se desarrolló acorde al método de análisis SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B. Se comenzó con determinar las diluciones adecuadas de los lixiviados para su análisis, por lo que fue variando en el tiempo de acuerdo con el proceso de degradación de la materia orgánica de los lixiviados. Una vez definido las diluciones se procede a realizar la preparación del medio, el cual se detalla a continuación.

- Aireación del agua destilada mediante inyectores de aire hasta obtener un mínimo de oxígeno disuelto de 8 mg/L.
- Adición de los nutrientes amortiguadores de DBO₅, los cuales presentan concentraciones de amoníaco de 0,697 ppm, calcio 1,060 ppm, hierro: 0,307 ppm, magnesio: 0,440 ppm y fósforo: 8,42 ppm. Asimismo, este nutriente amortiguador cuenta con un pH de 7.27 (HACH, 2023).

- Inclusión de agua con la preparación de medio a los frascos de boca esmerilada (frascos Winkler) de 300 mL. Serán los frascos necesarios para las diluciones, antes definidas, y además se agregó de agua de preparación de medio a un winkler siendo el blanco.
- Sembrío de las muestras mediante pipetas de acuerdo con las diluciones establecidas e inclusión del agua preparada hasta la parte superior.
- Incubación de las muestras por 5 días en una incubadora a 20 °C ±1 C.

En la Figura 9 se muestra el proceso de medición de la demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días.

Al finalizar los 5 días, se realiza la medición del oxígeno disuelto en cada frasco mediante el oxímetro. Para el cálculo de la DBO₅, se utilizó la ecuación 15:

$$DBO_5 \left(\frac{mg}{litro} \right) = (OD_b - OD_i) \left(\frac{Vol\ botella}{ml\ de\ la\ muestra} \right) (OD_b - OD_s) \dots \dots \dots (15)$$

Donde:

- OD_b: Oxígeno disuelto del blanco, al final del periodo de incubación.
- OD_i: Oxígeno disuelto en la dilución de la muestra al final del periodo.
- OD_s: Oxígeno disuelto presente en la muestra no diluida.

Figura 9

Medición de la Demanda Bioquímica de Oxígeno al 5to día en el laboratorio de la FIA



Nota: A) medición del OD inicial de los lixiviados, B y C) Diluciones de las muestras en las botellas Winkler B) Medición del oxígeno disuelto en las botellas Winkler posterior a la incubación.

3.5.4.5 Demanda Química de Oxígeno. La determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se realizó en los laboratorios acreditados por INACAL, ALAB Analytical Laboratory y SGS del Perú S.A.C., utilizando el método SMEWW-APHA-AWWA-WEF, Parte 5220 D; 23^a Edición: 2017. Es importante destacar que las muestras fueron preservadas mediante la adición de H₂SO₄ 1:1 hasta alcanzar un pH inferior a 2 y refrigeradas a 6 °C. En el Anexo 2, se presenta los informes de ensayo.

3.5.4.6 Sólidos Totales. La determinación de los sólidos totales se desarrolló acorde al método de análisis SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 B, que consiste en la evaporación de una muestra a una temperatura entre los 103 °C a 105 °C. El procedimiento de medición se detalla a continuación:

- Preparación de la placa evaporación mediante el calentamiento de la placa limpia a 103 °C y 105 °C durante una hora, posteriormente se conservó la placa en el desecador y se realizó el pesado de la placa.
- Transferencia de un volumen de 10 ml mediante una pipeta hacia las placas de evaporación.
- Secado de la cápsula y muestra en una plancha de evaporación para acelerar la evaporación y posteriormente se ingresó en el horno a 103-105 °C por una hora.
- Enfriamiento de la placa en el desecador y después se realizó el pesado de la placa.

Para el cálculo de los sólidos totales, se utilizó la ecuación 16:

$$\text{Sólidos Totales} \frac{mg}{l} :: \frac{(A-B)X1000}{vol.de muestra.ml} \dots\dots\dots(16)$$

Donde:

- A: Peso de muestra seca y placa de evaporación en mg.
- B: Peso de la placa de evaporación en mg.

En la Figura 10 A y 10 B se muestra el proceso de medición de los sólidos volátiles.

3.5.4.7 Sólidos Volátiles. La determinación de los sólidos volátiles se desarrolló acorde al método de análisis SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 E, que consiste en la incineración de una muestra a una temperatura de 550 ± 50°C. El procedimiento de medición se detalla a continuación:

- Incineración de la muestra producto de los sólidos totales en una mufla a temperatura de 550 ± 50°C en un tiempo de 15 a 20 minutos.
- Enfriamiento de la placa de evaporación hasta que hay disminuya el calor y transferencia hacia el desecador y después se realizó el pesado de la placa.

Para el cálculo de los sólidos volátiles, se utilizó la ecuación 17:

$$\text{Sólidos Volátiles} \frac{mg}{l} :: \frac{(A-B)X1000}{vol.de muestra.ml} \dots\dots\dots(17)$$

Donde:

- A: Peso de residuo con la placa de evaporación antes de la incineración en mg.
- B: Peso de residuo con la placa de evaporación después de la incineración en mg.

En la Figura 10 C y 10 D se muestra el proceso de medición de los sólidos volátiles.

Figura 10

Medición de los sólidos totales y sólidos volátiles de los lixiviados



Nota: A) Muestras de lixiviados en la plancha de evaporación, B) Pesaje de los sólidos totales y C) Vista de las cápsulas con los sólidos fijos B) Pesaje de sólidos fijos y volátiles.

3.5.5 Procesamiento y análisis de datos

Para el procesamiento de datos, se empleó la prueba estadística ANOVA utilizando el software StatsDirect. El objetivo fue determinar las diferencias significativas en las medias de los parámetros evaluados de la composición de lixiviados en los biorreactores semiaeróbicos con diferentes composiciones de residuos sólidos municipales, con un nivel

de significancia de $p < 0.05$. Adicionalmente, para determinar la correlación entre las variables de estudio que presenten diferencias significativas, se utilizó la prueba de correlación de Pearson, con un nivel de significancia de 0.01 (bilateral).

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

4.1 Análisis de datos

En el presente capítulo se describen los resultados de las mediciones durante el periodo de investigación. Los parámetros de evaluación de los residuos durante en la fase de puesta en marcha fueron peso, volumen, altura, sólidos volátiles, sólidos totales y densidad de compactación; la fase de evaluación se midió temperatura de los residuos sólidos y tasa de asentamiento, asimismo, se realizaron mediciones de la temperatura ambiente. En cuanto, los parámetros fisicoquímicos en los lixiviados se evaluaron: pH, conductividad eléctrica, turbiedad, sólidos totales, sólidos volátiles, demanda bioquímica de oxígeno al 5 día (DBO₅) y demanda química de oxígeno (DQO) durante la fase de evaluación. A continuación, se detalla los resultados.

4.1.1 Resultados fisicoquímicos de los residuos

4.1.1.1 Resultados de los residuos en la puesta en marcha. Los residuos ingresados al biorreactor 1 presentó un peso de 47.11 kg, volumen de 130.06 L y altura inicial de 0.46 m; el biorreactor 2 presentó peso de 36.58 kg, volumen de 121.58 L y altura inicial de 0.43 m; y además en el biorreactor 3 presentó con un peso de 26.05 kg, volumen de 107.44 L y altura inicial de 0.38 m. Además, presentaron los 3 biorreactores en promedio un contenido de sólidos totales (ST) inicial del 69.6%, humedad inicial de 30.4 %, sólidos volátiles (SV) del 55.1 % y densidad de residuos compactados de 301 kg/m³. Los resultados se establecen en la Tabla 7.

Tabla 7

Resultado de los parámetros fisicoquímicos de los residuos en la fase de puesta en marcha

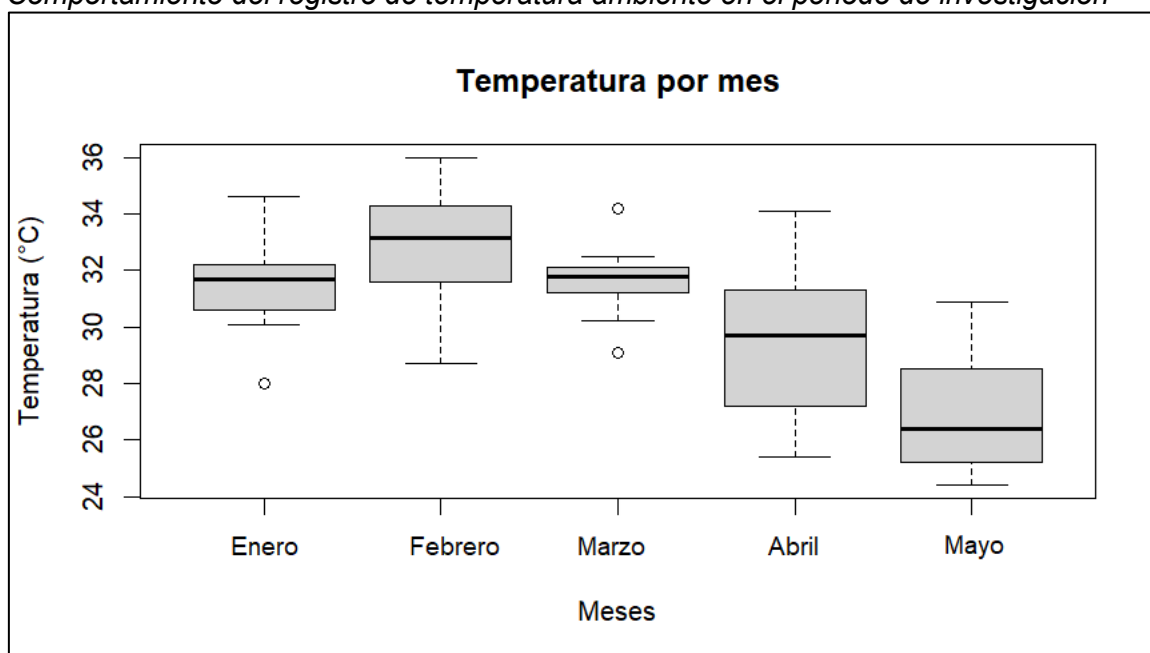
Parámetros	Unidad	Biorreactor 1 (0% de aprovechamiento)	Biorreactor 2 (25% de aprovechamiento)	Biorreactor 3 (50% de aprovechamiento)	Promedio	Desviación estándar
Peso	kg	47.11	36.58	26.05	-	
Volumen	L	130.0	121.6	107.4	-	
Altura inicial	m	0.46	0.43	0.38	-	

Parámetros	Unidad	Biorreactor 1 (0% de aprovechamiento)	Biorreactor 2 (25% de aprovechamiento)	Biorreactor 3 (50% de aprovechamiento)	Promedio	Desviación estándar
Sólidos totales inicial	%	65.9	69.4	59.2	69.6	4.9
Humedad inicial	%	34.1	30.6	40.8	30.4	5.1
Sólidos volátiles	%	57.3	55.6	52.5	55.1	2.4
Densidad de residuos compactos	kg/m ³	362	300	242	301	60

4.1.1.2 Temperatura ambiente. Durante el periodo de investigación desde enero a mayo de 2024, se registró una temperatura ambiente promedio de 31.1 °C, presentando la temperatura máxima promedio en febrero con 33.0 °C y la temperatura mínima promedio en mayo con 27.0 °C. Cabe precisar que en los meses donde registraron las mayores variaciones de temperatura fueron en abril (25.4 °C a 34,1 °C) y mayo (24,4 °C a 30,9° C). En la Figura 11 se presenta los registros de la temperatura ambiente.

Figura 11

Comportamiento del registro de temperatura ambiente en el periodo de investigación



4.1.1.3 Resultados de las temperaturas de los residuos en los biorreactores.

Los resultados de las mediciones de temperatura realizadas tanto dentro de los residuos como las temperaturas de las tuberías horizontal y tubería vertical se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8

Resultados de parámetros fisicoquímicos de los lixiviados generados en los biorreactores semiaerobios

Parámetros	Unidad	Residuos				
		Temperatura exterior	Temperatura interior	Temperatura media	Temperatura a tubería horizontal	Temperatura a tubería vertical
		°C	°C	°C	°C	°C
Biorreactor 1	Media	36,2	33,5	33,3	30,7	32,6
	Desviación estándar	4,4	5,3	4,9	3,8	4,4
	Mínimo	26,5	23,6	22,8	22	23,2
	Máximo	43,9	44	40,5	39,5	41,5
Biorreactor 2	Media	36,6	34,3	33	30,5	33
	Desviación estándar	4,4	5,5	4,9	3,8	4
	Mínimo	45,9	44,3	40,9	38,3	42,9
	Máximo	27,9	23,3	22,1	20,5	25,2
Biorreactor 3	Media	35,2	32,8	32,8	30,3	32,1
	Desviación estándar	4,7	5,2	5,8	3,9	4,8
	Mínimo	27	22,5	21,6	20,9	21,8
	Máximo	46,8	42,8	46,9	35,8	40,7

4.1.1.4. Asentamiento de los residuos sólidos. Los resultados del asentamiento de los residuos sólidos dentro de los biorreactores se registró un descenso progresivo de las alturas durante el proceso de evaluación, tal como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9*Resultados de la ratio de asentamiento de los residuos sólidos en los biorreactores*

Biorreactor	Altura inicial (cm)	Ratio asentamiento semana-5	Ratio asentamiento semana-10	Ratio asentamiento semana-18	Altura final (cm)	Ratio de asentamiento total
Biorreactor 1	46,0	17,4 %	13,0 %	6,0 %	31,0	45,3 %
Biorreactor 2	43,0	23,3 %	9,1 %	3,3 %	29,0	32,6 %
Biorreactor 3	38,5	24,7%	13,7 %	5,9 %	24,0	37,6 %

Nota: Ratio asentamiento: altura de hundimiento acumulado/altura inicial de los desechos.

4.1.2 Resultados fisicoquímicos de los lixiviados

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos de los lixiviados se presentan en las Tablas 10 y 11, donde se detallan los valores máximos, mínimos, promedio y desviación estándar para cada parámetro, obtenidos durante todo el proceso de medición.

Es importante señalar que, según Gómez et al. (2019), la composición del lixiviado varía en función de la edad del relleno sanitario, específicamente de las fases de descomposición en las que se encuentra. Estas fases incluyen la aerobia, anaerobia acidogénica, metanogénica y de maduración, cada una caracterizada por diferentes concentraciones de contaminantes. Por ello los resultados presentados en las tablas reflejan de manera general las mediciones obtenidas a lo largo de la evaluación.

En la Tabla 10 se muestran los parámetros registrados en campo (pH, conductividad eléctrica y turbidez) durante el proceso de lixiviación de los residuos sólidos en los biorreactores.

Tabla 10

Resultados de parámetros fisicoquímicos de los lixiviados generados en los biorreactores semiaerobios

Parámetros		pH	Conductividad eléctrica	Turbiedad
Unidad		Unidades de pH	uS/cm	NTU
Biorreactor 1	Media	8,80	35591	1106
	Desviación estándar	1,32	23685	657
	Mínimo	5,32	6003	183
	Máximo	9,81	126400	3029
Biorreactor 2	Media	9,06	34658	480
	Desviación estándar	0,74	24052	423
	Mínimo	6,96	4143	60
	Máximo	9,68	90340	1875
Biorreactor 3	Media	9,04	37820	435
	Desviación estándar	0,48	25106	608
	Mínimo	6,96	5591	89
	Máximo	9,5	94820	3432

En la Tabla 11 se presenta los parámetros fisicoquímicos: sólidos totales, sólidos volátiles, demanda bioquímica de oxígeno al 5 día, demanda química de oxígeno y relación DBO5/DQO, durante todo el proceso de lixiviación de los residuos sólidos en los biorreactores.

Tabla 11

Resultados de parámetros fisicoquímicos de los lixiviados generados en los biorreactores semiaerobios

Parámetros	Sólidos totales	Sólidos volátiles	Demanda Bioquímica de Oxígeno al 5 día (DBO ₅)	Demanda Química de Oxígeno	DBO5/DQO
Unidad	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	-

Parámetros		Sólidos totales	Sólidos volátiles	Demanda Bioquímica de Oxígeno al 5 día (DBO ₅)	Demanda Química de Oxígeno	DBO ₅ /DQO
Biorreactor 1	Media	36524	28342	271,3	13918,7	0,02
	Desviación estándar	18915	16493	275,1	9227,42	0,016
	Mínimo	12212	7730	48,9	4427,7	0,003
	Máximo	65540	57000	952	32726,6	0,047
Biorreactor 2	Media	35399	29097	186,2	11256,72	0,021
	Desviación estándar	30494	27473	181,6	6636,13	0,02
	Mínimo	7672	5452	42,5	2626,4	0,004
	Máximo	104420	92530	699,1	26086,4	0,05
Biorreactor 3	Media	31494	25697	178,3	10150,41	0,022
	Desviación estándar	18653	16183	107,4	7049,29	0,012
	Mínimo	12484	9116	35,1	1785,1	0,005
	Máximo	58850	50760	422,5	20753	0,04

4.1.3 Relación estadística

La data recolectada de los diferentes parámetros tanto en los residuos sólidos y lixiviados fueron analizados con la plataforma Statics Direct mediante el análisis de varianza de un factor entre medias para determinar la existencia de diferencias significativas entre los resultados de los 3 biorreactores, obteniéndose que existe diferencias significativas entre los biorreactores de en los parámetros de altura en el asentamiento de los residuos y turbiedad del lixiviado, mientras en los demás parámetros no presenta diferencias significativas en los biorreactores, tal como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12

Resultados de los análisis de varianza de un factor de los parámetros de interés.

Parámetros		Biorreacto r 1	Biorreacto r 2	Biorreacto r 3	Valo r F	p- valor	Significancia
Residuos	Temperatura exterior	36.2 ± 4.37	36.6 ±4.35	35.2 ± 4.69	1,67	0,189	No significativa

Parámetros	Biorreacto r 1	Biorreacto r 2	Biorreacto r 3	Valo r F	p- valor	Significancia
Temperatura interior	33.5 ± 5.29	34.3 ± 5.48	32.8 ± 5.20	1,32	0.269	No significativa
Temperatura media	33,3 ± 4,90	33,0 ± 4,89	32,8 ± 5,75	0,20 7	0.814	No significativa
Temperatura tubería horizontal	30,7 ± 3,79	30,5 ± 3,82	30,3 ± 3,91	0,18 2	0.834	No significativa
Temperatura tubería vertical	32,6 ± 4,37	33,0 ± 4,01	32,1 ± 4,81	0,54 8	0,579	No significativa
Altura de los residuos	37.0 ± 4,68	33.6 ± 4.31	28.5 ± 4.05	62.4	0,000 1	$p < 0.05$
pH	8,80 ± 1,32	9,06 ± 0,55	9.04 ± 0,48	1,37	0,257	No significativa
Turbiedad	1106 ± 657	480 ± 423	435 ± 608	21,1	0.000 1	$p < 0.05$
Conductividad eléctrica	35591 ± 23685	34658 ± 4052	37820 ± 25106	0,25	0,783	No significativa
Sólidos Totales	36524 ± 18915	35399 ± 30494	31494 ± 18653	0,10 2	0,943	No significativa
Sólidos volátiles	28342 ± 16493	29097 ± 27473	25697 ± 16183	0,05 9	0,903	No significativa
DBO ₅	271,3 ± 275,1	186,2 ± 181,6	178,3 ± 107,4	0,86 2	0,431	No significativa
DQO	13918,70 ± 9227,42	11256,72 ± 6636,13	10150,41 ± 7049,29	0,54 8	0,585	No significativa

Nota: p-valor: valor de probabilidad.

Asimismo, se determinó que existe diferencias significativas entre las temperaturas de los 3 biorreactores en las diferentes ubicaciones presentando una significancia menor a 0.05, asimismo se determinó que existe diferencias significativas entre la temperatura horizontal y vertical, tal como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13*Resultados de los análisis de varianza de un factor de los parámetros de interés*

Parámetros	Temperatura exterior/ Temperatura interior /Temperatura media			Temperatura tubería horizontal/ vertical		
	Valor F	p-valor	Significancia	Valor F	p-valor	Significancia
Biorreactor 1	6,78	0,0014	$p < 0.05$	6,540447	0,01	$p < 0.05$
Biorreactor 2	8,74	0,0002	$p < 0.05$	11,84482	0,000 7	$p < 0.05$
Biorreactor 3	4,66	0,01	$p < 0.05$	5,310481	0,02	$p < 0.05$

Nota: p-valor: valor de probabilidad.

4.2 Discusión de resultados

La investigación se desarrolló desde enero a mayo de 2024 registrando una temperatura ambiente en el rango de 24.4 °C a 36.0 °C de acuerdo con las mediciones realizadas. Estos valores son consistentes con los datos de la estación meteorológica del SENAMHI cercanos al área de estudio en las mismas fechas, la cual reportó temperaturas ambientales en el rango de 17.2 °C a 32.9 °C, con un valor promedio de 24.6 °C y con respecto a la humedad se presentó en el rango de 39.2 % a 100 % con un valor promedio de 74.2 %. Cabe resaltar que las mayores temperaturas ambientales y menores humedades se presentaron en febrero 2024. De acuerdo con Yesiller y Hanson (2003), estos factores ambientales influyen considerablemente en varios parámetros de composición y asentamiento de los residuos en los rellenos sanitarios.

Los residuos sólidos ingresados en cada biorreactor se definieron acorde a diferentes escenarios de la gestión de residuos sólidos con respecto al aprovechamiento o valorización que potencialmente puede desarrollarse en la Municipalidad Metropolitana de Lima. De acuerdo con Abarca et al. (2013), la gestión de residuos está influenciado por el comportamiento de las partes interesadas y los factores que influyen en el sistema de gestión de residuos son los componentes técnicos, ambientales, financieros, sociocultural, institucional y legal. En el caso del reciclaje, mencionan González-Torre y Adenso-Díaz

(2005) que los factores que desarrollan un fuerte hábito de reciclaje son las influencias sociales, factores altruistas y regulatorios. Asimismo, Scheinberg et al. (2010), describe que existe indicios de que el precio elevado de eliminación establecido como impuestos tiene como efecto una mayor recuperación de residuos generados, que se destinan a las cadenas de valor.

De acuerdo a la plataforma Sigersol del Minam, la composición de generación de residuos sólidos en la Municipalidad Metropolitana de Lima durante el periodo 2019 a 2022, presentó 78.4 % de residuos sólidos aprovechables compuesto por 56.5 % de residuos orgánicos (residuos de alimentos, residuos de maleza y poda y otros residuos orgánicos) y 21.9 % de residuos inorgánicos (papel, cartón, vidrio, plástico y metales) y 21.6 % de residuos sólidos no aprovechables (bolsas plásticas, papel higiénico, pilas, tecnopor, textiles, caucho, entre otros). Sin embargo, para definir los residuos sólidos en los biorreactores se modificaron los residuos por presentar bajo peso y evitar la peligrosidad. Por lo que a continuación se describe los escenarios de aprovechamiento de los biorreactores.

El biorreactor 1 presentó la composición de residuos sólidos con 0% de aprovechamiento, que representa a una población local que cuenta con baja a nula tasa de aprovechamiento de residuos, por lo que los residuos generados tendrán como disposición final en su totalidad el relleno sanitario. Los residuos ingresados en el biorreactor 1 presentó un peso de 47.11 kg conformado por 64.5 % de residuos orgánicos y 35.5 % de residuos inorgánicos (24.9 % aprovechable y 10.6 % no aprovechable), y presentó en volumen 130 L conformado por 20.6 % de residuos orgánicos y 79.4 % de residuos inorgánicos, esta condición se debe a que los residuos orgánicos presentaron mayor densidad.

El biorreactor 2 presenta el escenario de 25% con aprovechamiento de los residuos generados, el cual refleja a nivel local a la población con mejores tasas de reciclaje, por lo tanto, el 75% de los residuos tendrán como disposición final el relleno sanitario tal como

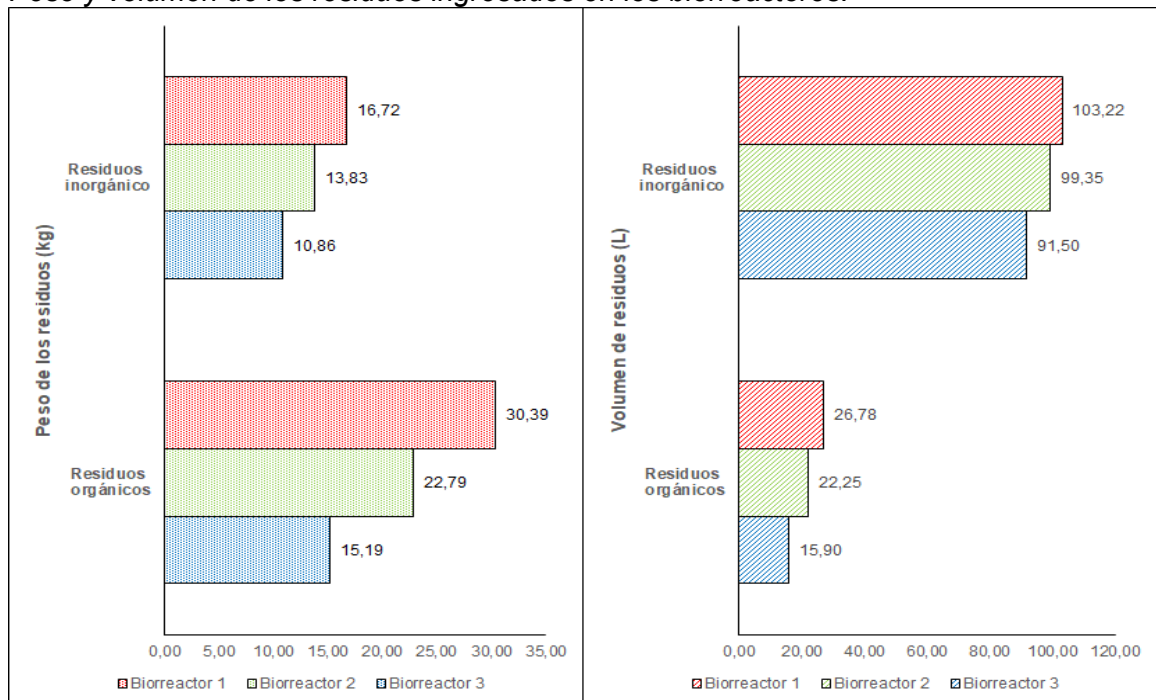
se ingresó en el biorreactor. Los residuos ingresados en el biorreactor 2 presentó un peso de 36.58 kg conformado por 62.3 % de residuos orgánicos y 37.6 % de residuos inorgánicos (24.1 % aprovechable y 13.6 % no aprovechable), y presentó en volumen 121.6 L conformado por 18.3 % de residuos orgánicos y 81.7 % de residuos inorgánicos.

Además, en el biorreactor 3 el cual presenta la composición de residuos sólidos con 50% de aprovechamiento, representa el escenario de los residuos generados a nivel internacional como menciona Segura et al. (2020), en Países Bajos y Suecia donde realizan la recuperación aproximadamente más del 50% por reciclaje y compostaje, más del 48 % en incineración con recuperación de energía en 1% entre incineración sin recuperación de energía y disposición final. Por lo tanto, el 50% de los residuos tendrán como disposición final el relleno sanitario tal como se ingresó en el biorreactor. El biorreactor 3 presentó un peso de 26.05 kg conformado por 58.3 % de residuos orgánicos y 47.1 % de residuos inorgánicos (22.5 % aprovechable y 19.1 % no aprovechable), y en volumen se registró 107.4 L conformado por 18.3 % de residuos orgánicos y 81.7 % de residuos inorgánicos.

En la Figura 12, se presenta el peso y volumen de los residuos ingresados en los 3 biorreactores.

Figura 12

Peso y volumen de los residuos ingresados en los biorreactores.



De acuerdo con la Figura 12, se observa que el volumen de los residuos inorgánicos predomina en los biorreactores a pesar de presentar menor peso a comparación de los residuos orgánicos. De acuerdo con Pohland et al.(1993), el volumen de los residuos inorgánicos en los rellenos puede inhibir la estabilización de contaminantes prioritarios orgánicos e inorgánicos, especialmente en condiciones de lixiviación de un solo paso.

Con respecto a los parámetros evaluados dentro de los residuos en la puesta de marcha, presentó valores promedio de humedad de 30.4 % y densidad de residuos compactados de 301 kg/m³. Estos valores de humedad se encontraron por debajo de los reportados para residuos en países ingresos bajos y medianos, como Perú. De acuerdo con Cointreau (1982), en estos países, el contenido de humedad de los residuos oscila entre 40 % a 80 % en países de ingresos bajos, y entre 40 % a 60 % en países de ingresos medianos.

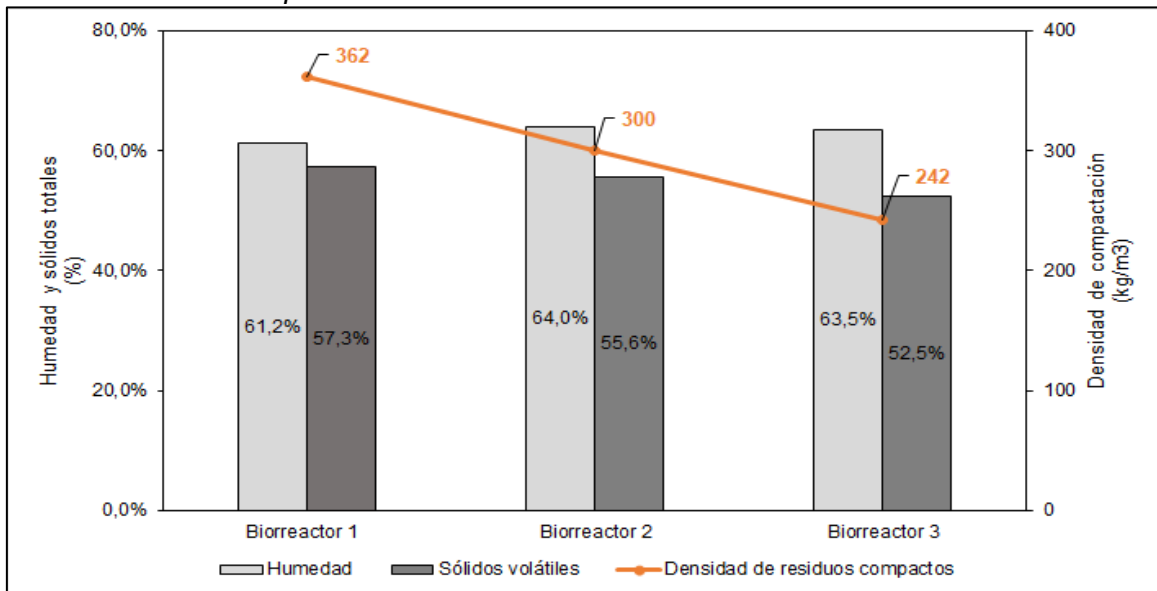
Por ello, se utilizó la ecuación (14), para añadir la cantidad de agua necesaria para alcanzar los niveles de humedad mencionados. Como resultado, se obtuvo un contenido

de humedad en el biorreactor 1, biorreactor 2 y biorreactor 3 con 61.2 %, 64.0 % y 63.5 %, respectivamente; y con respecto a los sólidos volátiles (SV) registraron 57.3 %, 55.6 % y 52.5 %, respectivamente. Estos valores se encuentran dentro del rango reportado en estudios previos realizados Lavagnolo et al. (2018) con 35.5 % ST y 69.0 % SV en su reactor orgánico. El Banco Mundial (2012) con 64 % SV y Grossuele y Lavagnolo (2020) con 39.5 % ST en el reactor con residuos de alta putrefacción.

En la Figura 13, se presenta las características fisicoquímicas de los residuos sólidos presentados en cada biorreactor.

Figura 13

Características fisicoquímicas de los residuos sólidos en los biorreactores



En esta evaluación, se consideró la temperatura de los residuos sólidos y de las tuberías de ventilación horizontal y vertical como un parámetro de interés. Según Zhang et al. (2021), este parámetro es clave para determinar la distribución del oxígeno, ya que las diferencias de temperatura influyen directamente en la trayectoria del flujo de aire.

En cuanto a las mediciones de temperatura en los biorreactores, se observó que las temperaturas más altas se registraron durante las dos primeras semanas de evaluación, superando los 40 °C en las mediciones exteriores, interiores y medias. Según

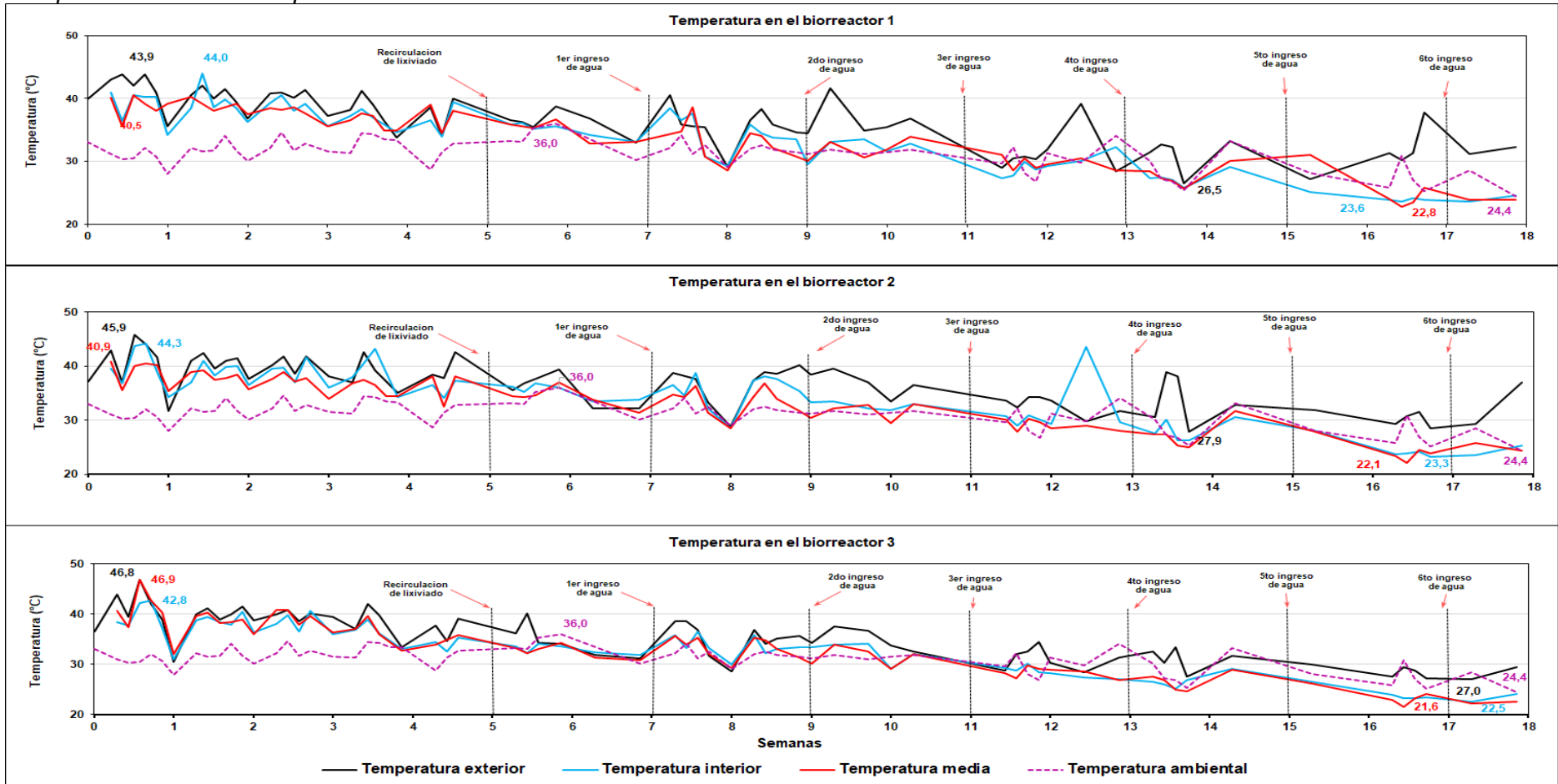
Zhang et al. (2021), este rápido aumento de temperatura se debe a las reacciones aerobias y a medida que estas reacciones avanzan, la temperatura de los biorreactores disminuye hasta equilibrarse con la temperatura del aire interior. En las últimas 4 semanas de evaluación los tres biorreactores presentaron temperaturas aproximadamente entre 21.6 a 27.9 °C. Tal como se muestra en la Figura 14.

Se determinaron diferencias significativas entre las tres ubicaciones evaluadas en cada uno de ellos (interior superior, externo superior y medio). Los valores de p obtenidos fueron de 0.0014 el biorreactor 1, 0.0002 para el biorreactor 2: y 0.01 para el biorreactor 3. Cabe precisar que la temperatura en la zona interior superior, más cercana a la tubería de ventilación, fue menor en comparación con las otras 2 ubicaciones (externo superior y medio). De acuerdo con Quang (2020) este comportamiento indica que la biodegradación aerobia se desarrolló efectivamente alrededor de la tubería de ventilación, lo que explica la reducción de temperatura en esa área por el ingreso de aire exterior.

Mientras que, la temperatura promedio interna de los residuos entre los biorreactores no presentan diferencias significativas entre sí. Este resultado podría ser relacionado de acuerdo con Zhang et al., (2019), quienes indican que la temperatura ambiental influye en la temperatura de los residuos debido a que los reactores son demasiado pequeños para retener eficazmente el calor, lo que provoca que el calor generado por la descomposición de los residuos se disipe rápidamente. Como consecuencia, la humedad también se disipa con mayor velocidad por el aumento de temperatura, por este motivo se adicionó agua de forma bisemanal en los biorreactores a fin de mantener la humedad de los residuos.

Figura 14

Comportamiento de la temperatura de los residuos sólidos en los tres biorreactores.



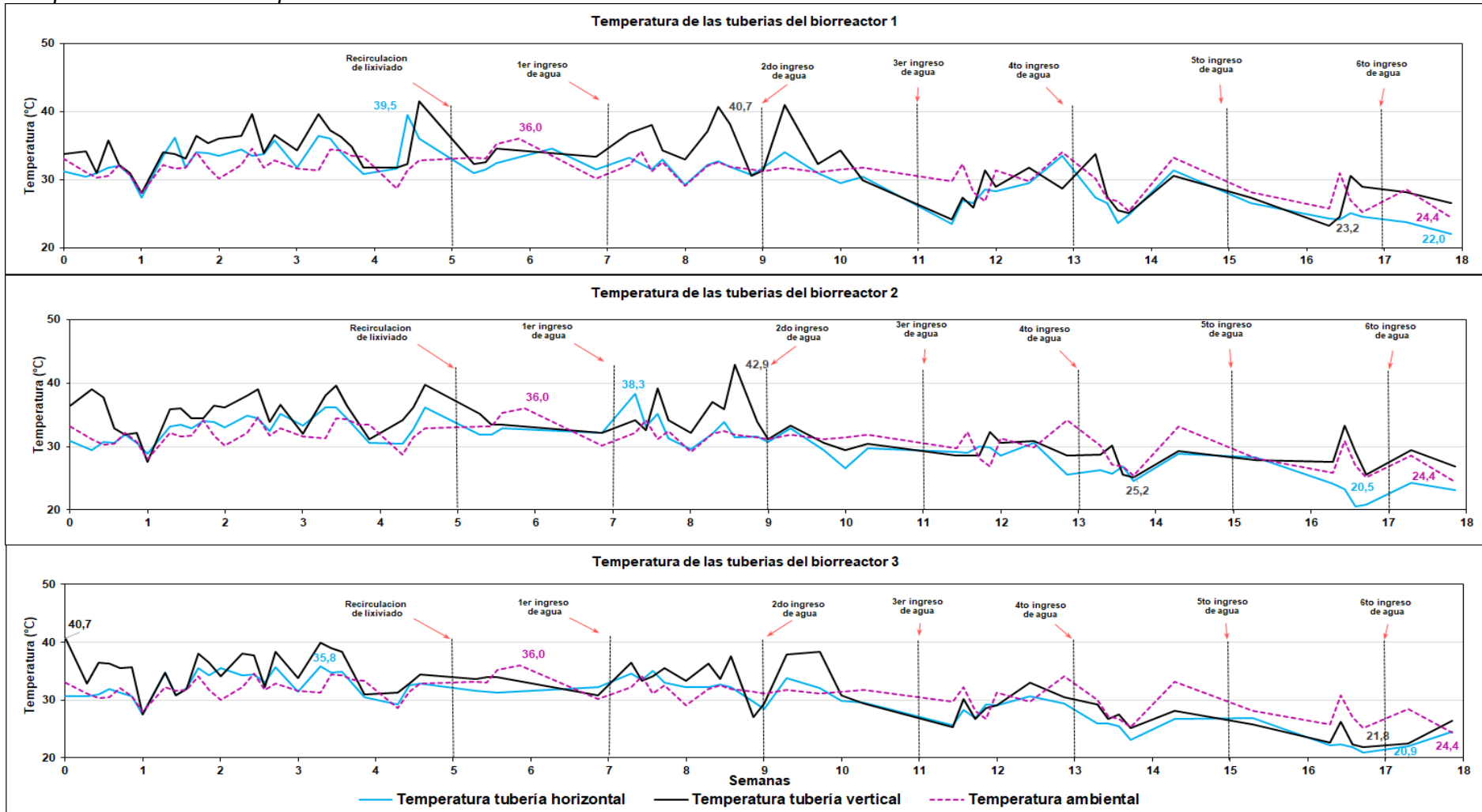
Con respecto a las temperaturas registradas en las tuberías de ventilación horizontal y vertical se presentó que las mayores temperaturas para los 3 biorreactores se registraron en diferentes periodos de la evaluación, en el caso del biorreactor 1 se presentó entre la semana 4 al 9 (tubería vertical: 40.7 °C y tubería horizontal: 39.5 °C), en el biorreactor 2 entre la semana 7 al 9 (tubería vertical: 42.9 °C y tubería horizontal: 38.3 °C), y en el biorreactor 3 entre la semana 1 al 3 (tubería vertical: 40.7 °C y tubería horizontal: 35.8 °C). Mientras que las menores temperaturas se registraron en las últimas 4 semanas en los 3 biorreactores alcanzando temperaturas entre 20.9 °C a 25.2 °C.

Además, se determinó que, en los 3 biorreactores, la temperatura de la tubería horizontal y tubería vertical presentaron diferencias significativas entre sí, donde la tubería vertical presentó la mayor temperatura. Esta variación de la temperatura según Matsuto et. al. (2015) se debe a la fuerza impulsora producto de la fuerza de los desechos, asimismo explica que a mayor es la temperatura en la capa de los desechos, generará una diferencia marcada de temperaturas entre las tuberías debido a que existe mayor volumen de gas que sale de los drenes de la chimenea. Por otro lado, Matsufuji (2021) explica que la presión dentro de las capas de residuos se vuelve negativa por la diferencia de temperatura, lo que induce a que el aire exterior fluya hacia las capas de residuos y, a su vez, promueve una mayor descomposición por parte de microorganismos aeróbicos.

En la Figura 15, se presenta la comparación de la temperatura exterior superior, interior superior y media de los residuos en los biorreactores y la temperatura vertical y horizontal de las tuberías.

Figura 15

Comportamiento de la temperatura en las tuberías de los tres biorreactores



En cuanto el asentamiento de los residuos sólidos se determinó que existen diferencias significativas entre la tasa de asentamiento de los biorreactores, presentando el biorreactor 1 una mayor ratio de asentamiento con 45.3 % a comparación de los demás biorreactores (biorreactor 2: 32.6 % y biorreactor 3: 37.6 %), por lo que el biorreactor 1 se desarrolló el asentamiento de los residuos a una mayor velocidad durante el periodo de evaluación.

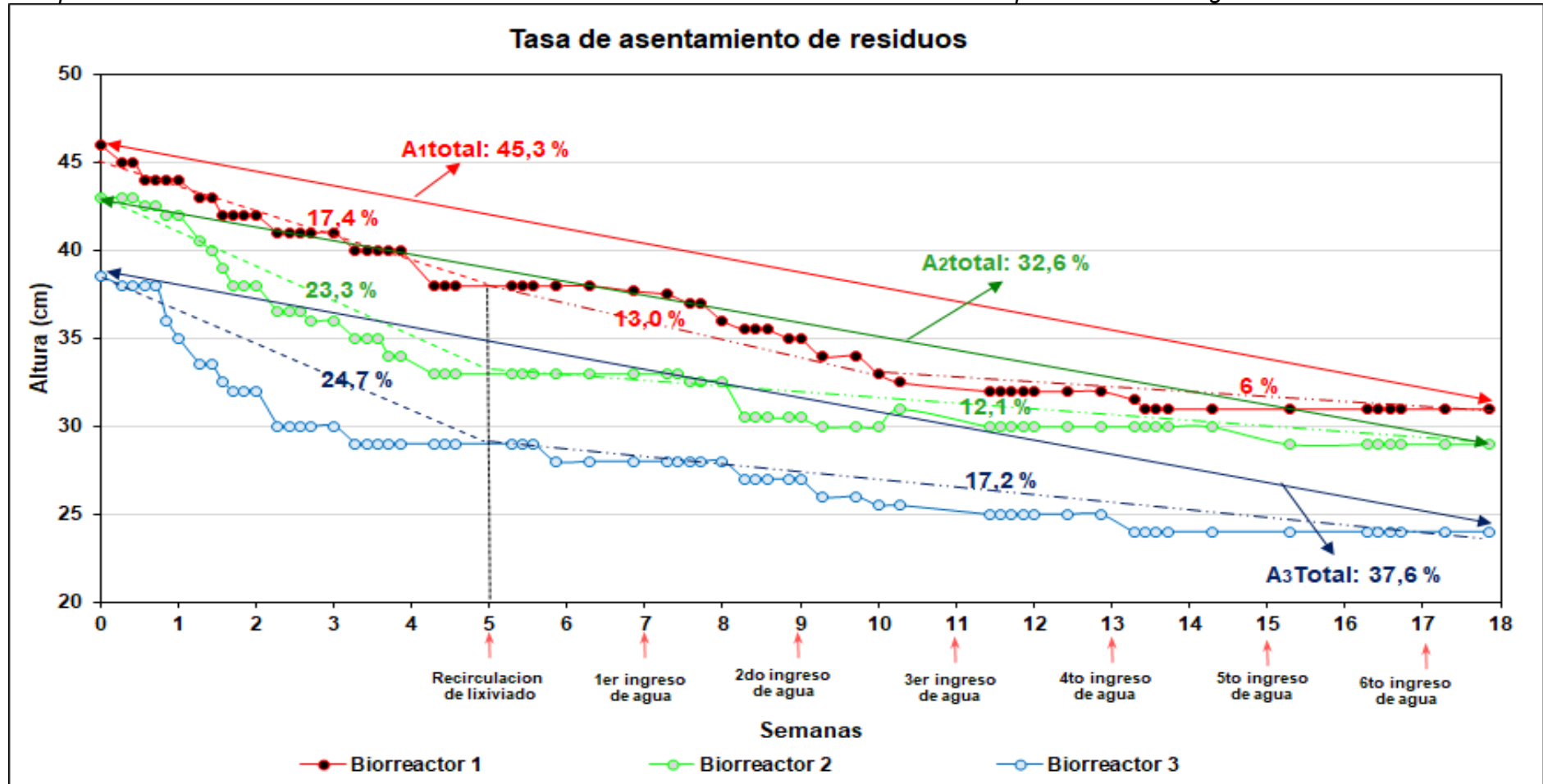
De acuerdo con Ko et al, 2016 y Reddy et al, 2009 (citado en Ma et al., 2021), el porcentaje de asentamiento es parcialmente afectada por la descomposición orgánica el cual depende la humedad y la cantidad de materia orgánica presente en el residuo, por lo que presenta concordancia con biorreactor 1 que, al presentar mayor porcentaje de materia orgánica, presenta mayor asentamiento.

Asimismo, acorde a Erses et al. (2008), el asentamiento de los residuos sólidos es un parámetro clave que distingue entre rellenos de biorreactores anaeróbicos y aeróbicos, presentando respectivamente 5 % y 37 %, por lo que el valor de la tasa de asentamiento de los 3 biorreactores es similar a los biorreactores aeróbicos.

Además, durante las 5 primeras semanas se observó una mayor ratio de asentamiento de los residuos en los 3 biorreactores (biorreactor 1: 17.4 %, biorreactor 2: 23.3 % y biorreactor 3: 24.7 %). De acuerdo con Leonard et al. (2000), este descenso en las primeras semanas es producto de la actividad biológica que transforma la celulosa y el agua en subproductos gaseosos que da lugar a movimientos verticales descendentes, así como de la compresión física producto del peso de los residuos. Cabe precisar, que el biorreactor 1 continuó descendiendo con una pendiente continua hasta la semana 10 con 13% de ratio; posteriormente, se asentó gradualmente la tasa de asentamiento de los 3 biorreactores hasta llegar a un valor constante. Tal como se muestra en la Figura 16.

Figura 16

Comportamiento de la tasa de asentamiento en los lixiviados de los 3 biorreactores durante el proceso de investigación



El comportamiento del pH de los lixiviados generados en los 3 biorreactores, se observó dos fases conformadas por la fase acidogénica y fase metanogénica tal como se muestra en la Figura 17.

Durante la fase de acidogénesis, el lixiviado del biorreactor 3 presentó un pH inicial de neutro a alcalino de 6.96, incrementando a un pH de 7.5 una semana después de la incorporación de los residuos. Este tiempo fue menor en comparación con el biorreactor 1 y el biorreactor 2, que alcanzaron el pH de 7.5 en 3 y 2 semanas, respectivamente. Según Smårs et al. (2002), este comportamiento se atribuye a la menor concentración de ácidos orgánicos, lo que permitió una descomposición más rápida de los ácidos y, por ende, un aumento más acelerado del pH.

Posteriormente se desarrolló la fase metanogénica, durante la cual el pH comienza a incrementarse y estabilizarse en los tres biorreactores, alcanzando valores alcalinos superiores a 9.5 unidades de pH. En esta etapa, según Sang et al. (2009) se desarrolla un estado estacionario entre los procesos productores y consumidores de ácido, además se reduce la concentración de iones de ácidos grasos volátiles, los cuales son esenciales para las bacterias metanogénicas. Cabe precisar que Grossuele y Lavagnolo (2020) mencionan que estas condiciones alcalinas, sumado a la presencia de compuestos orgánicos estabilizados ricos en sustancias húmicas, favorecen la precipitación y complejación de metales pesados, lo que convierte a los rellenos semiaeróbicos en un importante sumidero de metales pesados.

De acuerdo con Olisa et al. (2016), el pH de los lixiviados de los rellenos sanitarios estabilizados podría ser más altos que los lixiviados de los rellenos sanitarios jóvenes, debido a que el contenido de los ácidos grasos en lixiviados estabilizados es menor después del proceso de fermentación de metano.

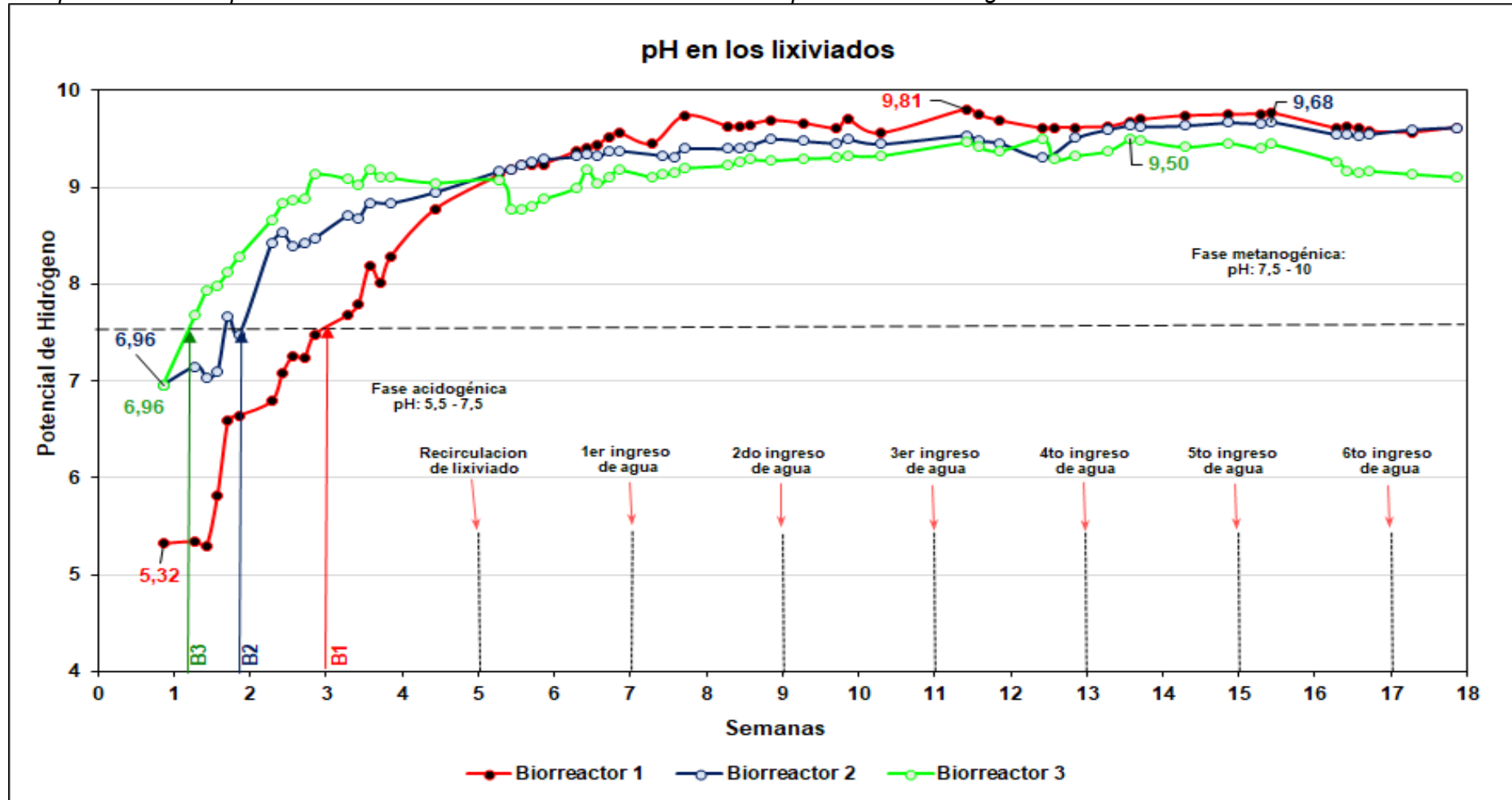
Asimismo, Smårs et al. (2002) precisa que la descomposición de los ácidos orgánicos y descomposición microbiana son afectados por los niveles de oxígeno y la temperatura ambiental. Por lo que el comportamiento de la fase acidogénica varía en

las investigaciones a comparación de lo obtenido como en Ahmadifar et al. (2016) que registraron un pH inicial menor de 4.0 y alcanzando un pH cercano al 8.0 a los 160 días en la fase metanogénica, Huang et al. (2008) registraron un pH inicial de 6.3 y alcanzaron pH de 8.0 a las 16 semanas y Zhang et al. (2019) presentó pH inicial de 4 y alcanza un pH de 8.0 a los 77 días.

Se determinó que no existen diferencias significativas en el pH de los biorreactores, este hallazgo fue realizado mediante el análisis ANOVA con un $F(2,166) = 1,369$, $p = 0.05$.

Figura 17

Comportamiento del pH en los lixiviados de los 3 biorreactores durante el proceso de investigación



Con respecto a la conductividad eléctrica y la turbiedad de los lixiviados en los biorreactores presentaron similares comportamientos tal como se muestra en la Figura 18.

Durante las 5 primeras semanas se observa el incremento de la conductividad eléctrica en los 3 biorreactores desde aproximadamente 5500 uS/cm a 20000 uS/cm y de la turbiedad del biorreactor 1 desde 829 NTU a 1092 NTU, que de acuerdo con Metcalf y Eddy (2003) se relacionaría a la formación de flóculos biológicos o biofilm producido por los biopolímeros extracelulares de las bacterias aerobias heterotróficas al consumir materia orgánica. En el caso del biorreactor 2 y biorreactor 3 se observa una reducción de la turbiedad producto de la sedimentación durante las 5 semanas sin embargo se registró el incremento de la conductividad eléctrica.

Cabe precisar que, según McMahon et al. 1995 (citado en Mukherjee S. et al., 2014), los contaminantes orgánicos suelen sufrir degradación por la actividad bacteriana en la zona vadosa. Este proceso genera la producción de ácidos carbónicos y orgánicos, los cuales mejoran la disolución mineral de los materiales. En consecuencia, de acuerdo con Atekwana et al. (2000, citado en Mukherjee S. et al., 2014) y Benson et al. (1997, citado en Mukherjee S. et al., 2014), se produce la generación de lixiviados con altos sólidos disueltos totales, lo que aumenta la conductividad de los lixiviados.

A partir la semana 5, se presenta variaciones de la conductividad eléctrica y la turbiedad en los 3 biorreactores, a causa del proceso de recirculación de los lixiviados adicionando sólidos y adición del agua bisemanal. Según Warith (2002), este incremento del contenido de humedad favorece el crecimiento de bacterias responsables de la descomposición de los residuos sólidos, por lo que cada ingreso de agua generó picos instantáneos de conductividad eléctrica y turbiedad por la activación de las bacterias además del arrastre de partículas en los residuos.

Cabe resaltar que partir de la semana 7, la generación de los lixiviados comenzó a reducirse debido al proceso físico de evaporación natural por las temperaturas

ambientales, por lo que generó también variaciones en la temperatura y conductividad eléctrica. Posteriormente se registra la reducción de los valores en turbiedad, atribuida al proceso de sedimentación alcanzando valores de 291 NTU, 520 NTU y 88.8 NTU, respectivamente.

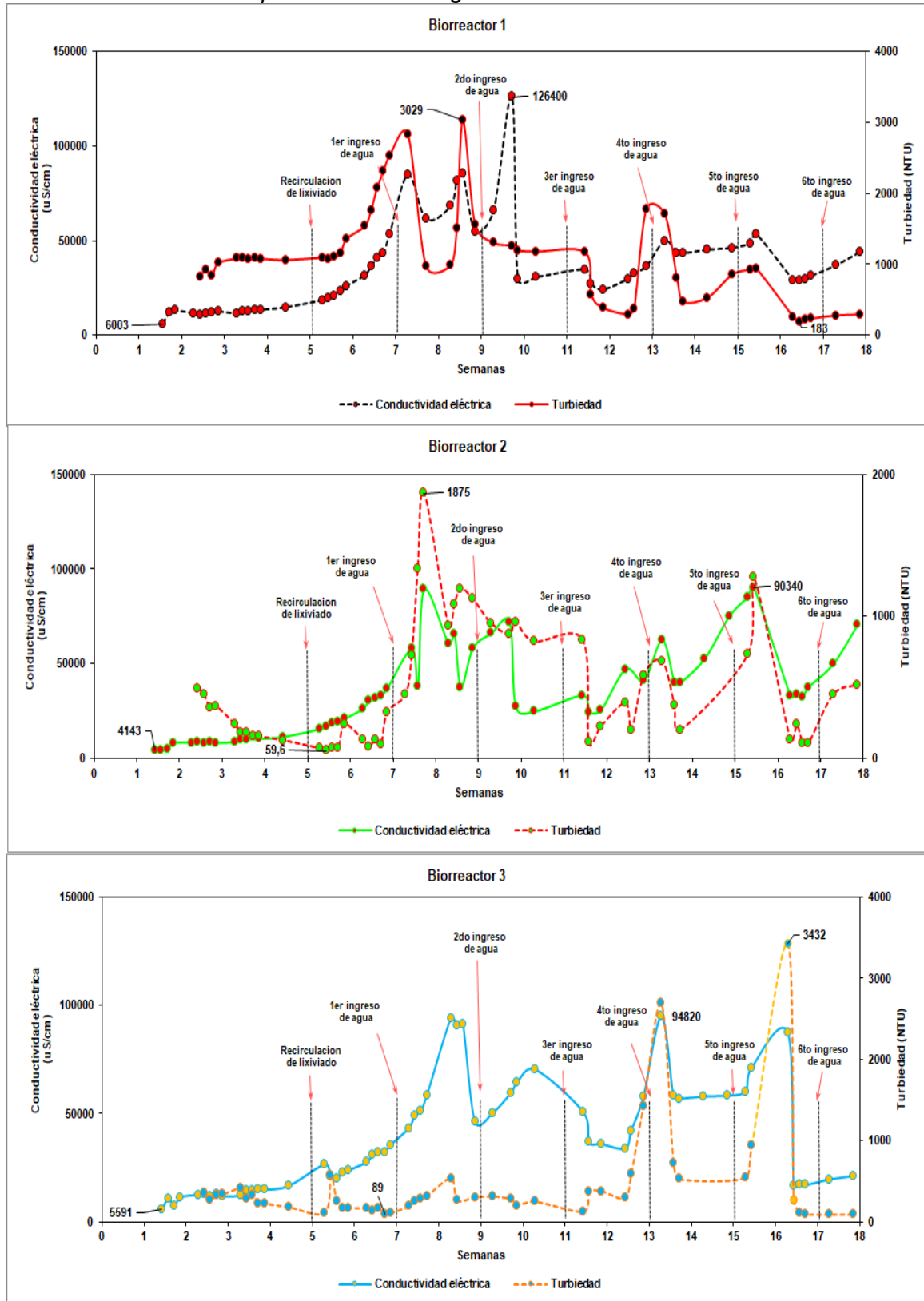
Los resultados de turbiedad y conductividad eléctrica determinados se encuentran en consonancia con previas investigaciones como las reportadas por Olisa et al. (2016) que registraron conductividades en la poza de lixiviación dentro del rango de turbiedad 210 a 1107 NTU y conductividad eléctrica de 25.4 a 40.35 mS/cm, y Aziz et al. (2010) registraron turbiedades de 600-3404 FAU y conductividades en un rango de 10.14 a 13.630 mS/cm.

Asimismo, se comparó con estudios especializados realizados por el OEFA en los rellenos sanitarios ubicados en Lima, el cual fue obtenido por acceso a la información pública brindada mediante Carta N.º 01558-2023-RAI (Anexo 3). Los rellenos sanitarios presentaron conductividades eléctricas en los lixiviados: El Zapallal en el 2021 presentó valores en el rango de 44400 μ S/cm hasta los 48400 μ S/cm, Portillo Grande para el 2022 presentó valores de 40600 uS/cm hasta 60100 uS/cm y Huaycoloro en el 2020 con valores desde 30000 μ S/cm hasta 58200 μ S/cm.

Se determinó que existen diferencias significativas en las turbiedades de los lixiviados de los biorreactores, este hallazgo fue realizado mediante el análisis ANOVA con un $F(2,143) = 21.064$, $p = 0.05$. Sin embargo, no existen diferencias significativas en la conductividad eléctrica, este hallazgo determinado presentó un $F(2,159) = 0.245$, $p = 0.05$.

Figura 18

Comparación conductividad eléctrica y turbiedad de los lixiviados de los 3 biorreactores durante el proceso de investigación



Con respecto a los sólidos totales y sólidos volátiles de los lixiviados en los biorreactores presentaron similares comportamientos tal como se muestra en la Figura 19.

Durante las 5 primeras semanas se observa el incremento de la concentración de los 3 biorreactores en los sólidos totales (biorreactor 1 de 12212 mg/L a 12730 mg/L, biorreactor 2 de 7672 a 8560 mg/L y biorreactor 3 de 12484 mg/L a 13430 ng/L) y de los sólidos volátiles (biorreactor 1 de 8088 mg/L a 7730 mg/L, biorreactor 2 de 5452 a 6130 mg/L y biorreactor 3 de 9116 mg/L a 9360 mg/L). Cabe precisar que durante estas semanas el porcentaje de materia orgánica en los lixiviados fue constante, obteniendo en el biorreactor 1 valores entre 0.61 y 0.62, biorreactor 2 entre 0.71 y 0.72 y el biorreactor 3 entre 0.72 y 0.73.

Mientras a partir la semana 5, se presenta variaciones de ambos parámetros, a causa del proceso de recirculación de los lixiviados adicionando sólidos y adición del agua bisemanal, asimismo posteriormente se observa la reducción de las concentraciones de ambos parámetros que correspondería a la reducción en la fuente de materia orgánica.

Los resultados de sólidos totales determinados están en consonancia con la investigación de Aziz et al. (2010), quien reportó valores en el rango de 5138 mg/L a 7404 mg/L. Asimismo, se compararon con estudios especializados realizados por el OEFA en rellenos sanitarios de Lima. En El Zapallal (2021), las concentraciones de sólidos totales en los lixiviados oscilaron entre 26280 mg/L y 28380 mg/L, mientras que en Portillo Grande (2022) se registraron valores entre 27925 mg/L y 40042 mg/L. Además, en junio de 2024 se muestrearon los lixiviados del relleno sanitario de Chancay, obteniendo una concentración de 47970 mg/L de sólidos totales y 7140 mg/L de sólidos volátiles, valores que se encuentran dentro del rango previamente reportado.

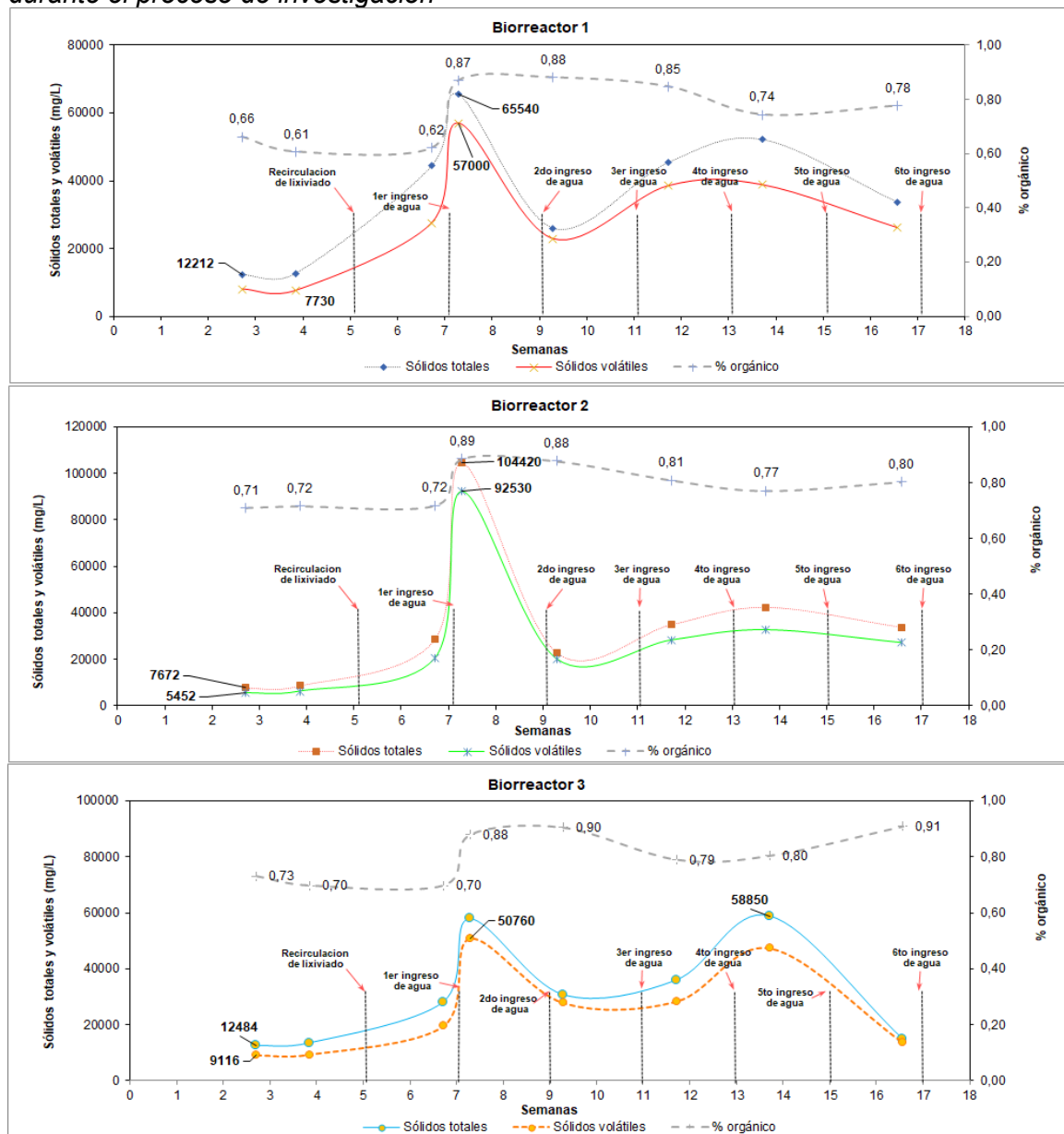
Cabe resaltar que los sólidos totales en las pozas de lixiviados de los rellenos sanitarios presentan un tiempo de sedimentación más prolongado en comparación con

un biorreactor; sin embargo, sus concentraciones se presentan dentro del rango esperado.

Se determinó que no existen diferencias significativas en los sólidos totales de los biorreactores, este hallazgo fue realizado mediante el análisis ANOVA con un $F(2,21) = 0.102$, $p = 0.05$; y sólidos volátiles de los biorreactores, este hallazgo fue realizado mediante el análisis ANOVA con un $F(2,18) = 0.050$, $p = 0.05$.

Figura 19

Comparación sólidos totales y sólidos volátiles de los lixiviados de los 3 biorreactores durante el proceso de investigación



Con respecto a la Demanda Bioquímica de Oxígeno al 5 día (DBO_5), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la relación DBO_5/DQO de los lixiviados en los biorreactores presentaron similares comportamientos tal como se muestra en la Figura 20.

En la etapa inicial de los biorreactores, las concentraciones de DBO_5 y DQO son las siguientes: en el biorreactor 1, 63.4 mg/L y 4593.2 mg/L; en el biorreactor 2, 61.2 mg/L y 2626.4 mg/L; y en el biorreactor 3, 107.7 mg/L y 3577.0 mg/L, respectivamente. A lo largo de las primeras 6 semanas, los valores de ambos parámetros aumentan debido al proceso de degradación de la materia orgánica y a la recirculación, alcanzando los valores máximos en los tres biorreactores. En el biorreactor 1, se registró un pico de 32726.6 mg/L para DBO_5 y en el biorreactor 2, de 13941 mg/L para DBO_5 . Acorde a Ahmadifar et al. (2016), el aumento de concentraciones de materia orgánica podría desarrollarse principalmente a una combinación de rápida disolución inicial y liberación de materia orgánica e hidrólisis en el biorreactor, esto sucede por la aclimatación y el establecimiento de microorganismos, comienza la biodegradación de la materia orgánica.

Posteriormente comienza la reducción de la concentración de la DBO_5 y DQO de forma rápida llegando a una concentración al final de la investigación en el biorreactor 1 de 60,0 mg/L y 20232,8 mg/L, biorreactor 2 de 97,0 mg/L y 14864,9 mg/L, mientras en el biorreactor 3 de 63.2 mg/L y 2725.2 mg/L, respectivamente. Cabe precisar que He et al. (2012), mencionaron que las propiedades del lixiviado no son estables por lo que los parámetros disminuyen con fluctuación, además este proceso de recirculación generó que la materia orgánica esté en un estado de sobre nutrición, por lo que los microorganismos descomponen con mayor velocidad. Posteriormente a partir de la semana 15 de operación se observa una disminución gradual de la DQO, que de acuerdo con Luo et al., (2019) se podría desarrollarse por los microorganismos que se

adaptaron gradualmente a las condiciones del reactor y la tasa de disolución de los compuestos orgánicos es más lenta que la tasa de degradación microbiana.

Además, se observa que en las primeras 6 semanas presentó valores ratio de DBO_5/DQO en el rango de 0,029 y 0,050 mientras en las posteriores semanas se registró la disminución de los valores en el rango de 0,003 a 0,023. Acorde a. Jokela et al. (2002), menciona que generalmente la DBO_5/DQO de los lixiviados jóvenes es mayor de los derivados de la estabilización, mientras los valores bajos de la relación DBO_5/DQO indica que los lixiviados son estable y dificultan para ser degradados de forma biológica.

Los resultados determinados se encuentran en consonancia con previas investigaciones de Aziz et al. (2010) presentando valores de DBO_5 en el rango de 67 mg/L a 93 mg/L con promedio de 83 mg/L y DQO 600 mg/L a 1300 mg/L, además Ahmadifar et al. (2016) determinó que la DQO comenzó a reducirse a un ritmo constante desde 56000 mg/L el día 7 hasta 5400 mg/L el día 109 (eliminación del 90 % en comparación con la DQO máxima), y a 3550 mg/L el día 160 a un ritmo más lento (eliminación total del 93 % en comparación con la DQO máxima). En el caso de Lavagnolo et al. (2018), presentó valores de inicio entre 30000 mg/L y 40000 mg/L, reduciendo su valor a 305 mg/L y 370 mg/L a los 190 días, posteriormente el valor permaneció constante. He et al. (2012) presentó en la etapa inicial una concentración de DQO sobre los 20000 mg/L y presentó una reducción hasta llegar a 1000-1500 mg/L a los 150 días. (Aghamohammad y otros, 2007) registro DBO_5 en el rango de 252 mg/L a 730 mg/L y Olisa et al. (2016) en el rango de 297 mg/L a 318 mg/L.

Asimismo, se comparó con estudios especializados realizados por el OEFA en los rellenos sanitarios ubicados en Lima: El Zapallal en el 2021 presentó lixiviados con concentraciones de DQO desde 10564 mg/L hasta 59816 mg/L y DBO_5 desde 646 mg/L hasta 30225 mg/L, Portillo Grande para el 2022 presentó DQO desde 8203 mg/L hasta 112580 mg/L y DBO_5 3015 mg/L hasta 48300 mg/L y Huaycoloro para el 2020 presentó

con DQO desde 3158 mg/L hasta 11392 mg/L. y DBO₅ desde 2020 mg/L hasta 86160. Además, se muestreó los lixiviados del relleno sanitario de Chancay en junio de 2024 obteniendo una concentración de DQO de 14801.4 mg/L, presentando valor dentro del rango obtenido en la investigación. Mientras el DBO₅ registró 3110.0 mg/L, presentando valor superior a lo obtenido en la investigación. Cabe precisar que los rellenos sanitarios mencionados se desarrollan de forma anaeróbica.

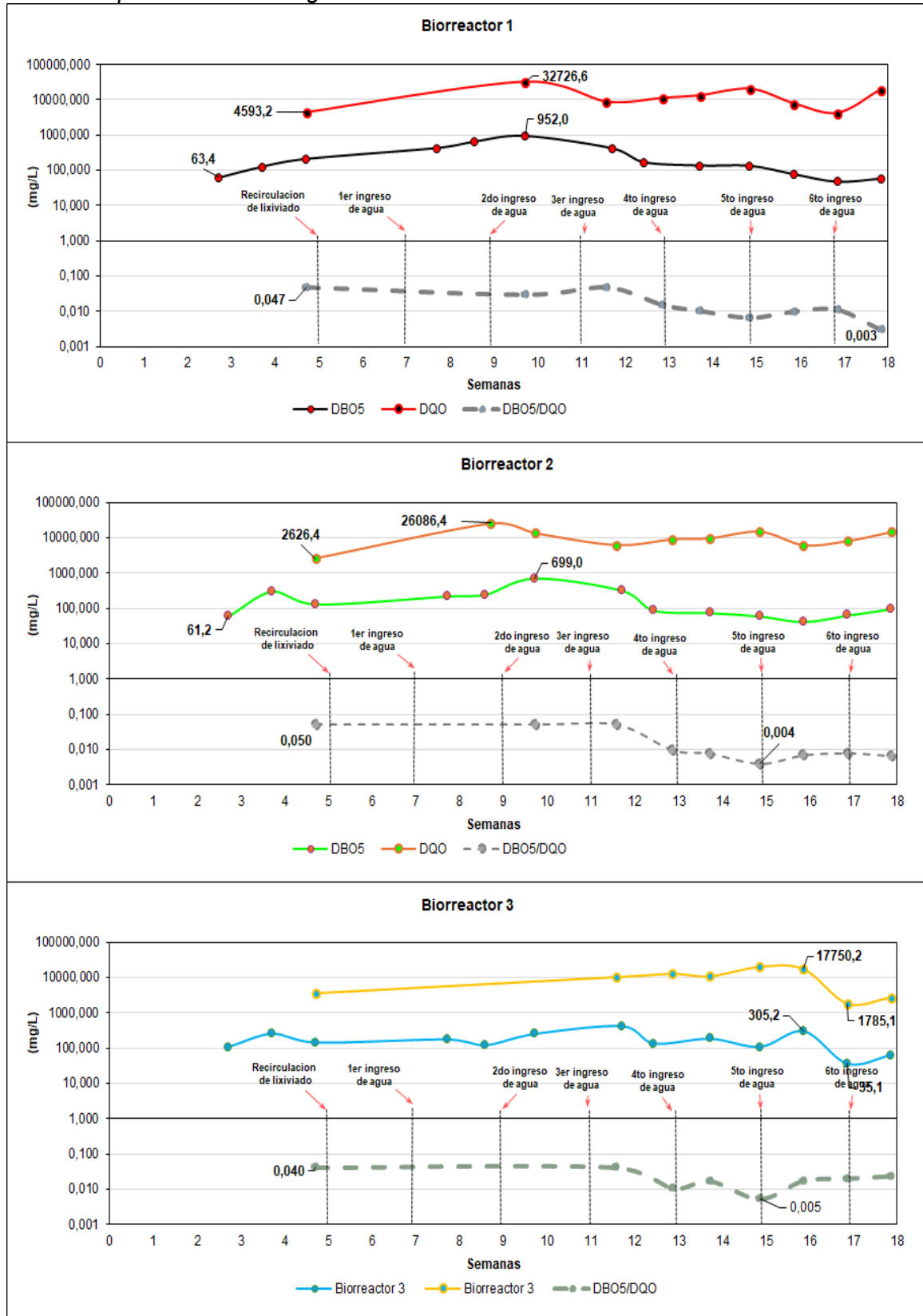
La relación DBO₅/DQO obtenida en este estudio concuerda con los resultados de Olisa et al. (2016), quienes reportaron valores de 0.020 a 0.021 para lixiviados con alta concentración de compuestos orgánicos no biodegradables. Estos valores sugieren una mayor resistencia a la degradación biológica. Sin embargo, se observaron variaciones al comparar con otras investigaciones. Aziz et al. (2010) registraron valores de DBO₅/DQO entre 0.051 y 0.12, mientras que Aghamohammad et al. (2007) reportaron un rango de 0.09 a 0.29.

Asimismo, según datos de la OEFA, en el relleno sanitario Portillo Grande durante 2022, la mayoría de los puntos de muestreo presentaron una relación DBO₅/DQO de 0.42 a 0.64, indicativa de una fase ácida. No obstante, un punto de muestreo mostró un valor de 0.24, correspondiente a la fase metanogénica. De manera similar, en el relleno sanitario Zapallal durante 2021, tres de los cinco puntos de muestreo mostraron valores entre 0.390 y 0.505, característicos de la fase ácida, mientras que los otros dos registraron valores de 0.061 y 0.086, correspondientes a la fase metanogénica. Estos resultados evidencian que, a lo largo de la vida útil de un relleno sanitario, pueden coexistir diferentes etapas de estabilización.

Se determinó que no existen diferencias significativas en la DQO y DBO₅ de los biorreactores, este hallazgo fue realizado mediante el análisis ANOVA con DQO con $F(2,24) = 0.549$, $p = 0.05$ y DBO₅ con $F(2,36) = 0.862$, $p = 0.05$.

Figura 20

Comparación DBO5, DQO y ratio DBO5/DQO de los lixiviados de los 3 biorreactores durante el proceso de investigación



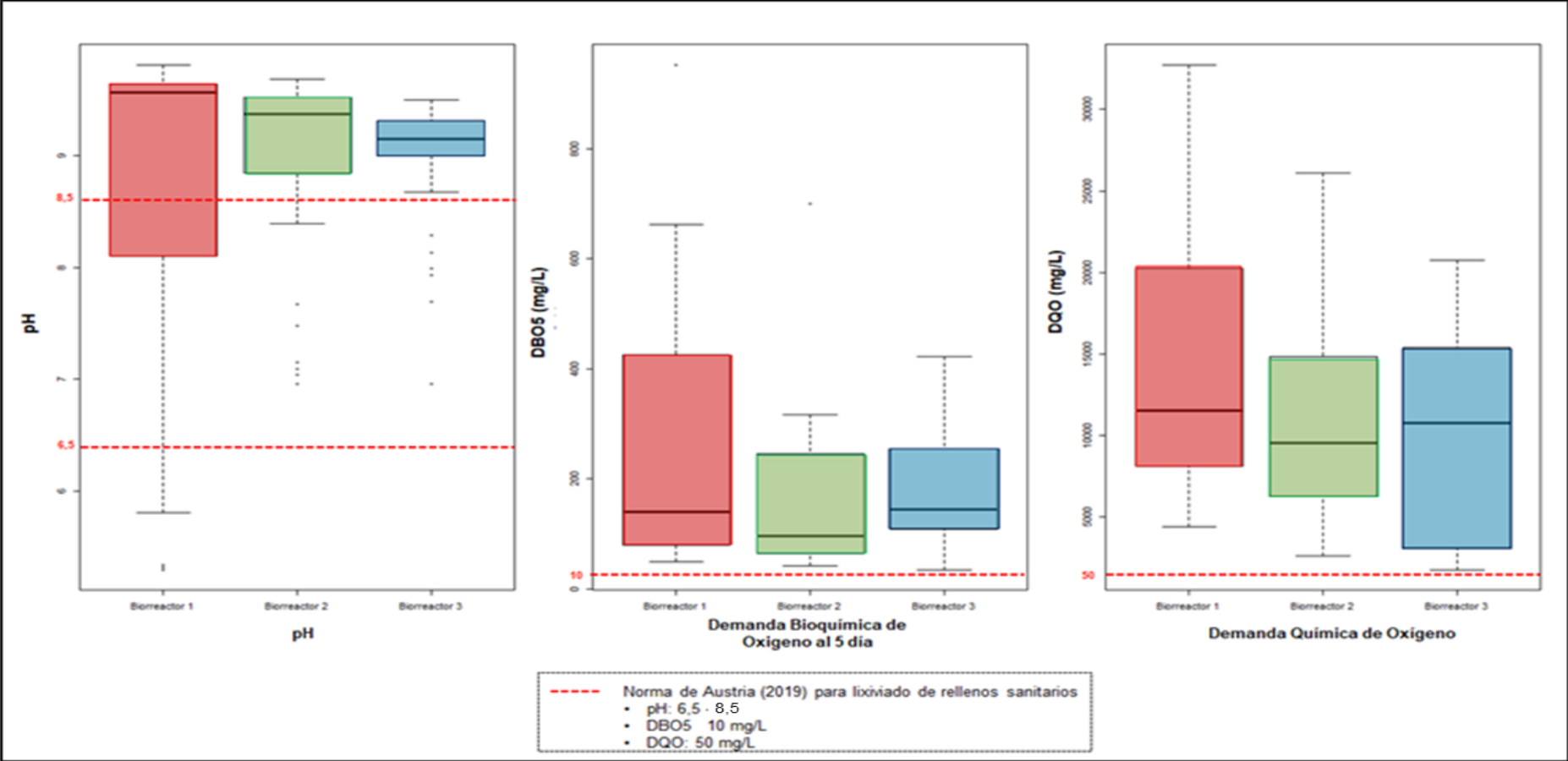
4.2.1 Comparación con la normativa

Los resultados de los diferentes parámetros analizados en los lixiviados de los biorreactores han sido comparados de manera referencial con la Norma de Austria (Ordenanza del Ministerio Federal de Agricultura, Silvicultura, Medio Ambiente y Gestión del Agua sobre la limitación de los efluentes de lixiviados de rellenos sanitario) del 2019 para aguas que fluyen. Cabe precisar que, en el ámbito nacional, los lixiviados generados en los rellenos sanitarios no cuentan con normativa que regule las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos para vertimiento a un cuerpo receptor, por lo que, considerando el principio precautorio para advertir riesgos potenciales al ambiente y salud humana, se utilizara la normativa mencionada.

De la Figura 21, se observa que los parámetros que superan referencialmente la norma de Austria en los 3 biorreactores son Demanda Bioquímica de Oxígeno al 5 día (10 mg/L) y Demanda Química de Oxígeno (50 mg/L) tanto en la fase acidogénica como en la fase metanogénica de la investigación. Cabe resaltar que el pH supera la normativa en la etapa inicial de la fase acidogénica, al presentar valores menores a 6.5 y en la etapa final de la fase metanogénica al presentar valores mayores a 8.5. Por lo que, de acuerdo con los resultados obtenidos en los parámetros de interés, se debe contar con un sistema tratamiento de los lixiviados para cumplir con la normativa mencionada previo a la descarga a un cuerpo receptor, a fin de evitar daños a la salud, bienestar humano y medio ambiente.

Figura 21

Comparación de pH, DBO₅ y DQO de los lixiviados de los 3 biorreactores con la norma de Austria (2019)



4.2.2 Contratación de la hipótesis

Acorde a los resultados obtenidos, se procedió a usar el programa estadístico Statics Direct, para aplicar la correlación Pearson para la variable de turbiedad de los lixiviados, el cual se presenta como el único parámetro que presentó diferencias significativas entre los biorreactores con diferentes porcentajes de residuos de aprovechamiento. En la Tabla 14 se presenta la tabla de correlación.

Tabla 14

Tabla de correlación de la variable composición de residuos sólidos y composición de lixiviados

		Composición de residuos sólidos municipales	Composición de lixiviados (turbiedad)
Composición	Correlación de Pearson	1	0.997**
Residuos sólidos	Sig. (bilateral)		,000
Composición	Correlación de Pearson	-0.895	1
Lixiviados (Turbiedad)	Sig. (bilateral)	,000	

** . La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

Acorde las hipótesis:

H_g : Existe relación significativa entre la composición de los residuos municipales en la composición de lixiviados con el método de biorreactores semiaerobios.

H_0 : No existe relación significativa entre la composición de los residuos municipales en la composición de lixiviados con el método de biorreactores semiaerobios.

H_1 : Existe relación significativa entre la composición de los residuos municipales en la composición de lixiviados con el método de biorreactores semiaerobios.

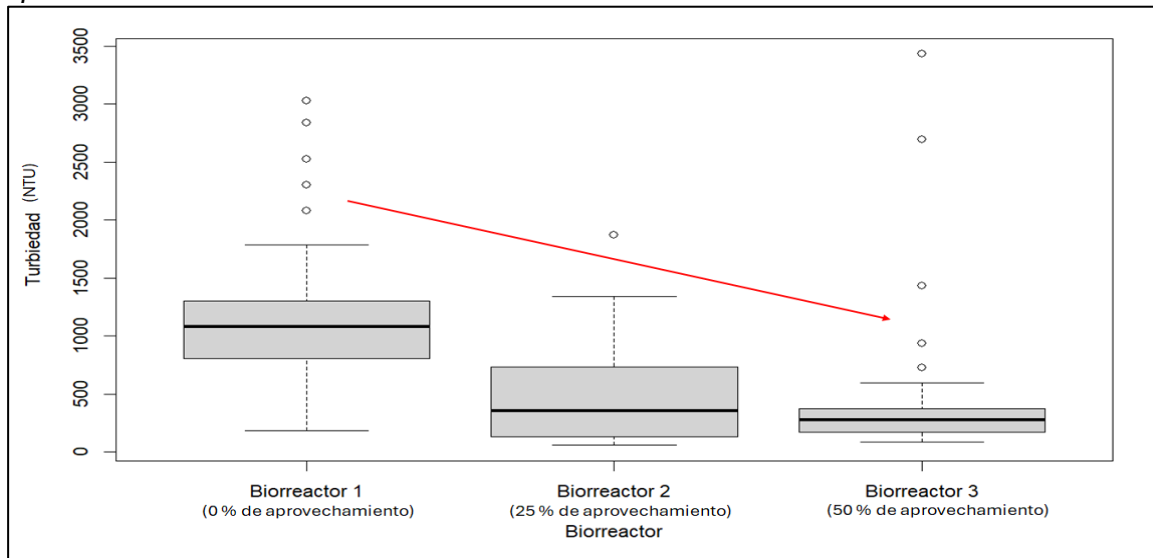
Interpretación:

Los resultados obtenidos, a partir del coeficiente de correlación de Pearson con un valor de significancia de 0.01, fue de -0.895, lo que indica una correlación negativa muy fuerte, por lo cual, se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula. Esto significa que los

biorreactores con menor aprovechamiento de residuos sólidos presentaron una mayor concentración de turbiedad, un hallazgo que se presenta en la Figura 22.

Figura 22

Diagrama de cajas y bigotes de la turbiedad del lixiviado de acuerdo con los porcentajes de aprovechamiento de los residuos sólidos



Cabe precisar que, en cuanto a los demás parámetros evaluados en los lixiviados (pH, conductividad eléctrica, sólidos totales, sólidos volátiles, DBO₅ y DQO), la ausencia de diferencias significativas entre los tres biorreactores llevó a la decisión de no aplicar el método estadístico de correlación, debido a que la falta de dispersión o variación en los datos impide la identificación de patrones o asociaciones significativas entre ellos.

Esta condición podría deberse a la influencia predominante del volumen de los residuos sólidos inorgánicos en cada biorreactor, a pesar de su menor peso en comparación con los residuos orgánicos. Esto concuerda con Pohland et al. (1993), quienes señalan que el volumen de los residuos inorgánicos en los rellenos puede inhibir la estabilización de contaminantes prioritarios (orgánicos e inorgánicos), especialmente bajo condiciones de lixiviación de un solo paso.

Conclusiones

La presente investigación tuvo como objetivo general evaluar la influencia de la composición de los residuos sólidos municipales en la generación de lixiviados utilizando el método de biorreactores semiaeróbicos. Para ello, la población de estudio se determinó de acuerdo con la generación de residuos sólidos de la Municipalidad Metropolitana de Lima, con el propósito de ingresar dichos residuos en los biorreactores de manera proporcional a las condiciones locales de generación y plantear variaciones de acuerdo con diferentes escenarios de aprovechamiento del 0%, 25% y 50% tanto de residuos orgánicos como inorgánicos.

Durante el período 2019 a 2022, la composición de residuos sólidos generados en la Municipalidad Metropolitana de Lima estuvo conformada por un 78.4 % de residuos sólidos aprovechables, de los cuales el 56.5 % correspondió a residuos orgánicos (como restos de alimentos, maleza, poda y otros materiales orgánicos) y el 21.9 % a residuos inorgánicos (papel, cartón, vidrio, plásticos y metales). Asimismo, se registró 21.6 % de residuos sólidos no aprovechables, que incluyeron los residuos inorgánicos conformado por bolsas plásticas, papel higiénico, pilas, tecnopor, textiles, caucho, entre otros.

Las características fisicoquímicas de los residuos sólidos ingresados en los biorreactores semiaerobios registraron, en promedio, una humedad inicial del 30,4 %. Sin embargo, esta humedad no alcanzó los valores típicos registrados en los rellenos sanitarios de países con ingresos bajos y medianos. Por ello, se realizó la adición agua destilada hasta lograr niveles de humedad en el biorreactor 1, biorreactor 2 y biorreactor 3 de 61.2 %, 64.0 % y 63.5 %, respectivamente, y con respecto sólidos volátiles registraron 57.3 %, 55.6 % y 52.5 %, respectivamente. Además, los biorreactores presentaron pesos de 47.11 kg, 35.58 kg y 26.05 kg, con volúmenes de 130.0 L, 121.6 L y 107.4 L, respectivamente, lo que resultó en densidades de compactación de 362 kg/m³, 300 kg/m³ y 242 kg/m³.

Las características fisicoquímicas de los lixiviados en los parámetros pH, turbiedad, conductividad eléctrica, sólidos totales y sólidos volátiles en los 3 biorreactores mostraron variabilidad durante el periodo de investigación de 4 meses, registrándose características desde la fase de acidogénesis hasta la metanogénesis, permitiendo evaluar todo el ciclo de vida útil en los rellenos sanitarios. Se determinó que no existen diferencias significativas entre las composiciones en los lixiviados de los biorreactores a diferente porcentaje de segregación de residuos en los parámetros pH, conductividad eléctrica, sólidos totales y sólidos volátiles. Esta condición podría estar asociada a la influencia de los residuos sólidos inorgánicos, los cuales se presentan en volúmenes mayores y presentan propiedades de alta estabilidad frente a la degradación, lo que dificulta la biodegradación natural en un relleno. En el caso del parámetro turbiedad se determinó que existe diferencias significativas entre los biorreactores.

Las características fisicoquímicas de los lixiviados en los parámetros de DBO₅ y DQO de los tres biorreactores se determinó que no existen diferencias significativas entre ellos. En promedio, las concentraciones de DBO₅ fueron de 271.3 mg/L en el biorreactor 1, 186.2 mg/L en el biorreactor 2 y 178.3 mg/L en el biorreactor 3; en cuanto a la DQO, se registraron valores promedio de 13919.7 mg/L en el biorreactor 1, 11256.72 mg/L en el biorreactor 2 y 10150.41 mg/L en el biorreactor 3; obteniendo que el lixiviado con menor proporción de aprovechamiento de residuos sólidos presentó la mayor concentración de DBO₅ y DQO. Por otro lado, la relación DBO₅/DQO presentó valores que oscilaron entre 0.003 y 0.050, lo que evidencia una alta resistencia a la degradación biológica en los lixiviados, debido a las bajas concentraciones de materia orgánica biodegradable presentes en el lixiviado.

Para determinar la influencia de la composición de los residuos sólidos municipales en la generación de lixiviados utilizando el método de biorreactores semiaeróbicos, se presentó que parámetro de turbiedad fue el único parámetro con diferencias significativas entre los biorreactores evaluados, permitiendo determinar entre ambas variables una correlación fuerte

negativa ($r=-0.895$, $p<0.01$), indicando que un menor porcentaje de aprovechamiento de los residuos sólidos se asocia con un incremento en la turbiedad de los lixiviados.

La investigación con los biorreactores semiaerobios permitió comprender el comportamiento de los subproductos asociados a los rellenos sanitarios a escala piloto, teniendo en cuenta los factores específicos de cada localidad, como las condiciones climáticas, y la variación en la composición de los residuos sólidos que depende de su gestión municipal como de otros factores propios de generación o consumo de la población.

Recomendaciones

Los lixiviados de los rellenos sanitarios semiaerobios presentan una amplia variedad de parámetros relevantes que requieren su evaluación adicional como la demanda bioquímica de oxígeno al quinto día (DBO_5) tanto en su forma soluble como suspendida, nitrógeno total con énfasis en el nitrógeno amoniacal, metales, aniones (como cloruros, nitratos y sulfatos) y cationes (como calcio, magnesio, sodio y potasio). Estos parámetros son específicos de la composición de los residuos y de la fase de estabilización predominante de los lixiviados, por lo que su monitoreo es fundamental para una gestión eficiente y sostenible.

Los rellenos sanitarios semiaerobios generan subproductos adicionales, como gases o emisiones resultantes de la descomposición de los residuos sólidos. Por ello, es fundamental incluir en su evaluación parámetros clave como la temperatura, el dióxido de carbono (CO_2), el oxígeno (O_2) y el metano (CH_4), ya que estos indicadores permiten un mejor monitoreo de los procesos de degradación y de las condiciones ambientales dentro del relleno.

La evaluación de los rellenos sanitarios semiaerobios debería llevarse a cabo en diversas regiones del país, debido a las diferencias en las condiciones climáticas y la composición de los residuos sólidos. Esto permitiría obtener una comprensión más amplia de los alcances y la efectividad de esta tecnología en distintos contextos locales.

El resultado de la presente investigación está dirigido a investigadores, técnicos y funcionario públicos especializados en la gestión integral de los residuos sólidos; con el fin de contribuir con información de la tecnología de rellenos sanitarios semiaerobios como una alternativa de disposición final con menor impacto ambiental teniendo en cuenta las condiciones locales.

Referencias bibliográficas

- Abarca, L., Maas, G., y Hogland, W. (2013). *Solid waste management challenges for cities in developing countries*. *Waste Management*, 33, 220-232. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.008>
- Aghamohammad, N., Hamidi, A., Hasnain, I., Zinatizadeh, A., Nasr, E., y Ghafari, S. (2007). *Performance of a powdered activated carbon (PAC) augmented activated sludge process treating semi-aerobic leachate*. *International Journal of Environmental Research*, 1(2), 96-103. 10.22059/ijer.2010.115
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (2014). *Municipal Solid Waste Landfills Economic Impact Analysis for the Proposed New Subpart to the New Source Performance Standards*. U.S. Environmental Protection Agency
- Ahmadifar, M., Sartaj, M., y Abdallah, M. (2016). *Investigating the performance of aerobic, semi-aerobic, and anaerobic bioreactor landfills for MSW management in developing countries*. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 18, 703-714. <https://doi.org/10.1007/s10163-015-0372-0>
- Amaya, E. (2019). *Manual Ingeniería Sanitaria*.
- Azis, S., Aziz, H., Yusoff, M., Bashir, M., y Umar, M. (2010). *Leachate characterization in semi-aerobic and anaerobic sanitary landfills: a comparative study*. *Journal of Environmental Management*, 91(12), 2608-2614. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.07.042>
- Banco Mundial (2012). *What a waste: A global Review of Solid Waste Management*. World Bank. 17
- Calace, N. (2001). *Municipal landfill leachate-soil interactions: a kinetic approach*. *Chemosphere*, 44(5), 1025-1031. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(00\)00372-6](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00372-6)

- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (2002). *Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (1997). *Guía para el manejo de residuos sólidos en ciudades pequeñas y zonas rurales*. Lima.
- Cerminara, G. (2014). *Nitrogen mass balance and biogas production in innovative semiaerobic-anaerobic-aerobic (S.An.A.) landfill*. (Tesis de maestría, University of Padua).
- Christensen, T., Cossu, R., y Stegmann, R. (1992). *Landfilling of waste: leachate*. CRC Press.
- Chong, T. L., Matsufuji, Y., & Hassan, M. N. (2005). *Implementation of the semi-aerobic landfill system (Fukuoka method) in developing countries: A Malaysia cost analysis*. *Waste Management*, 25(7), 702-711.
- Cointreau, S. (1982). *Environmental management of urban solid waste in developing countries: a project guide*. The World Bank.
- Cossu, R., y Stegmann, R. (2018). *Solid Waste Landfilling: Concepts, Processes, Technology*. Elsevier.
- Costa, M. (2014). *Carbon Mass balance in the first phase of a semiaerobic-Anaerobic-Aerated (S.An.A) landfill mode* (Tesis de maestría, University of Padua).
- Dos Muchangos, L., y Tokai, A. (2020). *Greenhouse gas emission analysis of upgrading from an open dump to a semi-aerobic landfill in Mozambique—the case of Hulene dumpsite*. *Scientific African*, e00638. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00638>
- Eck, C. (2000). *Effects of Moisture Content in Solid Waste Landfills*. Theses and Dissertations.

- Erses A., Onay T. y Yenigun, O. (2008). *Comparison of aerobic and anaerobic degradation of municipal solid waste in bioreactor landfills*. *Bioresource Technology*, 99(13), 5418-5426. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.11.008>
- Fukuoka City Environmental Bureau Japan. (2013). *The Fukuoka Method: What is the semi-aerobic landfill?* Fukuoka University.
- Gallegos, K., y Nieto, P. (2023). *Propuesta de disposición final de residuos sólidos basado en el método Fukuoka para el relleno sanitario de Chancay, provincia de Huaral - departamento de Lima* (Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos).
- Gómez, M., Corona, F., y Dolores, M. (2019). *Variations in the properties of leachate according to landfill age*. *Desalination and Water Treatment*, 159, 24-31. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24106>
- González-Torre, P., y Adenso-Díaz, B. (2005). *Influence of distance on the motivation and frequency of household recycling*. *Waste Management*, 25(1), 15-23. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.08.007>
- Grossuele, V., y Lavagnolo, M. (2020). *Lab tests on semi-aerobic landfilling of MSW under varying conditions of water availability and putrescible waste content*. *Journal of Environmental Management*, 256, 109995. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109995>
- HACH, C. (2023). *Certificate of Analysis BOD Nutrient Buffer Pillows Lot A330*.
- Han, Z., Zeng, D., Mou, Z., Shi, G., Zhang, Y., y Lou, Z. (2019). *A novel spatiotemporally anaerobic/semi-aerobic bioreactor for domestic solid waste treatment in rural areas*. *Waste Management*, 86, 97-105. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.034>
- He, Y., Guo, L., y Gao, J. (2012). *The Advantages and Mechanism of Semi-aerobic Landfill*. *Energy Procedia*, 17, 391-396. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.02.111>

- Huang, Q., Yufei, Y., Xiangrui, P., y Qi, W. (2008). *Evolution on qualities of leachate and landfill gas in the semi-aerobic landfill*. *Journal of Environmental Sciences*, 20(4), 499-504. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)62086-0](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)62086-0)
- Huy, V., y Kohata, Y. (2020). *The elevated temperature and gas component within an operating semi-aerobic landfill*. *Detritus*, 147. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2020.13945>
- Jiang, G., Liu, D., Chen, W., Ye, Z., Liu, H., y Li, Q. (2017). *Impact of vent pipe diameter on characteristics of waste degradation in semi-aerobic bioreactor landfill*. *Waste Management Research*, 35(10), 1064-1071. <https://doi.org/10.1177/0734242x17723979>
- Jokela, J., Kettunen, R., Sormunen, K., y Rintala, J. (2002). *Biological nitrogen removal from municipal landfill leachate: low-cost nitrification in biofilters and laboratory scale in-situ denitrification*. *Water Research*, 36(16), 4079-4087. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00129-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00129-X)
- Karthikeyan, O., y Joseph, K. (2006). *Bioreactor landfills for sustainable solid waste management*. Center for Environmental Studies.
- Kjeldsen, P., Barlaz, M., Rooker, A., Baun, A., Ledin, A., y Christensen, T. (2002). *Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review*. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 32(4), 297-336. <https://doi.org/10.1080/10643380290813462>
- Kumar, V., Ahmad Bhat, S., Kumar, S., y Verma, P. (2024). *Environmental Engineering and Waste Management: Recent Trends and Perspectives*. Springer Nature. <https://app.kortext.com/borrow/3002469>
- Lavagnolo, M. C., Grossule, V., y Raga, R. (2018). *Innovative dual-step management of semi-aerobic landfill in a tropical climate*. *Waste Management*, 74, 302-311. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.017>

- Leonard, M., Floom, K., y Brown, S. (2000). *Estimating method and use of landfill settlement. In Environmental Geotechnics* (pp. 1-15). [https://doi.org/10.1061/40519\(293\)1](https://doi.org/10.1061/40519(293)1)
- Luo, Z., Chen, W., Wen, P., Jiang, G., y Li, Q. (2019). *Impact of leachate recirculation frequency on the conversion of carbon and nitrogen in a semi-aerobic bioreactor landfill. Environmental Science and Pollution Research*, 26, 13354-13365. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04817-8>
- Ma, Y., Li, Y., y Li, Y. (2021). *Effects of leachate recirculation quantity and aeration on leachate quality and municipal solid waste stabilization in semi-aerobic landfills. Environmental Technology & Innovation*, 21, 101353. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101353>
- Matsufiji, Y., y Tachifuji, A. (2007). *The history and status of semi-aerobic landfills in Japan and Malaysia. IWWG Monograph*, 109-116.
- Matsufuji, A. (2021). *Un camino hacia el relleno sanitario semiaeróbico mediante el Método Fukuoka. NPO Solid Waste Management Advisers Network Fukuoka.*
- Matsuto, T., Zhang, X., Matsuo, T., y Yamada, S. (2015). *Onsite survey on the mechanism of passive aeration and air flow path in a semi-aerobic landfill. Waste Management*, 36, 204-212. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.007>
- Mazzi, A., Sciarrone, M., y Raga, R. (2022). *Environmental Performance of Semi-Aerobic Landfill by Means of Life Cycle Assessment Modeling. Energies*, 6306. <https://doi.org/10.3390/en15176306>
- Metcalf, L., y Eddy, H. (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Refuse*. Mc Graw Hill.
- Ministerio del Ambiente. (2011). *Guía de diseño, construcción, operación, mantenimiento y cierre de relleno sanitario manual.*
- Ministerio del Ambiente. (2016). *La Contribución Nacional del Perú-INDC: Agenda para un desarrollo climáticamente responsable.*

Ministerio del Ambiente. (2017). *Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos 2016-2024*.

Ministerio del Ambiente. (2019). *Guía para la caracterización de residuos sólidos municipales*.
Ministerio del Ambiente.

Ministerio del Ambiente. (2019). *Taller de capacitación y asistencia técnica en la formulación de proyectos de inversión pública ambientales*.
<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/351756/1.1.DGRS-Criterios tecnico LIMPIEZA PUBLICA 2019.pdf>

Ministerio del Ambiente. (2021). *Política Nacional del Ambiente al 2023- Resumen ejecutivo*.
Ministerio del Ambiente.
<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2235168/Resumen%20Ejecutivo%20PNA15.09.2021%20VF.pdf.pdf>

Ministerio del Ambiente. (2022). *La gestión de los residuos sólidos y su contribución en la lucha ante el cambio climático*.
https://www.congreso.gob.pe/Docs/comisiones2021/CE-seguimiento-cambio-climatico/files/ppt_rrss_y_cc_2023_vf_minam.pdf

Ministerio del Ambiente. (2023, 21 de noviembre). *SIGERSOL MUNICIPAL*. Lima, Perú.
<https://minam.zohosites.com/>

Ministerio del Ambiente. (2024). *Diagnóstico de la situación de las brechas de infraestructura o acceso a servicios del sector ambiente PMI 2026-2028* (p. 11).

Ministerio del Ambiente. (2024). *Resolución N.º 003-2024-OEFA/DSIS Inventario Nacional de Áreas Degradadas por Residuos Sólidos*.

Ministerio Federal de Medio Ambiente Alemania. (2019). *La Valorización de Residuos Sólidos de Ámbito Municipal Parte A: El Mapeo Institucional*. Alemania.

- Mohammad, A., Singh, D., Poslasek, A., Osinki, P., y Koda, E. (2022). *Leachate characteristics: Potential indicators for monitoring various phases of municipal solid waste decomposition in a bioreactor landfill*. *Journal of Environmental Management*, 309, 114683. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114683>
- Mukherjee, S., Mukhopadhyay, S., Hashim, M., y Sen Gupta, B. (2014). *Contemporary environmental issues of landfill leachate: assessment and remedies*. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(5), 472-590. <https://doi.org/10.1080/10643389.2013.876524>
- Oduro-Kwarteng, S., Anarfi, K., y Essandoh, H. (2016). *Source separation and recycling potential of municipal solid waste in Ghana*. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 27(2), 210-226. <https://doi.org/10.1108/MEQ-03-2015-0038>
- Olisa, E., Sapari, N., Malakahmad, A., Ezechi, E., Riahi, A., Salihi, I., y Orji, K. (2016). *Evaluation of Leachate Characteristics from Different Leachate Ponds in a Semi-aerobic Landfill*. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 22, 68-82. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.22.68>
- Omar, H. (2016). *Treatment of Landfill Waste, Leachate and Landfill Gas: Modelling/Simulation and Experimental Studies*. Electronic Thesis and Dissertation Repository.
- Pohland, F., Cross, W., Gould, J., y Reinhart, D. (1993). *Behavior and assimilation of organic and inorganic priority pollutants codisposed with municipal refuse. Volume 2. Appendices. Final report* (No. PB-93-222206/XAB). Pittsburgh Univ., PA (United States). Dept. of Civil Engineering.
- Quang, V. (2020). *Study on Elevated Temperature and Gas Component within an Operating Semi-Aerobic Landfill*. (Doctoral dissertation, Muroran Institute of Technology). <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2020.13945>

- Rangga, J., Syed Ismail, S., Rasdi, I., y Karuppiah, K. (2024). *Estimation of Leachate Volume and Treatment Cost Avoidance Through Waste Segregation Programme in Malaysia. Pertanika Journal of Science & Technology*, 32(1), 341.
<https://doi.org/10.47836/pjst.32.1.19>
- Ritzkowski, M., y Stegmann, R. (2012). *Landfill aeration worldwide: concepts, indications and findings. Waste Management*, 32(7), 1411-1419.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.02.020>
- Sang, Y., Chen, J., Liang, C., Gu, Q., & Li, F. (2009, June). *Characterization and flocculation treatment of organic substances present in landfill leachate. In 2009 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering* (pp. 1-4). IEEE.
- Scheinberg, A., Wilson, D., y Rodic, L. (2010). *Solid waste management in the World's Cities. UN-Habitat's Third Global Report on the State of Water and Sanitation in the World's Cities*.
- Schübeler, P. (1997). *Reports and reviews: International report: A conceptual framework for municipal solid waste management in developing countries. Waste Management & Research*, 15(4), 437-446.
- Segura, A., Rojas, L., y Pulido, Y. (2020). *Referentes mundiales en sistemas de gestión de residuos sólidos. Revista Espacios*, 41(17), 1-9.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2021). *CLIMAS DEL PERÚ – Mapa de Clasificación Climática Nacional*.
- Smårs, S., Gustafsson, L., Beck-Friis, B., y Jönsson, H. (2002). *Improvement of the composting time for household waste during an initial low pH phase by mesophilic temperature control. Bioresource Technology*, 84(3), 237-241.
[https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00056-1](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00056-1)

- Sutthasil, N., Chiemchaisri, C., Chiemchaisri, W., Wangyao, K., Towprayoon, S., Endo, K., y Yamada, M. (2014). *Comparison of Solid Waste Stabilization and Methane Emission from Anaerobic and Semi-Aerobic Landfills Operated in Tropical Condition. Environmental Engineering Research*, 261-268.
- Tchobanoglous, G., Hilary, T., y Samuel, A. (1993). *Integrated Solid Waste Management-Engineering Principles and Management Issues*. Tata McGraw Hill International Editions.
- Tepordei, C. (2014). *S.A.N.A. Hybrid Landfill: Nitrogen Emissions in lab- scale simulation reactors during the final aerobic step*. <https://hdl.handle.net/20.500.12608/20215>
- Valverde, Y. (2021). *Análisis de la Implementación del Método Fukuoka en el Proyecto de Relleno Sanitario Mariscal Castilla–Alto Utcubamba, Provincia de Luya y Chachapoyas, Amazonas, Perú*. (Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas).
- Warith, M. (2002). *Bioreactor landfills: experimental and field results*. *Waste Management*, 22(1), 7-17. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(01\)00014-9](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(01)00014-9)
- Wu, X., Yue, B., Huang, Q., Wang, Q., Lin, Y., Zhang, W., y Yan, Z. (2017). *Spatio-temporal variation of landfill gas in pilot-scale semi-aerobic and anaerobic landfills over 5 years*. *Journal of Environmental Sciences*, 54, 288-297. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.09.015>
- Yang, L., Li, Z., y Fu, H. (2011). *Model of municipal solid waste source separation activity: A case study of Beijing*. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 61(2), 157-163. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.61.2.157>
- Yesiller, N., y Hanson, J. (2003). *Analysis of temperatures at a municipal solid waste landfill. Sardinia 2003, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium*, 1-10. https://digitalcommons.calpoly.edu/cenv_fac/164

Zhang, X., Jiang, C., Shan, Y., Zhang, X., y Zhao, Y. (2019). *Influence of the void fraction and vertical gas vents on the waste decomposition in semi-aerobic landfill: Lab-scale tests. Waste Management, 100*, 28-35. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.08.039>

Zhang, X., Wang, J., Bao, S., y Zhang, X. (2021). *Impact of internal conditions on the gas flow path in semi-aerobic landfill reactors. Science of the Total Environment, 770*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144673>

Anexos

Anexo 1 Composición de Residuos sólidos generados por año de la Municipalidad Metropolitana de Lima durante el periodo 2019 al 2022	1
Anexo 2 Informes de ensayo	3
Anexo 3 Solicitud de información de estudios especializados realizado por el OEFA - Carta N.º 01558-2023-RAI	34

Anexo 1

Composición de Residuos sólidos generados por año de la Municipalidad Metropolitana de Lima durante el periodo 2019 al 2022

Generación de residuos sólidos municipales (kg)						Porcentaje
Tipo de residuos solidos	2019	2020	2021	2022	Promedio	
Residuos aprovechables						
Residuos Orgánicos						
Residuos de alimentos	1131635,02	1156153,1	1280288,23	1280288,23	1212091,145	51,934%
Residuos de maleza y poda	66274,8	56069,32	61895,06	61895,06	61533,56	2,636%
Otros residuos orgánicos	69277,45	34844,43	39053,47	39053,47	45557,205	1,952%
Residuos Inorgánicos						
Papel						
Blanco	40965,7	40815,53	43914,7	43914,7	42402,6575	1,817%
Periódico	48202,48	42574,65	40800,9	40800,9	43094,7325	1,846%
Mixto	53850,22	35494,57	37288,51	37288,51	40980,4525	1,756%
Cartón						
Blanco (liso y cartulina)	23508,07	22946,11	24888,23	24888,23	24057,66	1,031%
Marrón (Corrugado)	29869,13	39576,61	37819,17	37819,17	36271,02	1,554%
Mixto	38112,83	32116,64	32633	32633	33873,8675	1,451%
Vidrio						
Transparente	37800,71	34884,76	37805,14	37805,14	37073,9375	1,588%
Otros colores (marrón - ámbar, verde, azul, entre otros)	24037,21	30497,62	29805,56	29805,56	28536,4875	1,223%
Otros (vidrio de ventana)	7323,96	6388,47	7225,8	7225,8	7041,0075	0,302%
Plástico						
Tereftalato de polietileno	44657,11	50194,85	55497,96	55497,96	51461,97	2,205%
Polietileno de alta densidad	32883,19	36617,33	37240,59	37240,59	35995,425	1,542%
Polipropileno	15314,93	15170,71	14138,35	14138,35	14690,585	0,629%
Poliestireno	15561,24	11716,51	10671,56	10671,56	12155,2175	0,521%
Policloruro de vinilo	4833,59	4386,41	3678,35	3678,35	4144,175	0,178%
Tetra brik (envases multicapa)	14364,56	12750,94	11658,06	11658,06	12607,905	0,540%
Polietileno de baja densidad	23649,49	27628,45	26982,8	26982,8	26310,885	1,127%
Metales						
Lata (Hojalata)	32260,68	37841,76	39745,43	39745,43	37398,325	1,602%
Acero	4776,38	5064,81	5293,7	5293,7	5107,1475	0,219%
Fierro	6890,74	8302,85	7105,41	7105,41	7351,1025	0,315%
Aluminio	5009,06	5072,05	4626,29	4626,29	4833,4225	0,207%
Otros Metales	4860,84	4037,73	4629,79	4629,79	4539,5375	0,195%

Generación de residuos sólidos municipales (kg)						Porcentaje
Tipo de residuos solidos	2019	2020	2021	2022	Promedio	
Residuos no aprovechables						
Bolsas plásticas	79378,62	84001,54	88934,55	88934,55	85312,315	3,655%
Papel higiénico/Pañales/toallas sanitarias	223991,29	246529,57	261251,06	261251,06	248255,745	10,637%
Pilas	6423,72	4020,58	4175,11	4175,11	4698,63	0,201%
Tecnopor (poliestireno expandido)	16330,15	18625,07	19384,72	19384,72	18431,165	0,790%
Residuos inertes (tierra, piedras, cerámicos, ladrillos, otros)	96687,24	124368	63944,63	63944,63	87236,125	3,738%
Textiles (telas)	-	-	29225,82	29225,82	14612,91	0,626%
Caucho, cuero, jebe	-	-	11037,41	11037,41	5518,705	0,236%
Restos de medicamentos	-	-	7077,36	7077,36	3538,68	0,152%
Envolturas de snacks, galletas, caramelos, entre otros	-	-	21282,34	21282,34	10641,17	0,456%
Otros residuos no categorizados	-	-	53138,65	53138,65	26569,325	1,138%

Nota: Obtenido del Sigersol MINAM.

(-): No presenta datos de generación de residuos solidos.

Anexo 2

Informes de ensayo

**INFORME DE ENSAYO
MA2410466-AC-0**

REYES CASTILLO BIANCA GABRIELA

JR IGNACIO TOROTE 600. - LIMA - LIMA - LIMA

ENV / LB-353734-002

PROCEDENCIA : UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Fecha de Recepción SGS : 04-04-2024
Fecha de Ejecución : Del 04-04-2024 al 10-04-2024
Muestreo Realizado Por : CLIENTE
Observación : TESIS FIA - UNI

Estación de Muestreo
LIX-1
LIX-2
LIX-3

Emitido por SGS del Perú S.A.C.

Impreso el 10/04/2024



Frank M. Julcamoro Quispe
C.Q.P. 1033
Supervisor de Laboratorio

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL-DA, se encuentra dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 1 de 5





INFORME DE ENSAYO
MA2410466-AC-0

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					LIX-1	LIX-2
FECHA DE MUESTREO					8670149N / 277015E	8670148N / 277016E
HORA DE MUESTREO					03/04/2024	03/04/2024
CATEGORIA					10:00:00	10:10:00
SUB CATEGORIA					AGUA DE PROCESO	AGUA DE PROCESO
					AGUA DE LIXIVIACIÓN	AGUA DE LIXIVIACIÓN
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre	Resultado ± Incertidumbre
Análisis Generales						
Demanda Química de Oxígeno	EW_APHA5220D	mgO ₂ /L	1.8	4.5	9,079.4 ± 454.0	6,301.4 ± 315.10

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					LIX-3	LIX-1
FECHA DE MUESTREO					8670196N / 277015E	8670149N / 277015E
HORA DE MUESTREO					03/04/2024	21/03/2024
CATEGORIA					10:20:00	13:00:00
SUB CATEGORIA					AGUA DE PROCESO	AGUA DE PROCESO
					AGUA DE LIXIVIACIÓN	AGUA DE LIXIVIACIÓN
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre	Resultado ± Incertidumbre
Análisis Generales						
Demanda Química de Oxígeno	EW_APHA5220D	mgO ₂ /L	1.8	4.5	10,485.4 ± 524.30	32,726.6 ± 1,636.30

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					LIX-2	LIX-2
FECHA DE MUESTREO					8670148N / 277016E	8670148N / 277016E
HORA DE MUESTREO					21/03/2024	14/03/2024
CATEGORIA					13:15:00	15:50:00
SUB CATEGORIA					AGUA DE PROCESO	AGUA DE PROCESO
					AGUA DE LIXIVIACIÓN	AGUA DE LIXIVIACIÓN
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre	Resultado ± Incertidumbre
Análisis Generales						
Demanda Química de Oxígeno	EW_APHA5220D	mgO ₂ /L	1.8	4.5	13,941.0 ± 697.10	26,086.4 ± 1,304.30



**INFORME DE ENSAYO
MA2410466-AC-0**

CONTROL DE CALIDAD

LC: Límite de cuantificación
MB: Blanco del proceso.
LCS %Recovery: Porcentaje de recuperación del patrón de proceso.
MS %Recovery: Porcentaje de recuperación de la muestra adicionada.
MSD %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados de la muestra adicionada.
Dup %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados del proceso.

Parámetro	Unidad	LC	MB	LCS %Recovery	MS %Recovery	MSD %RPD
Demanda Química de Oxígeno	mgO ₂ /L	4.5	<4.5	99 - 101%	98%	3%



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO
MA2410466-AC-0**

REFERENCIAS DE MÉTODOS DE ENSAYO

Referencia	Sede	Parámetro	Método de Ensayo
EW_APHA5220D	Callao	Demanda Química de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D: 23rd Ed: 2017. Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method. (VALIDADO - Aplicado fuera del alcance) 2017

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 4 de 5



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



INFORME DE ENSAYO
MA2410466-AC-0

NOTAS

- El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.
- Las muestras recibidas cumplen con las condiciones necesarias para la realización de los análisis solicitados.
- La incertidumbre expandida de medición reportada se ha obtenido multiplicando la incertidumbre estándar combinada por el factor de cobertura $k=2$, de modo que la probabilidad de cobertura corresponde aproximadamente a un nivel de confianza del 95%.

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL-DA, se encuentra dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

Este documento es emitido bajo las Condiciones Generales de Servicio de SGS del Perú S.A.C, las cuales se encuentran descritas en la página <http://www.sgs.pe/es-ES/Terms-and-Conditions.aspx>. Son especialmente importantes las disposiciones sobre limitación de responsabilidad, pago de indemnizaciones y jurisdicción definidas en dichas Condiciones Generales de Servicio, su alteración o su uso indebido constituye un delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales de la materia; queda prohibida la reproducción total o parcial, salvo autorización escrita de SGS del Perú S.A.C.

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayadas; no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. La compañía no es responsable del origen o fuente de la cual las muestras han sido tomadas y de la información proporcionada por el cliente.

Última Revisión Enero 2022

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 5 de 5

SGS del Perú S.A.C. | Av. Elmer Faucett 3348 Callao 1 Callao t (511) 517 1900 www.sgs.pe
Ernesto Gunther 275 Parque Industrial Arequipa t (054) 213 506 e Pe.servicios@sgs.com
Jr. Arnaldo Márquez Ba. San Antonio Cajamarca t (076) 366 092

Miembro del Grupo SGS

**INFORME DE ENSAYO
MA2412361-AC-0**

REYES CASTILLO BIANCA GABRIELA

JR IGNACIO TOROTE 600. - LIMA - LIMA - LIMA

ENV / LB-353734-004

PROCEDENCIA : UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Fecha de Recepción SGS : 19-04-2024
Fecha de Ejecución : Del 19-04-2024 al 26-04-2024
Muestreo Realizado Por : CLIENTE
Observación : TESIS UNI - FIA

Estación de Muestreo
LIX-1
LIX-2
LIX-3

Emitido por SGS del Perú S.A.C.

Impreso el 26/04/2024



Frank M. Julcamoro Quispe
C.Q.P. 1033
Supervisor de Laboratorio

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL-DA, se encuentra dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 1 de 5





**INFORME DE ENSAYO
MA2412361-AC-0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					LIX-1	LIX-2
FECHA DE MUESTREO					8670149N / 277015E	8670148N / 277016E
HORA DE MUESTREO					12/04/2024	12/04/2024
CATEGORIA					10:00:00	10:10:00
SUB CATEGORIA					AGUA DE PROCESO	AGUA DE PROCESO
					AGUA DE LIXIVIACIÓN	AGUA DE LIXIVIACIÓN
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre	Resultado ± Incertidumbre
Análisis Generales						
Demanda Química de Oxígeno	EW_APHA5220D	mgO ₂ /L	1.8	4.5	11,561.4 ± 578.10	9,189.8 ± 459.50

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					LIX-3	LIX-1
FECHA DE MUESTREO					8670196N / 277015E	8670149N / 277015E
HORA DE MUESTREO					12/04/2024	18/04/2024
CATEGORIA					10:20:00	10:00:00
SUB CATEGORIA					AGUA DE PROCESO	AGUA DE PROCESO
					AGUA DE LIXIVIACIÓN	AGUA DE LIXIVIACIÓN
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre	Resultado ± Incertidumbre
Análisis Generales						
Demanda Química de Oxígeno	EW_APHA5220D	mgO ₂ /L	1.8	4.5	13,043.6 ± 652.20	13,653.0 ± 682.70

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					LIX-2	LIX-3
FECHA DE MUESTREO					8670148N / 277016E	8670196N / 277015E
HORA DE MUESTREO					18/04/2024	18/04/2024
CATEGORIA					10:10:00	10:20:00
SUB CATEGORIA					AGUA DE PROCESO	AGUA DE PROCESO
					AGUA DE LIXIVIACIÓN	AGUA DE LIXIVIACIÓN
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre	Resultado ± Incertidumbre
Análisis Generales						
Demanda Química de Oxígeno	EW_APHA5220D	mgO ₂ /L	1.8	4.5	9,865.1 ± 493.30	11,083.8 ± 554.20

**INFORME DE ENSAYO
MA2412361-AC-0**

CONTROL DE CALIDAD

LC: Límite de cuantificación
MB: Blanco del proceso.
LCS %Recovery: Porcentaje de recuperación del patrón de proceso.
MS %Recovery: Porcentaje de recuperación de la muestra adicionada.
MSD %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados de la muestra adicionada.
Dup %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados del proceso.

Parámetro	Unidad	LC	MB	LCS %Recovery	MS %Recovery	MSD %RPD
Demanda Química de Oxígeno	mgO ₂ /L	4.5	<4.5	99 - 101%	105%	5%



**INFORME DE ENSAYO
MA2412361-AC-0**

REFERENCIAS DE MÉTODOS DE ENSAYO

Referencia	Sede	Parámetro	Método de Ensayo
EW_APHA5220D	Callao	Demanda Química de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D: 23rd Ed: 2017. Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method. (VALIDADO - Aplicado fuera del alcance) 2017



**INFORME DE ENSAYO
MA2412361-AC-0**

NOTAS

- El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.
- Las muestras recibidas cumplen con las condiciones necesarias para la realización de los análisis solicitados.
- La incertidumbre expandida de medición reportada se ha obtenido multiplicando la incertidumbre estándar combinada por el factor de cobertura $k=2$, de modo que la probabilidad de cobertura corresponde aproximadamente a un nivel de confianza del 95%.

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL-DA, se encuentra dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

Este documento es emitido bajo las Condiciones Generales de Servicio de SGS del Perú S.A.C, las cuales se encuentran descritas en la página <http://www.sgs.pe/es-ES/Terms-and-Conditions.aspx>. Son especialmente importantes las disposiciones sobre limitación de responsabilidad, pago de indemnizaciones y jurisdicción definidas en dichas Condiciones Generales de Servicio, su alteración o su uso indebido constituye un delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales de la materia; queda prohibida la reproducción total o parcial, salvo autorización escrita de SGS del Perú S.A.C.

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayadas; no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. La compañía no es responsable del origen o fuente de la cual las muestras han sido tomadas y de la información proporcionada por el cliente.

Última Revisión Enero 2022

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 5 de 5

**INFORME DE ENSAYO
MA2414253-AC-0**

REYES CASTILLO BIANCA GABRIELA

JR IGNACIO TOROTE 600. - LIMA - LIMA - LIMA

ENV / LB-354930-002

PROCEDENCIA : UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Fecha de Recepción SGS : 07-05-2024

Fecha de Ejecución : Del 07-05-2024 al 13-05-2024

Muestreo Realizado Por : CLIENTE

Estación de Muestreo
LIX-1
LIX-2
LIX-3

Emitido por SGS del Perú S.A.C.

Impreso el 13/05/2024



Frank M. Julcamoro Quispe

C.Q.P. 1033

Supervisor de Laboratorio

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL-DA, se encuentra dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 1 de 5





INFORME DE ENSAYO
MA2414253-AC-0

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					LIX-1	LIX-2
FECHA DE MUESTREO					8670149N / 277015E	8670148N / 277016E
HORA DE MUESTREO					26/04/2024	26/04/2024
CATEGORIA					16:00:00	16:10:00
SUB CATEGORIA					AGUA DE PROCESO	AGUA DE PROCESO
					AGUA DE LIXIVIACIÓN	AGUA DE LIXIVIACIÓN
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre	Resultado ± Incertidumbre
Análisis Generales						
Demanda Química de Oxígeno	EW_APHA5220D	mgO ₂ /L	1.8	4.5	20,853.1 ± 1,042.70	15,281.2 ± 764.10

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					LIX-3	LIX-1
FECHA DE MUESTREO					8670196N / 277015E	8670149N / 277015E
HORA DE MUESTREO					26/04/2024	03/05/2024
CATEGORIA					16:20:00	16:20:00
SUB CATEGORIA					AGUA DE PROCESO	AGUA DE PROCESO
					AGUA DE LIXIVIACIÓN	AGUA DE LIXIVIACIÓN
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre	Resultado ± Incertidumbre
Análisis Generales						
Demanda Química de Oxígeno	EW_APHA5220D	mgO ₂ /L	1.8	4.5	20,753.0 ± 1,037.70	8,141.1 ± 407.10

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					LIX-2	LIX-3
FECHA DE MUESTREO					8670148N / 277016E	8670196N / 277015E
HORA DE MUESTREO					03/05/2024	03/05/2024
CATEGORIA					16:10:00	16:00:00
SUB CATEGORIA					AGUA DE PROCESO	AGUA DE PROCESO
					AGUA DE LIXIVIACIÓN	AGUA DE LIXIVIACIÓN
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre	Resultado ± Incertidumbre
Análisis Generales						
Demanda Química de Oxígeno	EW_APHA5220D	mgO ₂ /L	1.8	4.5	6,222.6 ± 311.10	17,750.2 ± 887.50



**INFORME DE ENSAYO
MA2414253-AC-0**

CONTROL DE CALIDAD

LC: Límite de cuantificación
MB: Blanco del proceso.
LCS %Recovery: Porcentaje de recuperación del patrón de proceso.
MS %Recovery: Porcentaje de recuperación de la muestra adicionada.
MSD %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados de la muestra adicionada.
Dup %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados del proceso.

Parámetro	Unidad	LC	MB	LCS %Recovery	MS %Recovery	MSD %RPD
Demanda Química de Oxígeno	mgO ₂ /L	4.5	<4.5	99 - 100%	101%	2%



**INFORME DE ENSAYO
MA2414253-AC-0**

REFERENCIAS DE MÉTODOS DE ENSAYO

Referencia	Sede	Parámetro	Método de Ensayo
EW_APHA5220D	Callao	Demanda Química de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D: 23rd Ed: 2017. Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method. (VALIDADO - Aplicado fuera del alcance) 2017



**INFORME DE ENSAYO
MA2414253-AC-0**

NOTAS

- El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.
- Las muestras recibidas cumplen con las condiciones necesarias para la realización de los análisis solicitados.
- La incertidumbre expandida de medición reportada se ha obtenido multiplicando la incertidumbre estándar combinada por el factor de cobertura $k=2$, de modo que la probabilidad de cobertura corresponde aproximadamente a un nivel de confianza del 95%.

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL-DA, se encuentra dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

Este documento es emitido bajo las Condiciones Generales de Servicio de SGS del Perú S.A.C, las cuales se encuentran descritas en la página <http://www.sgs.pe/es-ES/Terms-and-Conditions.aspx>. Son especialmente importantes las disposiciones sobre limitación de responsabilidad, pago de indemnizaciones y jurisdicción definidas en dichas Condiciones Generales de Servicio, su alteración o su uso indebido constituye un delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales de la materia; queda prohibida la reproducción total o parcial, salvo autorización escrita de SGS del Perú S.A.C.

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayadas; no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. La compañía no es responsable del origen o fuente de la cual las muestras han sido tomadas y de la información proporcionada por el cliente.

Última Revisión Enero 2022

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 5 de 5

**INFORME DE ENSAYO
MA2418208-AC-0**

REYES CASTILLO BIANCA GABRIELA

JR IGNACIO TOROTE 600. - LIMA - LIMA - LIMA

ENV / LB-355073-002

PROCEDENCIA : Relleno Sanitario Chancay

Fecha de Recepción SGS : 07-06-2024

Fecha de Ejecución : Del 07-06-2024 al 17-06-2024

Muestreo Realizado Por : CLIENTE

Estación de Muestreo
LIX-AR-1

Emitido por SGS del Perú S.A.C.

Impreso el 17/06/2024



Frank M. Julcamoro Quispe

C.Q.P. 1033

Supervisor de Laboratorio

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL-DA, se encuentra dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 1 de 5





**INFORME DE ENSAYO
MA2418208-AC-0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					LIX-AR-1
FECHA DE MUESTREO					8730396N / 246062E
HORA DE MUESTREO					06/06/2024
CATEGORIA					11:20:00
SUB CATEGORIA					AGUA DE PROCESO AGUA DE LIXIVIACIÓN
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre
Análisis Generales					
Demanda Bioquímica de Oxígeno	EW_APHA5210B	mg/L	1.0	2.6	3,110.0 ± 653.10
Demanda Química de Oxígeno	EW_APHA5220D	mgO ₂ /L	1.8	4.5	14,801.4 ± 740.10

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 2 de 5



**INFORME DE ENSAYO
MA2418208-AC-0**

CONTROL DE CALIDAD

LC: Límite de cuantificación
MB: Blanco del proceso.
LCS %Recovery: Porcentaje de recuperación del patrón de proceso.
MS %Recovery: Porcentaje de recuperación de la muestra adicionada.
MSD %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados de la muestra adicionada.
Dup %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados del proceso.

Parámetro	Unidad	LC	MB	LCS %Recovery	MS %Recovery	MSD %RPD
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	2.6	<2.6	93 - 101%		
Demanda Química de Oxígeno	mgO ₂ /L	4.5	<4.5	103 - 109%	109%	6%



**INFORME DE ENSAYO
MA2418208-AC-0**

REFERENCIAS DE MÉTODOS DE ENSAYO

Referencia	Sede	Parámetro	Método de Ensayo
EW_APHA5210B	Callao	Demanda Bioquímica de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B ;24th Ed: 2023. Biochemical Oxygen Demand (BOD): 5-Day BOD test
EW_APHA5220D	Callao	Demanda Química de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D: 23rd Ed: 2017. Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method. (VALIDADO - Aplicado fuera del alcance) 2017



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO
MA2418208-AC-0**

NOTAS

- El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.
- Las muestras recibidas cumplen con las condiciones necesarias para la realización de los análisis solicitados.
- La incertidumbre expandida de medición reportada se ha obtenido multiplicando la incertidumbre estándar combinada por el factor de cobertura $k=2$, de modo que la probabilidad de cobertura corresponde aproximadamente a un nivel de confianza del 95%.

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL-DA, se encuentra dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

Este documento es emitido bajo las Condiciones Generales de Servicio de SGS del Perú S.A.C, las cuales se encuentran descritas en la página <http://www.sgs.pe/es-ES/Terms-and-Conditions.aspx>. Son especialmente importantes las disposiciones sobre limitación de responsabilidad, pago de indemnizaciones y jurisdicción definidas en dichas Condiciones Generales de Servicio, su alteración o su uso indebido constituye un delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales de la materia; queda prohibida la reproducción total o parcial, salvo autorización escrita de SGS del Perú S.A.C.

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayadas; no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. La compañía no es responsable del origen o fuente de la cual las muestras han sido tomadas y de la información proporcionada por el cliente.

Última Revisión Enero 2022

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 5 de 5

SGS del Perú S.A.C. | Av. Elmer Faucett 3348 Callao 1 Callao t (511) 517 1900 www.sgs.pe
Ernesto Gunther 275 Parque Industrial Arequipa t (054) 213 506 e Pe.servicios@sgs.com
Jr. Arnaldo Márquez Ba. San Antonio Cajamarca t (076) 366 092

Miembro del Grupo SGS

**INFORME DE ENSAYO
MA2418208-NA-0**

REYES CASTILLO BIANCA GABRIELA

JR IGNACIO TOROTE 600. - LIMA - LIMA - LIMA

ENV / LB-355073-002

PROCEDENCIA : Relleno Sanitario Chancay

Fecha de Recepción SGS : 07-06-2024

Fecha de Ejecución : Del 07-06-2024 al 17-06-2024

Muestreo Realizado Por : CLIENTE

Estación de Muestreo
LIX-AR-1

Emitido por SGS del Perú S.A.C.

Impreso el 17/06/2024



Frank M. Julcamoro Quispe

C.Q.P. 1033

Supervisor de Laboratorio

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 1 de 5



SGS del Perú S.A.C.

Av. Elmer Faucett 3348
Ernesto Gunther 275
Jr. Arnaldo Márquez

Callao 1
Parque Industrial
Ba. San Antonio

Callao t (511) 517 1900
Arequipa t (054) 213 506
Cajamarca t (076) 366 092

www.sgs.pe
e Pe.servicios@sgs.com

Miembro del Grupo SGS



INFORME DE ENSAYO MA2418208-NA-0

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					LIX-AR-1 8730396N / 246062E 06/06/2024 11:20:00 AGUA DE PROCESO AGUA DE LIXIVIACIÓN
FECHA DE MUESTREO					
HORA DE MUESTREO					
CATEGORIA					
SUB CATEGORIA					
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre
Análisis Generales					
Sólidos Totales	EW_APHA2540B	mg Sólidos Totales/L	1	3	47,970 ± 2,878
Sólidos Volátiles	EW_APHA2540E	mg Sólidos Volátiles/L	1	3	7,140 ± 571

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 2 de 5

SGS del Perú S.A.C. | Av. Elmer Faucett 3348 Callao 1 Callao t (511) 517 1900 www.sgs.pe
Ernesto Gunther 275 Parque Industrial Arequipa t (054) 213 506 e Pe.servicios@sgs.com
Jr. Arnaldo Márquez Ba. San Antonio Cajamarca t (076) 366 092

Miembro del Grupo SGS

CONTROL DE CALIDAD

LC: Límite de cuantificación
MB: Blanco del proceso.
LCS %Recovery: Porcentaje de recuperación del patrón de proceso.
MS %Recovery: Porcentaje de recuperación de la muestra adicionada.
MSD %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados de la muestra adicionada.
Dup %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados del proceso.

Parámetro	Unidad	LC	MB	DUP %RPD	LCS %Recovery
Sólidos Totales	mg Sólidos Totales/L	3	<3	1%	97%
Sólidos Volátiles	mg Sólidos Volátiles/L	3	<3	2%	

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 3 de 5

**INFORME DE ENSAYO
MA2418208-NA-0**

REFERENCIAS DE MÉTODOS DE ENSAYO

Referencia	Sede	Parámetro	Método de Ensayo
EW_APHA2540B	Callao	Sólidos Totales	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540-B; 24th Ed :2023. Solids :Total Solids Dried at 103-105°C
EW_APHA2540E	Callao	Sólidos Volátiles	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540-E, 24th Ed: 2023. Solids: Fixed and Volatile solids Ignited at 550°C.

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 4 de 5

NOTAS

- El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.
- Las muestras recibidas cumplen con las condiciones necesarias para la realización de los análisis solicitados.
- La incertidumbre expandida de medición reportada se ha obtenido multiplicando la incertidumbre estándar combinada por el factor de cobertura $k=2$, de modo que la probabilidad de cobertura corresponde aproximadamente a un nivel de confianza del 95%.

Este documento es emitido bajo las Condiciones Generales de Servicio de SGS del Perú S.A.C, las cuales se encuentran descritas en la página <http://www.sgs.pe/es-ES/Terms-and-Conditions.aspx>. Son especialmente importantes las disposiciones sobre limitación de responsabilidad, pago de indemnizaciones y jurisdicción definidas en dichas Condiciones Generales de Servicio, su alteración o su uso indebido constituye un delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales de la materia; queda prohibida la reproducción total o parcial, salvo autorización escrita de SGS del Perú S.A.C.

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayadas; no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. La compañía no es responsable del origen o fuente de la cual las muestras han sido tomadas y de la información proporcionada por el cliente.

Última Revisión Enero 2022

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 5 de 5

**INFORME DE ENSAYO
MA2418214-AC-0**

REYES CASTILLO BIANCA GABRIELA

JR IGNACIO TOROTE 600. - LIMA - LIMA - LIMA

ENV / LB-355060-003

PROCEDENCIA : Relleno Sanitario Chancay

Fecha de Recepción SGS : 07-06-2024

Fecha de Ejecución : Del 07-06-2024 al 13-06-2024

Muestreo Realizado Por : CLIENTE

Estación de Muestreo
LIX-1
LIX-2
LIX-3

Emitido por SGS del Perú S.A.C.

Impreso el 13/06/2024



Frank M. Julcamoro Quispe

C.Q.P. 1033

Supervisor de Laboratorio

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL-DA, se encuentra dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 1 de 5





INFORME DE ENSAYO
MA2418214-AC-0

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					LIX-1	LIX-1
FECHA DE MUESTREO					8670149N / 277015E	8670149N / 277015E
HORA DE MUESTREO					10/05/2024	17/05/2024
CATEGORIA					09:00:00	09:00:00
SUB CATEGORIA					AGUA DE PROCESO	AGUA DE PROCESO
					AGUA DE LIXIVIACIÓN	AGUA DE LIXIVIACIÓN
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre	Resultado ± Incertidumbre
Análisis Generales						
Demanda Química de Oxígeno	EW_APHA5220D	mgO ₂ /L	1.8	4.5	4,427.7 ± 221.40	20,232.8 ± 1,011.60

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					LIX-2	LIX-2
FECHA DE MUESTREO					8670148N / 277016E	8670148N / 277016E
HORA DE MUESTREO					10/05/2024	17/05/2024
CATEGORIA					09:10:00	09:10:00
SUB CATEGORIA					AGUA DE PROCESO	AGUA DE PROCESO
					AGUA DE LIXIVIACIÓN	AGUA DE LIXIVIACIÓN
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre	Resultado ± Incertidumbre
Análisis Generales						
Demanda Química de Oxígeno	EW_APHA5220D	mgO ₂ /L	1.8	4.5	8,188.4 ± 409.40	14,864.9 ± 743.20

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					LIX-3	LIX-3
FECHA DE MUESTREO					8670196N / 277015E	8670196N / 277015E
HORA DE MUESTREO					10/05/2024	17/05/2024
CATEGORIA					09:20:00	09:20:00
SUB CATEGORIA					AGUA DE PROCESO	AGUA DE PROCESO
					AGUA DE LIXIVIACIÓN	AGUA DE LIXIVIACIÓN
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre	Resultado ± Incertidumbre
Análisis Generales						
Demanda Química de Oxígeno	EW_APHA5220D	mgO ₂ /L	1.8	4.5	1,785.1 ± 142.80	2,725.2 ± 218.0



**INFORME DE ENSAYO
MA2418214-AC-0**

CONTROL DE CALIDAD

LC: Límite de cuantificación
MB: Blanco del proceso.
LCS %Recovery: Porcentaje de recuperación del patrón de proceso.
MS %Recovery: Porcentaje de recuperación de la muestra adicionada.
MSD %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados de la muestra adicionada.
Dup %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados del proceso.

Parámetro	Unidad	LC	MB	LCS %Recovery	MS %Recovery	MSD %RPD
Demanda Química de Oxígeno	mgO ₂ /L	4.5	<4.5	103 - 109%	109%	6%



**INFORME DE ENSAYO
MA2418214-AC-0**

REFERENCIAS DE MÉTODOS DE ENSAYO

Referencia	Sede	Parámetro	Método de Ensayo
EW_APHA5220D	Callao	Demanda Química de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D: 23rd Ed: 2017. Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method. (VALIDADO - Aplicado fuera del alcance) 2017



**INFORME DE ENSAYO
MA2418214-AC-0**

NOTAS

- El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.
- Las muestras recibidas cumplen con las condiciones necesarias para la realización de los análisis solicitados.
- La incertidumbre expandida de medición reportada se ha obtenido multiplicando la incertidumbre estándar combinada por el factor de cobertura $k=2$, de modo que la probabilidad de cobertura corresponde aproximadamente a un nivel de confianza del 95%.

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL-DA, se encuentra dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

Este documento es emitido bajo las Condiciones Generales de Servicio de SGS del Perú S.A.C, las cuales se encuentran descritas en la página <http://www.sgs.pe/es-ES/Terms-and-Conditions.aspx>. Son especialmente importantes las disposiciones sobre limitación de responsabilidad, pago de indemnizaciones y jurisdicción definidas en dichas Condiciones Generales de Servicio, su alteración o su uso indebido constituye un delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales de la materia; queda prohibida la reproducción total o parcial, salvo autorización escrita de SGS del Perú S.A.C.

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayadas; no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. La compañía no es responsable del origen o fuente de la cual las muestras han sido tomadas y de la información proporcionada por el cliente.

Última Revisión Enero 2022

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 5 de 5

Anexo 3

Solicitud de información de estudios especializados realizado por el OEFA - Carta N.º

01558-2023-RAI



Lima, 31 de mayo del 2023

2023-E01-467555

CARTA N° 01558-2023-OEFA/RAI

Señor

NORVIN PLUMIEER REQUENA SÁNCHEZnrequenas@uni.edu.pe

Referencia : Solicitud de acceso a la información pública del 17.05.2023
(Expediente N° 2023-E01-467555)

De mi mayor consideración:

Es grato dirigirme a usted, en atención al documento de la referencia, mediante el cual requiere que se le brinde la siguiente información:

"[SIC] Buenos días, previo saludo cordial, solicito: A) La EAC realizada al relleno sanitario Portillo Grande; B) La EAC realizada al relleno sanitario "El Zapallal", C) La EAC realizada al relleno sanitario Huaycoloro; D) La EAC realizada al relleno sanitario modelo del Callao; E) La EAC realizada al botadero el Milagro de Trujillo. Por favor, considerar que los documentos solicitados deben de contener todos los anexos correspondiente. Además, incluir las fotografías obtenidas en el proceso de realización de los estudios realizados para elaborar los respectivos EAC. Muchas gracias".

Al respecto, es preciso señalar que la información solicitada es de carácter público de conformidad a lo establecido en el Artículo 10° del Texto Único Ordenado de la Ley N° 27806, Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública, aprobado por Decreto Supremo N° 021-2019 JUS.

En ese sentido, la Dirección de Evaluación Ambiental (en adelante, la DEAM) informa que respecto de la EAC realizada al 'relleno sanitario modelo del Callao', esta aún se encuentra en etapa de elaboración, por lo que dicha Dirección no puede brindarle la información que solicita en dicho extremo.

En ese sentido, respecto de lo mencionado, corresponde aplicar lo establecido en el Tercer Párrafo del Artículo 13° del TUO de la Ley N° 27806, Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública, donde establece que *"la solicitud de información no implica la obligación de las entidades de la Administración Pública de crear o producir información con la que no cuente o no tenga obligación de contar al momento de efectuado el pedido"*; se procede a denegar la presente solicitud.

Sin perjuicio de ello, la DEAM remite mediante correo electrónico institucional la copia digital de los siguientes informes:

EAC realizada al relleno sanitario Portillo Grande	0183-2022-OEFA/DEAM-STE
EAC realizada al relleno sanitario "El Zapallal"	0134-2021-OEFA/DEAM-STE
EAC realizada al relleno sanitario Huaycoloro	0228-2020-OEFA/DEAM-STE
EAC realizada al botadero el Milagro de Trujillo	0165-2019-OEFA/DEAM-STE



“Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres”
“Año de la unidad, la paz y el desarrollo”

Por tanto, se pone a su disposición la información mencionada, la cual será remitida sin costo alguno al correo electrónico consignado en su solicitud, conforme a lo estipulado en el Artículo 12° del Reglamento de la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública, aprobado por Decreto Supremo N° 072-2003-PCM.

Atentamente,



Organismo
de Evaluación
y Fiscalización
Ambiental

Firmado digitalmente por:
LEVANO CANO Angelo Alberto
FAU 20521286769 soft
Cargo: Responsable de Acceso
a la Información Pública (RAI)
Lugar: Sede Central - Jesus
María - Lima - Lima
Motivo: Soy el autor del
documento
Fecha/Hora: 31/05/2023
18:00:19

dzll



"Esta es una copia auténtica imprimible de un documento electrónico archivado por el OEFA, aplicando lo dispuesto por el Art. 25 de D.S. 070-2013-PCM y la Tercera Disposición Complementaria Final del D.S. N° 026-2016-PCM. Su autenticidad e integridad pueden ser contrastadas a través de la siguiente dirección web: <https://sistemas.oefa.gob.pe/verifica> e ingresando la siguiente clave: 01585295"



01585295