



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y
FORESTAL



**“INFLUENCIA DE LA RELACIÓN CARBONO – NITRÓGENO EN EL
TIEMPO DE GENERACIÓN Y CALIDAD DEL BIOGÁS PRODUCIDO
A PARTIR DE ESTIÉRCOL Y LODOS RESIDUALES DE LA PTAR –
SANDIA 2024”**

Bach. Elio Ronaldino Mamani Ccora

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL**

Asesora:

Dra. Eliana Mullisaca Contreras



Juliaca, 2025



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y
FORESTAL



**“INFLUENCIA DE LA RELACIÓN CARBONO – NITRÓGENO EN EL
TIEMPO DE GENERACIÓN Y CALIDAD DEL BIOGÁS PRODUCIDO
A PARTIR DE ESTIÉRCOL Y LODOS RESIDUALES DE LA PTAR –
SANDIA 2024”**

Bach. Elio Ronaldino Mamani Ccora

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL**

Asesora:

Dra. Eliana Mullisaca Contreras



Juliaca, 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y
FORESTAL



“INFLUENCIA DE LA RELACIÓN CARBONO – NITRÓGENO EN EL
TIEMPO DE GENERACIÓN Y CALIDAD DEL BIOGÁS PRODUCIDO
A PARTIR DE ESTIÉRCOL Y LODOS RESIDUALES DE LA PTAR –
SANDIA 2024”

Bach. Elio Ronaldino Mamani Ccora

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL

Asesora: Dra. Eliana Mullisaca Contreras

Juliaca, 2025

Mamani, Elio (2025). *Influencia de la relación carbono – nitrógeno en el tiempo de generación y calidad del biogás producido a partir de estiércol y lodos residuales de la PTAR – Sandia 2024.*

(Tesis de pregrado) Universidad Nacional de Juliaca.

Autor: Elio Ronaldino Mamani Ccora

Título: Influencia de la relación carbono – nitrógeno en el tiempo de generación y calidad del biogás producido a partir de estiércol y lodos residuales de la PTAR – Sandia 2024

Publicación: Juliaca, 2025

Descripción: Cantidad de páginas (137 páginas)

Nota: Tesis - Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Forestal – Universidad Nacional de Juliaca.

Código: 01-000071-01/M21

Nota: Incluye bibliografía

Asesora: Dra. Eliana Mullisaca Contreras

Palabras Clave: Calidad del biogás, estiércol, lodos residuales, relación carbono - nitrógeno, tiempo de generación.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y
FORESTAL
“INFLUENCIA DE LA RELACIÓN CARBONO–NITRÓGENO
EN EL TIEMPO DE GENERACIÓN Y CALIDAD DEL
BIOGÁS PRODUCIDO A PARTIR DE ESTIÉRCOL Y LODOS
RESIDUALES DE LA PTAR – SANDIA 2024”

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL Y
FORESTAL

Presentada por:

Bach. Elio Ronaldino Mamani Ccora

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Dr. José Luis Pineda Tapia

PRESIDENTE DE JURADO

M. Sc. Hugo Apaza Aquino

JURADO (Secretario)

2° MIEMBRO

M. Sc. Jael Calla Calla

JURADO (Vocal)

3° MIEMBRO

Dra. Eliana Mullisaca Contreras
ASESOR DE TESIS



Elio Ronaldino Mamani Ccora

INFLUENCIA DE LA RELACIÓN CARBONO – NITRÓGENO EN EL TIEMPO DE GENERACIÓN Y CALIDAD DEL BIOGÁS PRODU...

 Universidad Nacional de Juliaca

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:543789501

137 páginas

Fecha de entrega

31 dic 2025, 4:19 p.m. GMT-5

19.250 palabras

Fecha de descarga

31 dic 2025, 4:25 p.m. GMT-5

109.843 caracteres

Nombre del archivo

TESIS definitivo4.pdf

Tamaño del archivo

22.3 MB




11% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 8%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 8%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Texto oculto**
14 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



DEDICATORIA

A Dios, por brindarme su bendición todos los días, y darme las fuerzas para seguir adelante todos los días.

A la Universidad Nacional de Juliaca por brindarme un segundo hogar y formarme profesionalmente, y brindarme los conocimientos.

A mis padres Leonidas Mamani Herrera y Patricia Ccora Apaza por ser un gran ejemplo, quienes que con su sabiduría y empuje que me dan, hacen que todo sea posible.

A mi asesor y los docentes de la Universidad Nacional de Juliaca que colaboraron con su conocimiento y apoyo para la culminación de este estudio.

AGRADECIMIENTO

A Dios por permitir que culmine mi estudio superior, y por apoyarme con su infinita sabiduría.

A la Universidad Nacional de Juliaca y la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Forestal, por la posibilidad otorgada de formarme profesionalmente en sus instalaciones educativas durante todos estos años.

A mi padre, madre y hermanito que siempre estuvieron ahí impulsándome, motivándome y aconsejándome durante todo este proceso.

A la Dra. Eliana Mullisaca Contreras, que con su dirección y conocimiento contribuyo para culminar este estudio.

Mi eterno agradecimiento con cada uno de ellos.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTO	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE ANEXOS	ix
RESUMEN.....	10
ABSTRACT	11
INTRODUCCIÓN	12

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Situación problemática.....	13
1.2. Formulación del problema	14
1.2.1. Problema general	14
1.2.2. Problemas específicos	14
1.3. Objetivos de la investigación	15
1.3.1. Objetivo general.....	15
1.3.2. Objetivos específicos	15
1.4. Justificación	16
1.4.1. Justificación ambiental.....	16
1.4.2. Justificación social	16
1.4.3. Justificación económica	16
1.4.4. Justificación técnica	17

CAPITULO

REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1.	Antecedentes	18
2.1.1.	Antecedentes internacionales	18
2.1.2.	Antecedentes nacionales	20
2.1.3.	Antecedentes regionales.....	21
2.2.	Marco teórico	22
2.2.1.	Estiércol	22
2.2.2.	Estiércol de ovino	22
2.2.3.	Lodos residuales.....	23
2.2.4.	Tipos de lodos	23
2.2.5.	Tratamiento de lodos.....	24
2.2.6.	La digestión anaerobia	25
2.2.7.	Biogás	26
2.2.8.	Proceso de elaboración de biogás	27
2.2.9.	Composición físico – química del biogás	28
2.2.10.	Calidad del biogás.....	29
2.2.11.	Relación carbono - nitrógeno.....	29
2.2.12.	Otros parámetros importantes en la producción de biogás	32
2.2.13.	Tipos de biodigestores	36

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.	Ámbito de estudio	40
3.1.1.	Zona de muestreo	40
3.1.2.	Zona de estudio	41
3.2.	Tipo y diseño de investigación	41
3.3.	Población y muestra	42
3.3.1.	Población.....	42
3.3.2.	Muestra	42
3.4.	Hipótesis de la investigación	43
3.4.1.	Hipótesis general.....	43
3.4.2.	Hipótesis específicas	43
3.5.	Instrumentos, materiales y equipos.....	43

3.5.1. Materiales de muestreo	43
3.5.2. Materiales de armado de biodigestor	43
3.5.3. Equipos de laboratorio	44
3.5.4. Materiales de laboratorio	44
3.5.5. Reactivos de laboratorio	44
3.5.6. Materiales de oficina y apunte	44
3.6. Procedimiento metodológico	45
3.6.1. Determinación de las características físico – químicas de la mezcla del estiércol y lodos residuales de la PTAR – Sandia.....	45
3.6.2. Determinación del efecto de la relación carbono – nitrógeno en el tiempo de producción de biogás a partir de la mezcla de estiércol y lodos residuales de la PTAR – Sandia.....	48
3.6.3. Determinación de la influencia de la relación carbono–nitrógeno en la calidad del biogás producido a partir de la mezcla de estiércol y lodos residuales de la PTAR – Sandia.....	52
3.7. Análisis de datos	53

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Características físico–químicas de lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Sandia 2024.	56
4.1.1. pH.....	56
4.1.2. Humedad.....	57
4.1.3. Carbono orgánico.....	57
4.1.4. Nitrógeno total	58
4.1.5. Relación carbono - nitrógeno.....	58
4.2. Influencia de la relación carbono – nitrógeno en el tiempo de generación del biogás a partir de estiércol y lodos residuales de la PTAR – Sandia 2024.....	59
4.2.1. Relación carbono - nitrógeno.....	59
4.2.2. Relación carbono - nitrógeno vs tiempo de generación.....	62
4.2.3. Tiempo de inicio de generación de biogás.....	63
4.2.4. Influencia de la relación carbono – nitrógeno en el tiempo de generación	64
4.3. Influencia de la relación carbono - nitrógeno en la calidad del biogás a partir de estiércol y lodos residuales de la PTAR - Sandia 2024.	66

4.3.1. Relación carbono – nitrógeno vs calidad de biogás.....	66
4.3.2. Influencia de la relación carbono – nitrógeno en la calidad de biogás	67

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones	70
5.2. Recomendaciones	71

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72
--	-----------

ANEXOS.....	79
--------------------	-----------

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Composición del biogás</i>	28
Tabla 2 <i>Valores promedios aproximados de relación C-N en residuos animales</i>	30
Tabla 3 <i>Valores representativos de la relación C-N en residuos de origen vegetal</i>	31
Tabla 4 <i>Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica</i>	32
Tabla 5 <i>Tiempo de retención hidráulico de estiércol de ganado en distintos climas</i>	33
Tabla 6 <i>Cantidades a utilizar de relación C-N y humedad</i>	50
Tabla 7 <i>Diseño factorial para el número de experimentos</i>	51
Tabla 8 <i>Diseño factorial 2²</i>	54
Tabla 9 <i>Resultados de los parámetros fisicoquímicas evaluados</i>	56
Tabla 10 <i>Determinación de peso y relación de carbono - nitrógeno</i>	60
Tabla 11 <i>Resumen de procesamiento de datos de tiempo de generación del biogás</i>	97
Tabla 12 <i>Pruebas de normalidad de tiempo de generación de biogás</i>	98
Tabla 13 <i>Prueba de homogeneidad de tiempo de generación de biogás</i>	98
Tabla 14 <i>Prueba ANOVA de tiempo de generación de biogás</i>	99
Tabla 15 <i>Resumen de procesamiento de datos de calidad del biogás</i>	100
Tabla 16 <i>Pruebas de normalidad de calidad de biogás</i>	101
Tabla 17 <i>Prueba de homogeneidad de varianzas de calidad de biogás</i>	101
Tabla 18 <i>Prueba ANOVA de calidad de biogás</i>	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Tratamiento de lodos residuales por fases</i>	25
Figura 2 <i>Descripción esquemática de las reacciones en la digestión anaerobia</i>	26
Figura 3 <i>Producción diaria de biogás y TRH de diferentes sustratos</i>	34
Figura 4 <i>Composición del biogás en función del pH de la mezcla de materias primas</i>	35
Figura 5 <i>Esquema de biodigestor de flujo continuo</i>	37
Figura 6 <i>Esquema de biodigestor semi continuo</i>	38
Figura 7 <i>Etapas operacionales del digestor Batch</i>	39
Figura 8 <i>Zona de muestreo</i>	40
Figura 9 <i>Zona de estudio y armado de los biodigestores</i>	41
Figura 10 <i>Flujograma de la planta de tratamiento de aguas residuales Sandia</i>	42
Figura 11 <i>Biodigestor adaptado para la producción de biogás</i>	49
Figura 12 <i>Armado de biodigestores</i>	50
Figura 13 <i>Flujograma del proceso</i>	55
Figura 14 <i>Tiempo de retención hidráulica comparada con la relación C-N</i>	62
Figura 15 <i>Tiempo de inicio de generación de biogás</i>	63
Figura 16 <i>Influencia de la relación C-N en el tiempo de generación</i>	64
Figura 17 <i>Influencia de la relación C-N 20 y 30 en la calidad de biogás</i>	66
Figura 18 <i>Influencia de la relación C-N en la calidad de biogás</i>	68
Figura 19 <i>Formato llenado de cadena custodia</i>	103
Figura 20 <i>Reconocimiento y zonificación de cuadrantes</i>	103
Figura 21 <i>Muestra compuesta para análisis en laboratorio</i>	104
Figura 22 <i>Armado de los biodigestores</i>	104
Figura 23 <i>Preparado del sustrato de la mezcla de estiércol y lodos residuales</i>	105
Figura 24 <i>Prueba de combustión</i>	105

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo I: Carta de autorización de acceso a la planta de tratamiento de aguas residuales.....	80
Anexo II: Resultados del análisis físico químico de los lodos residuales.....	81
Anexo III: Formulario de cotización IIIDPROQ.....	84
Anexo IV: Informe de análisis del experimento E1.....	85
Anexo V: Informe de análisis del experimento 1RE1.....	86
Anexo VI: Informe de análisis del experimento 2RE1.....	87
Anexo VII: Informe de análisis del experimento E2.....	88
Anexo VIII: Informe de análisis del experimento 1RE2.....	89
Anexo IX: Informe de análisis del experimento 2RE2.....	90
Anexo X: Informe de análisis del experimento E3.....	91
Anexo XI: Informe de análisis del experimento 1RE3.....	92
Anexo XII: Informe de análisis del experimento 2RE3.....	93
Anexo XIII: Informe de análisis del experimento E4.....	94
Anexo XIV: Informe de análisis del experimento 1RE4.....	95
Anexo XV: Informe de análisis del experimento 2RE4.....	96
Anexo XVI: Prueba de hipótesis de la variable del tiempo de generación de biogás.....	97
Anexo XVII: Prueba de hipótesis de la variable calidad del biogás.....	100
Anexo XVIII: Panel fotográfico.....	103
Anexo XIX: Protocolo de monitoreo de biosólidos aprobado con Resolución Ministerial N°093-2018- Vivienda.....	106

RESUMEN

El inadecuado manejo de lodos residuales en la ciudad de Sandia ha provocado impactos negativos en la salud pública y el entorno ambiental, evidenciando la urgencia de implementar alternativas de tratamiento sostenible. El estudio tuvo como objetivo de evaluar la influencia de la relación carbono-nitrógeno en el tiempo de generación y calidad del biogás producido a partir de mezcla de estiércol y lodos residuales de la PTAR – Sandia 2024. La metodología consistió en caracterización de lodos, evaluando los parámetros de humedad, pH y relación carbono-nitrógeno, para esto, se tomó una muestra compuesta conforme a la normativa vigente dispuesta por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento respecto al manejo de lodos residuales, se ejecutaron cuatro experimentos utilizando un diseño factorial 2^k , variando la relación carbono-nitrógeno y el contenido de humedad, con tres réplicas por tratamiento, en los experimentos E1 y E2 se utilizó una relación C-N de 20/1 y un nivel de humedad del 45% y 55% de humedad, mientras que en los experimentos E3 y E4 se utilizó una relación C-N de 30/1 con los mismos niveles de humedad. El tiempo de retención hidráulica promedio fue de 41, 44, 50 y 48 días respectivamente, por otro lado, las concentraciones medias de metano alcanzadas fueron 55.24%, 55.08%, 35.39% y 42.10%, respectivamente, los resultados fueron analizados mediante ANOVA de dos factores, para evaluar la significancia estadística de los factores experimentales. Se concluye que la relación C-N más significativa fue de 20/1, con un tiempo de 41 días en promedio y la calidad de biogás de 55.23% de concentración de metano. Los hallazgos confirman que los lodos residuales tienen potencial para su tratamiento por biodigestores anaeróbicos.

Palabras clave: Calidad del biogás, estiércol, lodos residuales, relación carbono - nitrógeno, tiempo de generación.

ABSTRACT

The inadequate management of sewage sludge in the city of Sandia has caused negative impacts on health and the environment, highlighting the need to implement sustainable treatment alternatives. The study aimed to evaluate the influence of the carbon-nitrogen ratio on the generation time and quality of biogas produced from a mixture of manure and residual sludge from the Sandia 2024 Wastewater Treatment Plant. The methodology consisted of sludge characterization, evaluating the parameters of moisture, pH, and carbon-nitrogen ratio. For this, a composite sample was taken according to the current regulations established by the Ministry of Housing, Construction, and Sanitation regarding the management of residual sludge. Four experiments were carried out using a 2^k factorial design, varying the carbon-nitrogen ratio and moisture content, with three replicates per treatment. In experiments E1 and E2, a C-N ratio of 20:1 and a moisture level of 45% and 55% were used, while in experiments E3 and E4, a C-N ratio of 30:1 was used with the same moisture levels. The average hydraulic retention time was 41, 44, 50, and 48 days, respectively. The average methane concentrations achieved were 55.24%, 55.08%, 35.39%, and 42.10%, respectively. The results were analyzed using a two-way ANOVA to evaluate the statistical significance of the experimental factors. The most significant C-N ratio was 20:1, with an average retention time of 41 days and a biogas quality of 55.23% methane concentration. These findings confirm the potential of sewage sludge for treatment in anaerobic digesters.

Keywords: *Biogas quality, manure, sewage sludge, carbon-nitrogen ratio, generation time.*

INTRODUCCIÓN

El incremento de los gases de efecto invernadero se reconoce hoy como los causantes del calentamiento global (Hurtado, 2023). La fuerte dependencia que existe a nivel global de los combustibles fósiles, en específico del petróleo, no solo ha agravado la problemática ambiental, sino que también ha generado consecuencia social y económica relacionados a su paulatina escasez. Frente a esta problemática, la búsqueda de alternativas energéticas sostenibles se convierten en una necesidad urgente para reducir la contaminación atmosférica y avanzar hacia un desarrollo más responsable con el medio ambiente (Castro & Flores, 2019).

Una de las tecnologías con mayor futuro en este campo es la digestión anaerobia, proceso biológico mediante el cual comunidades microbianas convierten la materia orgánica compleja en biogás, composición compuesta principalmente por metano (Grangeiro et al., 2019), la digestión anaerobia constituye una alternativa eficiente para la gestión sostenible de residuos y se aplica ampliamente en el tratamiento de aguas residuales, este proceso permite disminuir los costos operativos y el consumo energético, paralelamente, genera biogás con un elevado poder calorífico, que puede utilizarse para generar electricidad, favoreciendo así la autosuficiencia energética de las plantas de tratamiento (Huang, 2024).

Los lodos residuales no estabilizados plantean riesgos importantes para la salud pública y el medio ambiente debido a la presencia de metales pesados, microorganismos patógenos y vectores de enfermedades (Castellanos et al., 2018), en entornos urbanos; en este contexto, la digestión anaerobia se considera una tecnología eficaz para tratar lodos con alta carga orgánica, estabilizándolos y reduciendo su impacto ambiental (Hernandez et al., 2014).

En lo que respecta a la planta de tratamiento de aguas residuales de Sandia, los lodos producidos demandan un tratamiento y manejo adecuado que no solo asegure su estabilización, sino que también profundice su potencial energético. Se propuso que la adición de estiércol de ovino mejore la relación carbono – nitrógeno, lo que hizo posible optimizar el proceso de la digestión anaerobia e incrementar la calidad de biogás producido. En consecuencia, la investigación plantea el objetivo principal de evaluar la influencia de la relación carbono – nitrógeno en el tiempo de generación y calidad del biogás producido a partir de la mezcla de estiércol y lodos residuales de la PTAR – Sandia 2024.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Situación problemática.

La generación y disposición de lodos residuales representa un problema ambiental de gran relevancia debido a su contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero (Bahamón, 2019), los cuales intensifican el cambio climático, considerado uno de los problemas globales más graves que enfrentará la humanidad en las próximas décadas, manifestado en el aumento de la temperatura media global, el derretimiento de los glaciares, las sequías prolongadas y la mayor frecuencia de inundaciones (Iglesia et al., 2016). Según proyecciones del IPCC, si no se implementan medidas eficaces para mitigar las emisiones, la temperatura media del planeta podría incrementarse entre 3 y 5 °C hacia finales del siglo XXI (Pachauri et al., 2014).

En las plantas de tratamiento de aguas residuales, la generación de lodos constituye uno de los mayores retos para su gestión, dado que su manejo y disposición final implican elevados costos operativos (Oropeza et al., 2006). Una gestión inadecuada puede ocasionar impactos ambientales significativos, especialmente por la emisión de gases como metano y dióxido de carbono. En Lima, por ejemplo, se producen más de 2500 toneladas diarias de lodos con alto contenido de humedad (Espinoza & Santos, 2021), los cuales están clasificados como residuos peligrosos de acuerdo a la normativa vigente (Castrejón & Barrios, 2000). Frente a esta problemática, resulta fundamental buscar soluciones de tratamiento que sean no solo técnica y económicamente viables, sino también ambientalmente sostenibles (Kalloum et al., 2011).

Los desechos de la ganadería, como el estiércol, representan una proporción de biomasa, y su reciclaje es significativo por motivos económicos y ambientales (Xavier & Junior, 2010). El uso intensivo de los combustibles fósiles como fuentes principales de energía ha contribuido al cambio climático y a la degradación ambiental; ante el incremento en el valor económico del petróleo y del gas natural, el biogás se presenta como una alternativa energética sostenible (Dennis, 2015). Este gas puede generarse en plantas de tratamiento de aguas residuales (Udaeta et al., 2019); sin embargo, a pesar de su potencial, su aprovechamiento sigue siendo limitado, aunque contribuye a la sostenibilidad y a la mitigación del cambio climático (Mantilla, 2021). La eficiencia del

proceso depende, entre otros factores, de la relación C-N, se ha determinado que proporciones de 20 o 30 favorecen la actividad microbiana y optimizan la producción de metano, mejorando la calidad y reduciendo los tiempos de generación del biogás (Varnero, 2011).

El tiempo de degradación de los lodos residuales de la PTAR en biodigestores anaerobios suele ser muy largo, especialmente durante la etapa de producción de biogás. Por lo tanto, se investigó la relación carbono-nitrógeno óptima con el objetivo de mejorar la etapa metanogénica en la digestión anaerobia. En este contexto, el estudio busco generar soluciones claras direccionadas a la minimización de emisiones de gases de efecto invernadero utilizando lodos residuales y estiércol a través de la digestión anaerobia que produce biogás. El objetivo principal fue evaluar la influencia de la relación carbono – nitrógeno en el tiempo de generación y la calidad de biogás producido a partir de estiércol y lodos residuales de la PTAR – Sandia 2024. Con este fin, se realizó la caracterización de lodos residuales para determinar la relación de entre sustrato y agua, contribuyendo a mejorar la eficiencia del proceso y mejorando el potencial de valorización energética de dichos residuos.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cuál es la influencia de la relación carbono – nitrógeno en el tiempo de generación y calidad del biogás producido a partir de la mezcla de estiércol y lodos residuales de la PTAR – Sandia 2024?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuáles son las características físico – químicas de los lodos residuales de la PTAR - Sandia 2024?
- ¿Cuál es la relación óptima de carbono – nitrógeno con influencia en el tiempo de generación del biogás producido a partir de estiércol y lodos residuales de la PTAR – Sandia 2024?
- ¿Cuál es la relación óptima de carbono – nitrógeno con influencia en la calidad del biogás producido a partir de estiércol y lodos residuales de la PTAR – Sandia 2024?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la influencia de la relación carbono – nitrógeno en el tiempo de generación y calidad del biogás producido a partir de la mezcla de estiércol y lodos residuales de la PTAR – Sandía 2024.

1.3.2. Objetivos específicos

- Evaluar las características físico – químicas de lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Sandía 2024.
- Determinar la relación óptima de carbono – nitrógeno con influencia en el tiempo de generación del biogás a partir de estiércol y lodos residuales de la PTAR – Sandía 2024.
- Determinar la relación óptima de carbono – nitrógeno con influencia en la calidad del biogás producido a partir de estiércol y lodos residuales de la PTAR – Sandía 2024.

1.4. Justificación

1.4.1. Justificación ambiental

El trabajo de investigación tiene su fundamento ambiental, desde el enfoque que le dará una valorización material a los lodos provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Sandia, al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero principalmente metano y dióxido de carbono liberadas por los lodos residuales, el metano es un gas potencial en contribuir el efecto invernadero en nuestro planeta, de esta manera beneficiará a la población sandina en general al hacer una adecuada gestión de los lodos residuales, como también disminuyendo el impacto ambiental al suelo, aire y agua que genera la mala disposición del mismo.

1.4.2. Justificación social

La población de Sandia ha venido sufriendo por la inadecuada disposición de lodos residuales, principalmente debido al mal olor que estos generan al estar próximo a la carretera de código PE-34H, generando incomodidad entre los habitantes más cercanos como la ciudad en general. Ante esta situación, el presente trabajo de investigación busca contribuir a reducir significativamente los malos olores y, en consecuencia, mejorar el bienestar de las personas que residen en esta ciudad. Para ello, se propone el uso de biodigestores que permita transformar la inadecuada disposición de lodos residuales en una gestión adecuada, asegurando así un entorno más saludable y socialmente aceptable.

1.4.3. Justificación económica

La producción de biogás trae consigo una relación costo beneficio positivo, ya que evita usar tecnologías más costosas para el tratamiento de lodos residuales, evitando así los impactos ambientales negativos generados por este, como también genera como fertilizantes en los biodigestores siguientes que cuentan en la ciudad de Sandia, así evitando un costo de dichos fertilizantes químicos, como a su vez el biogás obtenido podrá ser usado para el consumo de los ciudadanos de Sandia, utilizándolo para cocción de sus alimentos u otros, así reduciendo el gasto de las familias sandinas.

1.4.4. Justificación técnica

La biomasa de lodos residuales ostenta un enorme potencial para la elaboración de biogás, esta es una técnica de energías limpias que se realiza de manera diaria pero no se obtienen un tiempo y calidad deseable por lo que el uso de estiércol de ovino contiene características que lo hace capaz para ser usado para generar biogás mediante su fermentación anaerobia con el uso de biodigestores, además, de atender muy bien a la codigestión con otros residuos (Pimentel et al., 2019), por lo tanto, se considera que la aplicación de este estiércol reducirá el tiempo de producción de biogás y mejorara la calidad del mismo, ya que enriquecerá la relación carbono – nitrógeno, se considera muy conveniente aplicarlo para acelerar el proceso de obtención de biogás en tiempos menores.

CAPITULO II

REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes internacionales

Pimentel et al. (2019), determinaron la producción de biogás utilizando tres diferentes manejos de estiércol como también produjeron el bioabono, usando un reactor de geomembrana, evaluando así los tres diferentes métodos de acondicionar el estiércol de ovino en tres modalidades: fresco triturado, fresco sin tratamiento y seco molido, cada uno de ellos se evaluó durante un mes y registraron la generación diaria de biogás. La mayor generación de biogás ($1.20 \text{ m}^3 / \text{día}$) se obtuvo a partir del estiércol fresco triturado, siendo estadísticamente superior a la registrada con estiércol fresco sin tratamiento ($0.86 \text{ m}^3 / \text{día}$) y con estiércol seco molido ($0.75 \text{ m}^3 / \text{día}$), trabajando con una relación de carbono – nitrógeno de 26/1, obteniendo el tiempo de retención hidráulica de 40 días.

Hernández et al. (2024), evaluaron la codigestión anaerobia de mezclas de residuos agroindustriales para la producción de biogás. Utilizaron tres tipos de mezclas: pulpa de tomate con orujo de aceituna (TP-OC), orujo de manzana con orujo de aceituna (AP-OC) y pulpa de tomate con orujo de manzana (TP-AP), en proporción de 1:1, empleando estiércol de bovino como inóculo. Luego de 7 a 12 días, se observó que la mezcla TP-OC alcanzó hasta un 70% de metano, seguida por AP-OC con 62% y TP-AP con 69% de metano.

Kalloum et al. (2011), estudiaron la calidad de biogás y tiempo de generación, abordaron el tratamiento y la valorización de los lodos emitidos desde la planta municipal de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Adrar (suroeste de Argelia), en sus resultados se observaron actividades biológicas agudas del sustrato crudo ($1.67 \text{ gérmenes} / 1 \text{ mL}$). El lodo diluido con un contenido de 16 g/L de sólidos totales (ST), se fermentó en un digester de una capacidad de una cama en condiciones anaeróbicas durante 33 días. La cantidad de biogás producido fue 280.31 mL , obteniendo una calidad del biogás de 45% de metano.

Xavier y Junior (2010), evaluaron el tiempo de generación de biogás, utilizando la adición de inóculo en la digestión anaeróbica de estiércol de ganado lechero reciclado en digestores discontinuos por rendimiento de biogás, reducción de sólidos volátiles y producción potencial de biogás para obtener parámetros de diseño, para ello utilizaron doce digestores por lotes de campo (60 L cada uno) llenos de estiércol de ganado lechero, agua y cuatro adiciones de inóculo diferentes (0, 20, 30, 40%). Adaptaron tiempos promedio de retención hidráulica de 75 y 150 días para los tratamientos con y sin inóculo, respectivamente. El mayor potencial de producción de biogás se obtuvo utilizando el 40 % del inóculo, con uso rápido de biogás a partir de los cuatro días. Se pueden adoptar tiempos de retención hidráulica de 45 días, lo que reduce el volumen del digestor y los costos de implementación.

Sandoval et al. (2020), analizaron la cantidad y calidad del biogás, preparando inóculos microbianos que optimicen la producción de biogás a partir de fangos residuales de desechos de un camal, el biogás producido por consorcios intactos y cepas microbianas aisladas a partir de nueve estratos de 15 cm de espesor acumulados en el gradiente vertical de un colector de residuos de camal de 135 cm de profundidad. Dos de las siete cepas productoras de biogás, de un total de 36 cepas microbianas aisladas, así como un consorcio intacto, generaron metano en concentraciones superiores al 87% después de 28 días de incubación, un inóculo evaluado registró una de la más alta producción de biogás y con una concentración de 95.17 % de metano.

Cadena y Malpica (2019), evaluaron la producción de biogás, a partir de lodos residuales de la PTAR Villas del Nuevo Siglo, inicialmente realizaron la caracterización físico – químico, obteniendo como resultado que el lodo no era rico en carbono, incluyeron un estiércol de gallinaza llegaron a las relaciones de C-N de 20/1 y 30/1, continuamente construyeron dos sistemas de digestión iguales. Respecto a los resultados obtenidos en la producción de biogás, bajo condiciones iniciales de pH 6.5 y relaciones C-N de 20/1 y 30/1, se registraron volúmenes acumulados de metano de 8.144 L y 10.337 L, respectivamente. De manera similar, cuando el pH inicial fue de 7.5 y las relaciones C-N fueron de 20/1 y 30/1, los volúmenes totales de metano alcanzaron 8.272 L y de 10.545, respectivamente.

Kavisa et al. (2020), investigaron los efectos de las relaciones carbono - nitrógeno (C-N) de 25/1 y 30/1 en la producción de biogás utilizando diferentes métodos de tratamiento: pretratamiento físico (con o sin molienda), pretratamiento biológico (con o sin 5% v/v de comunidad microbiana) y control del pH. La mayor acumulación de biogás (73.167 ml/g TS) se obtuvo cuando la relación C-N fue 30, pretratado con NaOH, comunidad microbiana y residuos de té sin moler. Cuando la relación C-N fue de 25, la producción de biogás se mantuvo hasta el día 23 y luego disminuyó gradualmente hasta el día 37. En la pulpa de té cruda con una relación C-N de 30, el rendimiento se mantuvo hasta el día 22, luego fluctuó hasta el día 28 y luego disminuyó hasta el día 40. En el residuo de té fino con una relación C-N de 30, la producción de biogás se mantuvo estable hasta el día 30 y luego disminuyó gradualmente hasta el día 40.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Rossana et al. (2019), evaluó el tiempo de generación de biogás, construyendo un biodigestor de 3 L de capacidad, en el cual se introdujeron 1.5 Kg de lodo flotante con el fin de dar inicio al proceso de digestión anaerobia. Este reactor permaneció sellado herméticamente y contó, con un sistema de medición de presión, así como un mecanismo para la captación y almacenamiento de biogás generado. Tras un período de digestión de 45 días, se obtuvo un volumen total de 12.08 L de biogás, el cual se encontraba comprimido en el interior del biodigestor a una presión de 7.2 bar. Asimismo, se tomaron muestras para el análisis de la concentración de metano registrándose una concentración promedio de 84.01% en el biogás producido.

Castro y Flores (2019), estudiaron la generación de biogás, mediante el desarrollo del proceso anaerobio primario a partir de lodos provenientes de la planta de tratamiento del distrito de Comas, se instalaron 6 biodigestores con un volumen útil de 20 L, en cada reactor se trabajó con dos tipos de muestras, considerando 3 repeticiones por tratamiento, las mezclas se prepararon 1.7 y 1.2 Kg de lodo, respectivamente, con 500 gramos de residuos vegetales finalmente picados (cáscara de papa, hojas de beterraga), el tiempo de retención hidráulica se estableció en 60 días, manteniéndose una temperatura promedio de 19 °C, la

composición de metano más óptimo que obtuvieron fue con una concentración de 57%.

García (2021), evaluó el tiempo de generación y producción de biogás, con los avances en la Co – Digestión anaerobia de lodos de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en la producción de biogás, los reactores más usados son reactor anaeróbico de flujo ascendente, reactores de tanque agitado semicontinuo y experimentos por lotes potencial bioquímico de metano, con tiempos de retención hidráulica de 36.2 días, rangos de producción de metano es de 50.3 mL a 4500 mL, utilizando de inóculos los lodos digeridos de plantas de tratamiento de aguas residuales, bajo una temperatura de 39 °C.

2.1.3. Antecedentes regionales

Huanca (2017), produjo biogás a partir de los lodos transportados por las aguas residuales urbanas de la ciudad de Puno fue analizada considerando variables operativas como la temperatura, presión, agitación y tiempo de retención hidráulica, asimismo, se examinaron la carga orgánica, pH y propiedades fisicoquímicas de los lodos provenientes de las aguas residuales. Como resultado del estudio. Se determinó un tiempo de retención de 43 días, una temperatura media de 27.4 °C con una presión registrada de 214.5 cm³.

Velásquez (2022), evaluó el efecto de la temperatura en el proceso de obtención de biogás a partir de lodos en lagunas de estabilización en la ciudad de Juliaca, donde se tomaron 31 muestras puntuales por cada laguna, los mismos que se distribuyeron en dos grupos (temperatura ambiente y temperatura acondicionada con cobertura). Los resultados demostraron que obtuvo una relación de carbono - nitrógeno de 19.5, bajo condiciones de temperatura controlada mediante cobertura, la generación de biogás se inició a los 53 días posteriores a la instalación del sistema, alcanzándose un volumen acumulado de 15.4 L. Durante este período, la temperatura operativa se mantuvo dentro de un rango comprendido entre 293.52 K a 301.15 K, en contraste, cuando el sistema operó a temperatura ambiente, la producción de biogás a los 66 días de funcionamiento, registrándose un volumen acumulado de 5.3 L, con temperaturas que variaron entre 285.08 K – 296.92 K.

Cuba (2015), analizaron la cantidad y calidad del biogás, aplicando el proceso experimental se desarrolló a escala de laboratorio, utilizando biodigestores con un volumen de trabajo de 3L, cada reactor operó bajo condiciones mesofílicas, manteniendo una temperatura de $37\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5$, y se estableció un tiempo de retención hidráulica de 28 días, asimismo adicione el carbonato de calcio a cada biodigestor, el sustrato se introdujo a los dos primeros la cantidad de 1.5, a los dos siguientes 2.5 kg de lodo, el carbonato de calcio se adhirió en el orden de 0.025, 0.050, 0.075 y 0.1 kg, obteniendo un resultado de gas metano de 64%, 62%, 58% y 66% respectivamente.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Estiércol

El estiércol corresponde a un residuo orgánico compuesto por la combinación de excretas de animales, principalmente heces y orina, junto con el material utilizado como cama o lecho. Este residuo se caracteriza por presentar una consistencia que permite su manipulación y almacenamiento en estado sólido. El estiércol también contiene heces y orines adicionalmente puede estar combinado con otros elementos, como son: las camas de establo, generalmente paja que es la más habitual, como también puede contener aserrín, virutas de madera, papel reciclado hasta incluso ciertos productos químicos o de diferentes actividades antropogénicas (Martínez, 2005).

El estiércol es uno de los residuos orgánicos de fácil disponibilidad en zonas rurales, la mayor fracción posee características que los hace aptos para ser usados como parte de sustratos de la producción de biogás por medio de su fermentación anaerobia mediante el empleo de biodigestores, además de favorecer a la codigestión con otro tipo de residuos (Pimentel et al., 2019)

2.2.2. Estiércol de ovino

El estiércol de ovino se caracteriza por su elevado contenido de nutrientes esenciales ya sea como: fosforo, potasio, nitrógeno, calcio, magnesio y azufre, lo cual lo hace en un fertilizante natural de muy alto valor agrícola y como potencial sustrato para la fermentación anaerobia. Gracias a la rápida descomposición dichos elementos pueden ser aprovechados fácilmente,

asimismo, incentiva la actividad de microorganismo beneficiosos, lo que aumenta la biodiversidad (Arenas et al., 2021).

2.2.3. Lodos residuales

Los lodos producidos durante el tratamiento de aguas residuales corresponden a un complejo biológico constituido por agua, compuesto orgánicos, contaminantes de naturaleza orgánica e inorgánica potencialmente tóxicos, así como microorganismos tanto activos como inactivos. Si bien los lodos residuales representan una pequeña parte del volumen total del agua residual tratada, el costo del tratamiento solo del lodo es alrededor del 50% de los costos operativos de toda la planta de tratamiento de aguas residuales. (Torre, 2018). El lodo residual es el componente de mayor importancia que se elimina en el tratamiento de aguas residuales, lo que significa que también representa una gran dificultad en su manejo y eliminación (Luque, 2017).

2.2.4. Tipos de lodos

Las particularidades del lodo cambian ampliamente, ya que dependen de las aguas residuales predominantes, especialmente del tipo de efluente ya sea industrial o municipal que se descarguen en los sistemas de alcantarillado (Canziani & Spinosa, 2019).

Se pueden identificar tres categorías principales de lodos residuales: primaria, activada por desechos o secundaria y química o terciaria.

A. Lodo primario

Los lodos primarios se producen mediante tratamiento mecánico y preliminares, normalmente contienen una gran cantidad de materia orgánica fácilmente degradable, por lo tanto, tiene una alta capacidad de producción de biogás en el proceso de digestión anaeróbica y también tiene un buen rendimiento de deshidratación (Canziani & Spinosa, 2019).

B. Lodo secundario

Posterior a los tratamientos primarios, las aguas residuales todavía poseen potencial contenido de materia orgánica biodegradable, el cual debe ser reducido con el fin de evitar la contaminación del cuerpo de agua o del suelo receptor, por lo tanto, la misión de los tratamientos secundarios es la supresión de dicha materia orgánica biodegradable, la cual se manifiesta en términos de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) o demanda química biodegradable de oxígeno (DBOC) (Canziani & Spinosa, 2019).

C. Lodo terciario

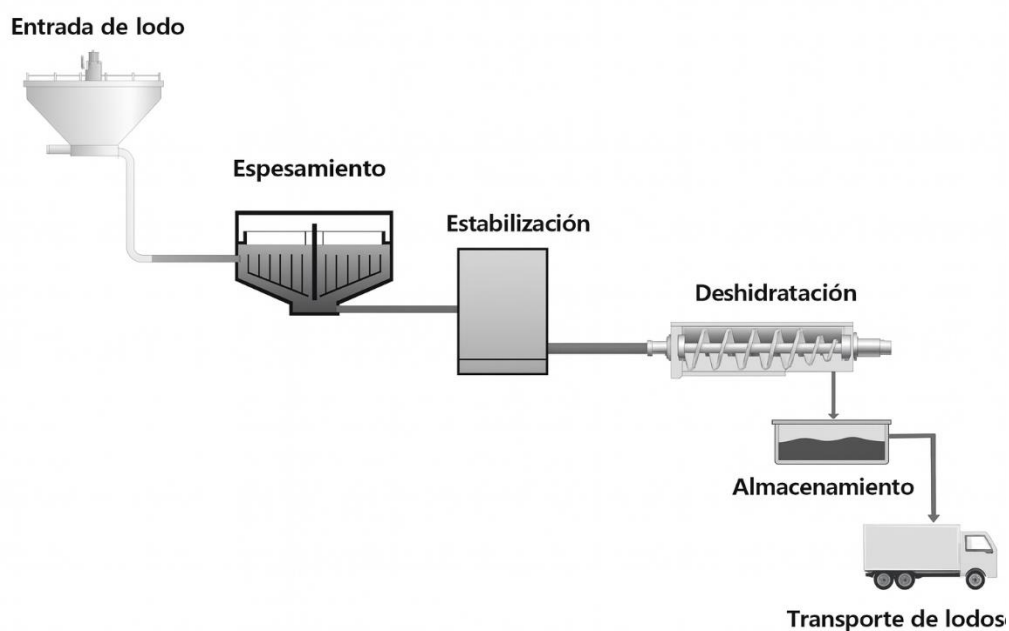
Los lodos terciarios o químicos se producen durante los procesos de eliminación de nutrientes químicos o procesos de tratamiento terciario destinados a mejorar la disposición final de las aguas residuales; en este contexto, sistemas de tratamiento como la coagulación y la floculación, seguidas de la sedimentación o más comúnmente la filtración, producen sólidos que no deben ser tratados con otros tipos de lodos, ya que estos lodos tienen características propias y reaccionarán a todos los tratamientos a los que hayan sido sometidos desde su entrada en la planta (Canziani & Spinosa, 2019).

2.2.5. Tratamiento de lodos

El tratamiento de aguas residuales genera subproductos, de los cuales los lodos primarios y secundarios son los más importantes debido a su alto contenido orgánico, por lo que deberán eliminarse conforme a la normativa vigente (Rojas, 2002). El tratamiento de los lodos empieza con un proceso de espesamiento, posteriormente se pasa a una fase de estabilización, orientada a aprovechar mejor la energía y los nutrientes presentes, reduciendo los malos olores, finalmente, se lleva a cabo la deshidratación, proceso en el que se extrae el exceso de agua y facilita el transporte del lodo (Cárdenas & Molina, 2022). En la figura 1 se muestra el flujograma de tratamiento de lodos.

Figura 1

Tratamiento de lodos residuales por fases

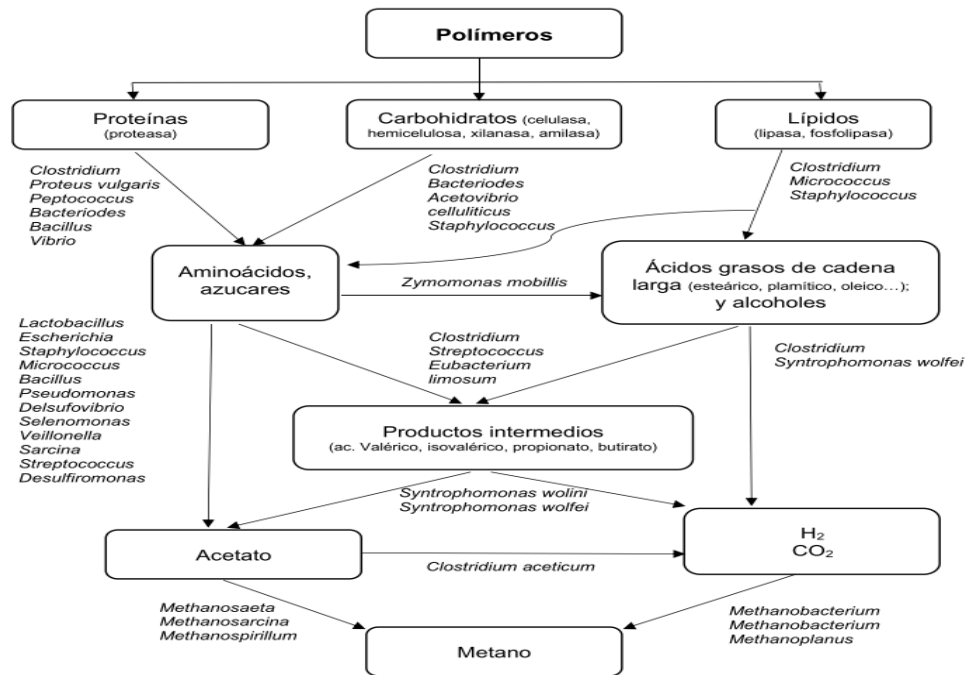


Nota. El flujograma muestra las etapas de tratamientos de lodos residuales hasta su aprovechamiento o disposición final. Tomado de Cárdenas y Molina (2022).

2.2.6. La digestión anaerobia

La digestión anaeróbica se utiliza para tratar residuos biodegradables y lodos generados por plantas de tratamiento de aguas residuales, reduciendo así las emisiones de gases de efecto invernadero, ya que este proceso, se basa en cultivos energéticos como el maíz y produce biogás, cuyos principales componentes son metano, dióxido de carbono y otros gases, este biogás puede utilizarse como combustible, calor y energía, o convertirse en biometano, que tiene propiedades similares al gas natural, adicionalmente, el digestato resultante también puede servir como fertilizante rico en nutrientes (Baredar et al., 2020). Tal como se observa en la figura 2.

Figura 2
 Descripción esquemática de las reacciones en la digestión anaerobia



Nota. El diagrama presenta las fases fundamentales que conforman el proceso de digestión anaerobia, entre las cuales se incluyen la hidrólisis, fermentación, acetogénesis y metanogénesis, que convierten la materia orgánica compleja en biogás compuesto principalmente en dióxido de carbono y metano. Tomado de Rumiche (2021).

2.2.7. Biogás

El tratamiento adecuado de los residuos orgánicos se lleva a cabo a través de diversos procesos, incluida la recuperación de materiales orgánicos y la conversión en productos de valor añadido, lo cual ha generado una amplia aceptación del reciclaje orgánico, especialmente debido al alto costo de los fertilizantes, la exploración de nuevas opciones energéticas no convencionales y la búsqueda de alternativas de purificación y tratamiento de residuos (Varnero, 2011).

El biogás es una energía limpia renovable que se produce a partir de distintos tipos de biomasa, además de los cultivos energéticos, los residuos sólidos municipales, las aguas residuales y los desechos de la agricultura, la ganadería y algunas de las acciones industriales (Morero et al., 2017). Las comunidades

microbianas juegan un papel clave en la transformación de estos desechos orgánicos, especialmente dadas sus amplias respuestas a las moléculas de oxígeno, un componente clave de las células, lo cual permite establecer procesos biológicos en función de la presencia o ausencia de oxígeno para tratar de forma adecuada diversos residuos orgánicos (Varnero, 2011).

2.2.8. Proceso de elaboración de biogás

El análisis bioquímico y microbiológico de la degradación anaerobia de la materia orgánica se estructura en cuatro fases o etapas principales:

A. Hidrolisis

La sustancia orgánica polimérica debe ser hidrolizada en componentes solubles para que los microorganismos puedan degradarla, la hidrolisis constituye la etapa inicial del proceso de degradación anaeróbica, en la cual los sustratos orgánicos de estructura compleja son descompuestos en compuestos más simples, proporcionando los sustratos necesarios para la digestión anaeróbica. Este proceso es realizado por enzimas extracelulares producidas por microorganismos hidrolíticos (Varnero, 2011). Este proceso es llevado a cabo principalmente por microorganismos anaeróbicos, como *Bacteroides* y *Clostridium*, junto con la acción de bacterias facultativas, como *Streptococcus* (Parra Huertas, 2015).

B. Etapa fermentativa o acidogénica

En la etapa biológica de la acidogénesis, los componentes en exceso se descomponen aún más por bacterias acidogénicas (fermentativas), y durante esta etapa se producen ácidos grasos volátiles (VFA), así como amoníaco, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno y otros subproductos, asimismo, durante el proceso de acidogénesis, los monómeros solubles se convierten en compuestos orgánicos más pequeños, como ácidos de cadena corta (volátiles), cetonas (por ejemplo, glicerol y acetona) y alcoholes (Baredar et al., 2020).

C. Etapa acetogénica

La tercera fase de la digestión anaerobia es la acetogénesis, en la cual las moléculas sencillas constituidas por la etapa de acidogénesis se metabolizan aún más por medio de acetógenos para generar enormemente ácido acético, del mismo modo que dióxido de carbono e hidrogeno, ya que los productos intermedios de la acidogénesis son agredidos por bacterias acetogénicas; los resultados de la acetogénesis abarcan ácido acético, CO_2 , H_2 (Baredar et al., 2020).

D. Etapa metanogénica

En esta fase, las bacterias anaeróbicas actúan sobre los productos de fases anteriores, entre las cuales los microorganismos metanogénicos son los más importantes, ya que producen metano y completan la digestión anaeróbica, lo cual logran a partir de sustratos como acetato, H_2/CO_2 , formato, metanol y metilaminas (Varnero, 2011).

2.2.9. Composición físico – química del biogás

El biogás es una mezcla compuesta principalmente de metano y dióxido de carbono, además de pequeñas trazas de otros gases. La producción del biogás depende del sustrato utilizado (Varnero, 2011). Las características específicas se observan en la tabla 1

Tabla 1
Composición del biogás

Componentes	Contenido
Metano	55 – 70%
Dióxido de carbono	30 – 45%
Trazas de otros gases	Hidrogeno – Oxígeno – Sulfuro de Hidrogeno – Nitrógeno

Nota. Tomado de Fuentes y Vicente 2021, Varnero 2011.

2.2.10. Calidad del biogás

Se llama calidad de biogás, a aquel volumen de biogás que engloba en su composición de gases un 50% a 80% de gas metano, dióxido de carbono en un rango de 20 a 50%, ácido sulfhídrico < 4000 ppm, demás gases (H_2 , H_2O , NH_3) entre 1 – 5% y el poder calorífico de $5000 m^3$ (Montenegro, 2012).

2.2.11. Relación carbono - nitrógeno

La relación carbono-nitrógeno es un indicador que expresa la proporción de estos elementos en el suelo u otros materiales, que resultan esenciales para el crecimiento y los procesos biológicos, por lo tanto, una alta relación de carbono con respecto al nitrógeno indica que afecta directamente la actividad de los microorganismos y la descomposición de la materia orgánica, en cambio, cuando la relación C-N es menor o igual a 10 la descomposición ocurre con facilidad, mientras que valores mayores a 30 dificultan el proceso de descomposición (Días, 2019). La relación C-N varía en los lodos residuales según al tipo de actividad que desarrolla la población, ya que según el autor Varnero (2011) menciona que su relación de C-N es de 3/1, sin embargo, otros autores como Kabbashi (2011) menciona que es de 7/1. Las relaciones de carbono nitrógeno de animales se muestra en la tabla 2.

Tabla 2
Valores promedios aproximados de relación C-N en residuos animales

MATERIALES	Contenido de carbono (%)	Contenido de nitrógeno (%)	Relación C-N
Residuos animales			
Estiércol de bovino	30	1.3	25/1
Estiércol de equino	40	0.8	50/1
Estiércol de vino	35	1	35/1
Estiércol de porcino	25	1.5	16/1
Estiércol de caprino	40	1	40/1
Estiércol de conejo	35	1.5	23/1
Estiércol de gallina	35	1.5	23/1
Estiércol de pato	38	0.8	47/1
Estiércol de pavo	35	0.7	50/1
Excretas humanas	2.5	0.85	3/1

Nota. Tabla obtenida de Varnero (2011).

Con el fin de analizar las características de los residuos vegetales, en la tabla 3 se presenta los valores promedio aproximados de la composición de carbono, nitrógeno y la relación C-N de diferentes materiales.

Tabla 3
Valores representativos de la relación C-N en residuos de origen vegetal

MATERIALES	Contenido de carbono (%)	Contenido de nitrógeno (%)	Relación C-N
Residuos vegetales			
Paja de trigo	46	0.53	87/1
Paja de cebada	58	0.64	90/1
Paja de arroz	42	0.63	67/1
Paja de avena	29	0.53	55/1
Rastrojos de maíz	40	0.75	53/1
Residuos de leguminosas	38	1.5	28/1
Residuos de hortalizas	30	1.8	17/1
Residuos de tubérculos	30	1.5	20/1
Hojas secas	41	1	41/1
Aserrín	44	0.06	730/1

Nota. Tabla obtenida de Varnero (2011).

2.2.12. Otros parámetros importantes en la producción de biogás

A. Temperatura

La temperatura es un factor crítico en la producción de biogás, ya que afecta la descomposición de la materia orgánica y la actividad microbiana, por lo que un aumento de temperatura acelera las reacciones bioquímicas, haciendo que el proceso sea más eficiente, y según la FAO, existen tres rangos de temperatura (psicrófilo, mesófilo y termófilo) que pueden utilizarse como referencia para estimar el tiempo de fermentación, aunque las fluctuaciones repentinas de temperatura pueden hacer que el sistema sea inestable, motivo por el cual se recomienda un control constante de la temperatura, siendo el rango de temperatura media el más utilizado debido a que proporciona un buen equilibrio entre estabilidad y producción de biogás (Cadena & Malpica, 2019). Los rangos de temperatura se presentan en la tabla 4.

Tabla 4

Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica

Tipo de régimen térmico	Temperatura mínima (°C)	Intervalo óptimo (°C)	Temperatura máxima (°C)	Tiempo de fermentación
Psicrófilo	4 - 10 °C	15 - 18 °C	20 - 25 °C	Alrededor de 100 días
Mesófilo	15 - 20 °C	25 - 35 °C	35 - 45 °C	30 - 60 días
Termófilo	25 - 45 °C	50 - 60 °C	75 - 80 °C	10 - 15 días

Nota. Tabla obtenida de Cadena y Malpica (2019).

B. Tiempo de retención hidráulica (TRH) y de carga orgánica aplicada.

La carga diaria de sustrato orgánico en el biodigestor es inversamente proporcional al tiempo de retención, por lo que ambos parámetros son fundamentales en el diseño del sistema, ya que determinan la capacidad del biodigestor; además, la materia orgánica o sólidos volátiles (VS) representa la porción de sólidos totales (ST) que se evapora por encima de 550 °C, y en el caso del estiércol animal, el contenido de materia seca (MS) no debe superar el 10 %, razón por la cual normalmente se requiere dilución, mientras que la eficiencia del biogás depende de la concentración de materia seca, que oscila entre el 1 % y el 30 % y se ve afectada principalmente por la temperatura (Varnero, 2011). La tabla 5 muestra el tiempo de retención hidráulica según los climas.

Tabla 5

Tiempo de retención hidráulico de estiércol de ganado en distintos climas

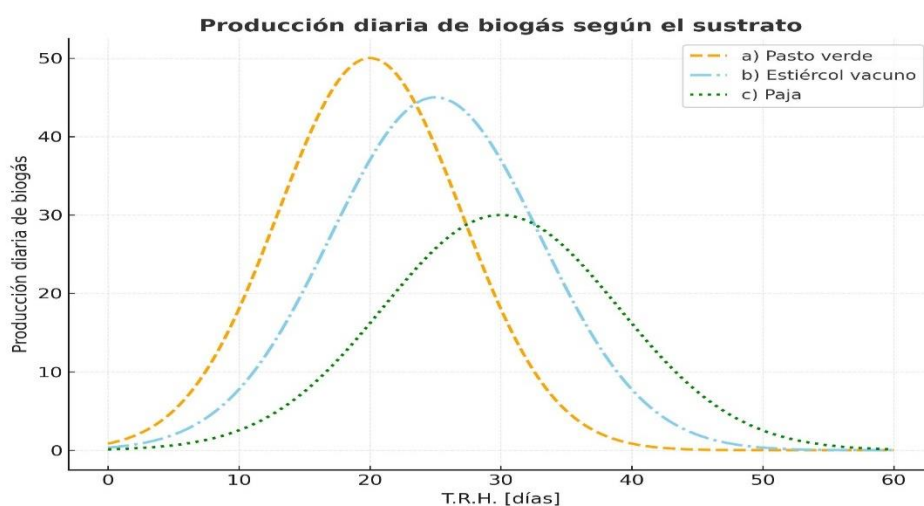
Duración aproximada del TRH	Condiciones climáticas y ejemplos de regiones
30 – 40 días	Clima tropical con regiones planas. Ej. Venezuela, Indonesia, países de América Central.
40 – 60 días	Regiones cálidas con inviernos fríos cortos. Ej. Etiopía, India, Filipinas.
60 – 90 días	Clima templado con inviernos fríos. Ej. Corea, Turquía, China.

Nota. Tabla obtenida de Delgado (2018).

Los materiales con alto contenido de carbono en moléculas resistentes como la celulosa y la lignina generalmente requieren TRH más altos para su digestión, dependiendo del tipo de sustrato. La figura 3 muestra la relación entre el TRH y la producción diaria de gas en sustratos.

Figura 3

Producción diaria de biogás y TRH de diferentes sustratos.



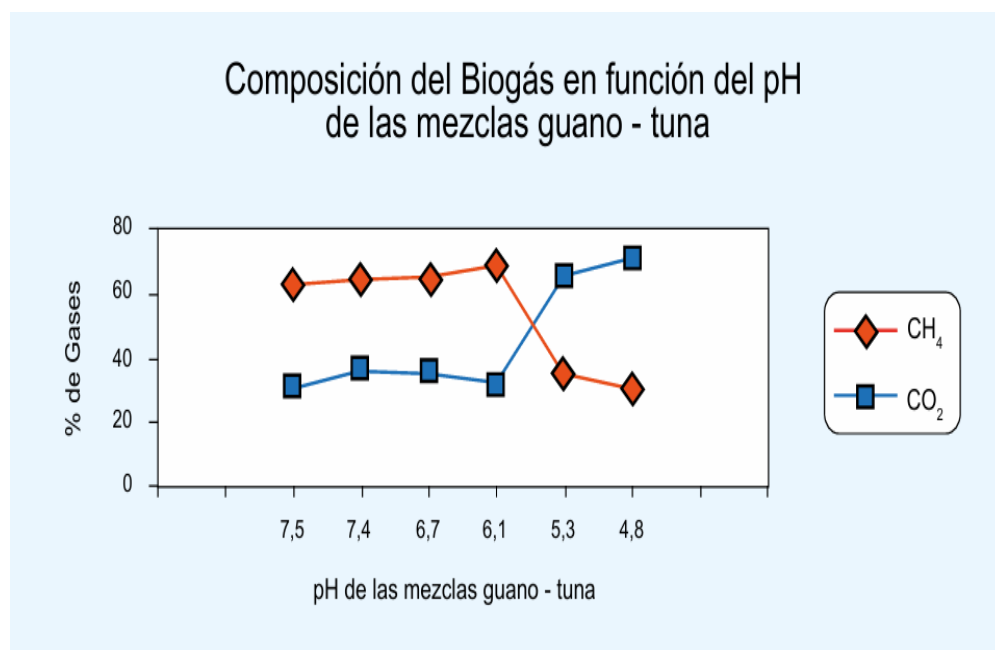
Nota. La figura compara la producción de biogás durante el tiempo de retención hidráulica empleando distintos sustratos: a) pasto verde, b) estiércol vacuno y c) paja de arroz. Tomada de García (2015).

C. Rangos de pH y alcalinidad

Los procesos anaeróbicos son muy sensibles a las fluctuaciones del pH, especialmente los metanógenos, que son más susceptibles que los acidógenos, ya que el valor de pH óptimo para los microorganismos acidogénicos se encuentra entre 5.5 y 6.5, mientras que para los metanogénicos está entre 7.8 y 8.2, y en el caso de cultivos mixtos, el rango recomendado se sitúa entre 6.8 y 7.4, como se muestra en la figura 4; sin embargo, valores distintos del rango de 6.0 a 8.0 afectan negativamente el rendimiento como la calidad del biogás; por lo tanto, es fundamental mantener el pH en la neutralidad, con el propósito de evitar la reducción del contenido de metano (Varnero, 2011).

Figura 4

Composición del biogás en función del pH de la mezcla de materias primas



Nota. Composición de CH₄ y CO₂ en biogás según el pH, a pH neutro y básico predomina el metano, mientras que en condiciones ácidas predomina el dióxido de carbono, reflejando así la influencia del pH en la calidad de biogás. Figura obtenida de Varnero (2011).

D. Contenido de agua de la mezcla

La cantidad de biogás producido depende de la cantidad de agua en la mezcla; ya que si es demasiado baja, los microorganismos no pueden trabajar muy bien, mientras que si es demasiado alta, sólo se pueden digerir pequeñas cantidades de materia orgánica, por lo tanto, la relación ideal entre biomasa y agua varía de un material a otro, y oscila entre 1:1 y 1:3 para el estiércol, los fertilizantes y los residuos agrícolas, y entre 1:3 y 1:4 para los residuos vegetales, por lo tanto, el cumplimiento de estas condiciones es clave para una producción eficiente de biogás (Cadena & Malpica, 2019).

E. Nutrientes

Los microorganismos necesitan nutrientes como carbono, nitrógeno y fósforo para crecer, estas concentraciones deben superar las concentraciones mínimas requeridas para evitar la inhibición de metano – bacterias, además los materiales ricos en carbono se descomponen más lentamente, pero tardan más en producir biogás, por otro lado, los materiales con diferentes relaciones C-N pueden afectar significativamente la producción de biogás, siendo los

valores inferiores a 8:1 inhibirán la actividad bacteriana debido al exceso de amoníaco (Rossana et al., 2006).

F. Agitación

La homogenización en un biodigestor es un elemento clave, pues garantiza que el sustrato se distribuya por todo el sistema y las bacterias puedan interactuar eficazmente. Esto promueve una digestión mejor y más rápida de la biomasa, acorta el tiempo de retención hidráulica y acelera así la producción de biogás (García, 2015).

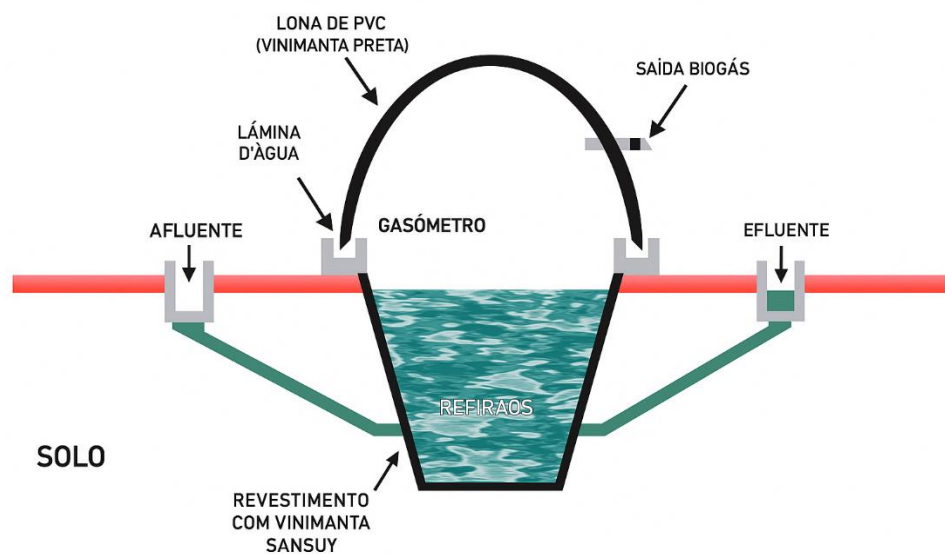
2.2.13. Tipos de biodigestores

Los biodigestores cambian considerablemente conforme a su complejidad y utilización, por lo que los más asequibles caen dentro de la distribución de digestores discontinuos o de cargas por lotes y los más complicados se identifican por tener dispositivos que acceden alimentarlos, suministrando calefacción y agitación; por esta razón, resulta conveniente organizarlos según su modo de ejecución con relación a su manutención o carga en los posteriores tipos (Varnero, 2011).

A. Continuo

Este tipo de biodigestores se puede mantener de forma continua, permitiendo la producción diaria de biomasa y reduciendo el tiempo de almacenamiento de residuos, por lo tanto, se puede asumir que la entrada corresponde a la salida o descarga del digestor, dando como resultado una producción de biogás constante durante todo el período, y dado que estos fermentadores suelen ser de gran tamaño, se requieren bombas para su alimentación, además de equipos adicionales para generar calor y movimiento, razón por la cual, se utilizan principalmente en industrias a gran escala, siendo el CSTR el reactor químico más representativo para dichas plantas de biogás (Patiño & Ramírez, 2018). Tal como se observa en la figura 5.

Figura 5
Esquema de biodigestor de flujo continuo

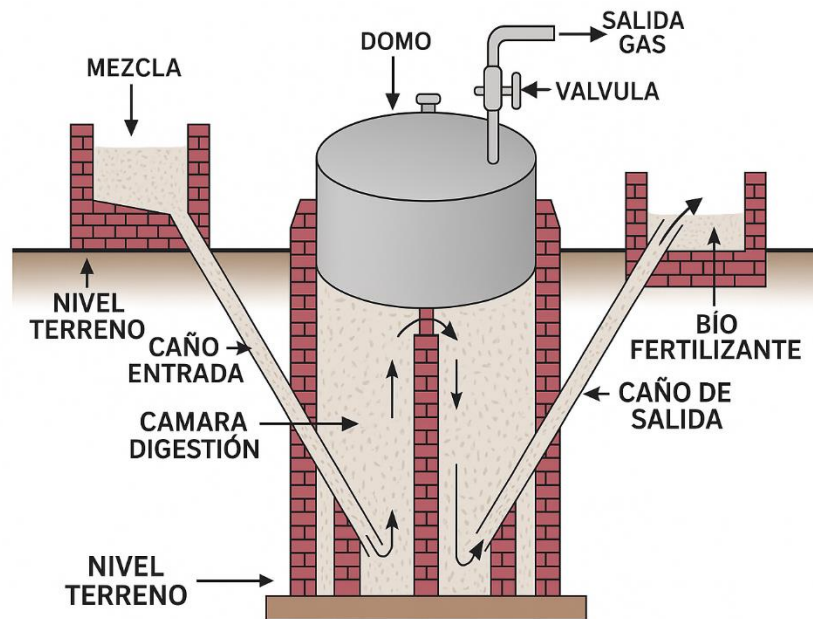


Nota. Esquema de un biodigestor de flujo continuo, operado de manera continua para producir biogás de forma constante. Figura obtenida de Ferreira et al. (2013).

B. Semi continuo

Los biodigestores semicontinuos combina las ventajas de los biodigestores de fermentación intermitente y los biodigestores de fermentación continua, y puede realizar el almacenamiento y la fermentación de los elementos principales, la materia orgánica se añade gradualmente y el fertilizante se acumula en el tanque de bio - fermentación hasta llenarlo, a continuación, el sistema pasa del funcionamiento por lotes al funcionamiento continuo, en esta nueva fase el sustrato sobrante se envía al depósito de lodos (véase en la figura 6), normalmente de gran tamaño, aunque la principal desventaja es que los lodos no se metabolizan completamente, lo que reduce la rentabilidad del biogás en comparación con otros procesos (Jimenez, 2012).

Figura 6
Esquema de biodigestor semi continuo

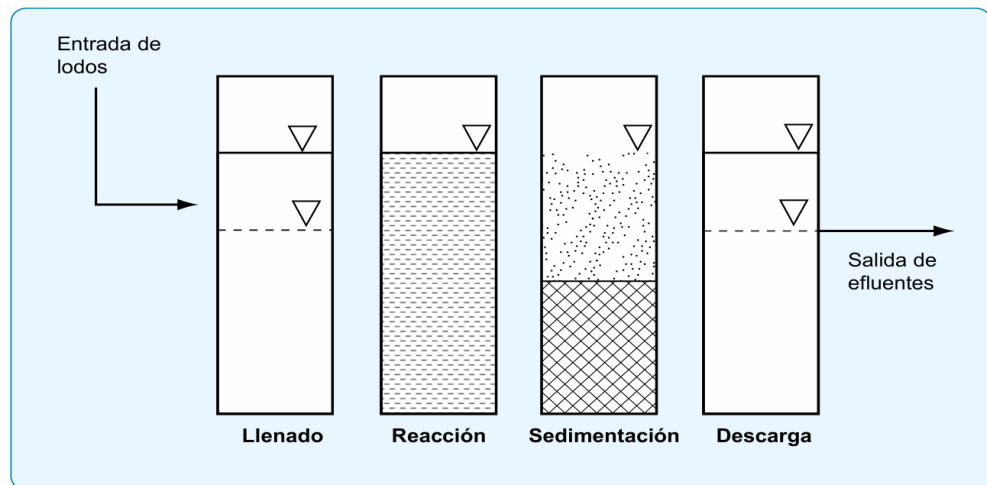


Nota. Esquema de biodigestor semi continuo, permite el ingreso de materia orgánica y el acopio de biofertilizante, sin embargo, con menos aprovechamiento energético. Figura obtenida de Ferreira et al. (2013).

C. Discontinuos o régimen estacionario

Los digestores se llenan con el material primario en solo una carga o lote, posterior después de cierto tiempo de fermentación, cuando el contenido del material primario se reduce y la rentabilidad de producción de biogás decae a un bajo nivel, se retira todo el contenido de los biodigestores y se vuelve a nutrir logrando un nuevo comienzo al proceso de fermentación como se puede observar en la figura 7, también se entiende o llama los digestores Batch o Batelada (Varnero, 2011).

Figura 7
Etapas operacionales del digestor Batch



Nota. La figura muestra el funcionamiento de un reactor discontinuo por lotes aplicado en el tratamiento de aguas residuales, este ciclo consta de cuatro etapas: llenado, reacción, sedimentación y descarga. Este ciclo separa sólidos del agua tratada y optimiza la eliminación de contaminantes mediante el control flexible de cada etapa. Figura obtenida de Varnero (2011).

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ámbito de estudio

3.1.1. Zona de muestreo

El muestreo de lodos residuales se realizó en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la ciudad de Sandia, del distrito de Sandia, de la provincia de Sandia, Departamento de Puno, ubicado en las coordenadas UTM WGS 84, 19 L Este: 450665 y Norte: 8417112, a nivel de 2150 m.s.n.m. aproximadamente. El lodo se tomó del lecho de secado de la PTAR, obteniendo así lodos primarios y secundarios que fueron muestreados según normativa R.M. N°093-2018-VIVIENDA (2018). El armado de los biodigestores fue adaptado en una de las viviendas cercanas a la PTAR – Sandia por el bienestar y seguridad de la investigación.

Figura 8
Zona de muestreo



Nota. Adaptado de *Google Earth*.

3.1.2. Zona de estudio

Los biodigestores fueron instalados en una infraestructura cercana a la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de la ciudad de Sandia, distrito de Sandia, provincia de Sandia, departamento de Puno, ubicado en las coordenadas UTM WGS 84, 19 L Este: 450363 y Norte: 8417079, a una altura de 2150 m.s.n.m. aproximadamente.

Figura 9

Zona de estudio y armado de los biodigestores



Nota. Adaptado de Google Earth.

3.2. Tipo y diseño de investigación

La investigación se clasifica como aplicada, y se empleó un diseño experimental, lo que permitió evaluar el efecto de la relación C-N en la generación de biogás a partir de lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Sandia, bajo condiciones reguladas.

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

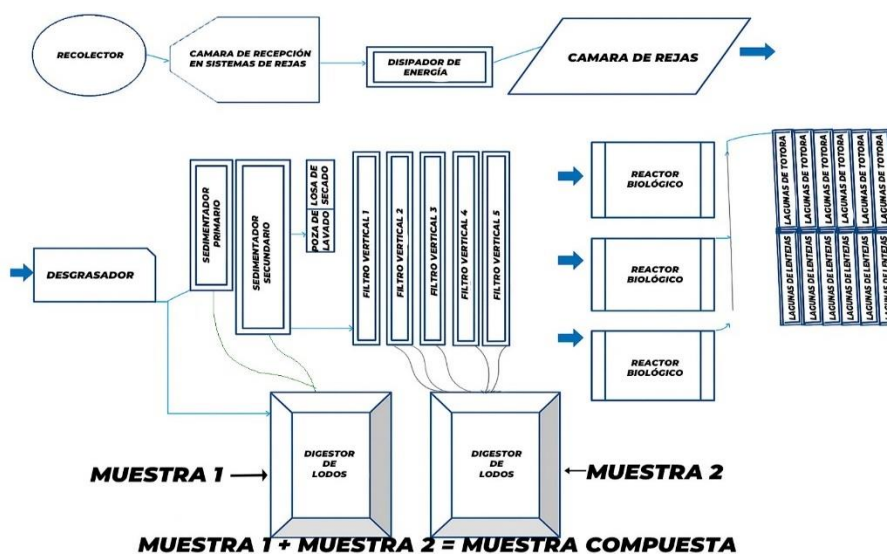
Los elementos analizados comprendieron lodos primarios y secundarios dispuestos en los lechos de secado de la planta de tratamiento de aguas residuales, así también el estiércol fue adquirido a un costo de S/. 1.00 por cada kilogramo, en los centros poblados de la ciudad de Sandia.

3.3.2. Muestra

La determinación del tamaño de muestra se llevó a cabo siguiendo lo establecido en el protocolo de monitoreo de biosólidos R.M. N°093-2018-VIVIENDA (2018), donde establece los lineamientos para realizar la toma de muestras, así como los equipos necesarios en los diferentes tipos de casos, en el presente se realizó la toma de muestra compuesta de lechos de secado, la cantidad de 2 Kg de lodos residuales para el análisis de los distintos parámetros.

Figura 10

Flujograma de la planta de tratamiento de aguas residuales Sandia



Nota. Tomado de Flujograma del sistema de tratamiento de aguas residuales del “*Diagnostico de los sistemas de agua potable y alcantarillado de la ciudad de sandia y centros poblados aledaños*”, por (Municipalidad Provincial de Sandia, 2022), documento no publicado.

3.4. Hipótesis de la investigación

3.4.1. Hipótesis general

La óptima relación de carbono – nitrógeno influye en el tiempo de generación y calidad del biogás producido a partir de estiércol y lodos residuales de la PTAR – Sandia.

3.4.2. Hipótesis específicas

- Las características físico – químicas de los lodos provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Sandia influyen en el tiempo de generación y calidad la generación de biogás.
- La relación óptima de carbono–nitrógeno influye en el tiempo de generación del biogás producido a partir de estiércol y lodos residuales de la PTAR – Sandia.
- La relación óptima de carbono – nitrógeno influye en la calidad del biogás producido a partir de estiércol y lodos residuales de la PTAR – Sandia.

3.5. Instrumentos, materiales y equipos.

3.5.1. Materiales de muestreo

Cámara fotográfica, GPS de mano GARMIN ETREX 10, kit de muestreo de lodos (bolsas de polietileno con cierre hermético, ice pack en gel), pala manual, guantes de látex, barbijo, cooler, bolsa de polietileno, botas de seguridad, lentes de seguridad, casco de seguridad, mameluco, balanza analítica.

3.5.2. Materiales de armado de biodigestor

12 biodigestores (Cilindro de 50 litros con tapa de cierre hermético), accesorios de gasfitería (6 tuberías de media pulgada, 12 codos de media pulgada, 24 t de media pulgada, 4 cinta teflón, 48 llaves de paso, 60 niples de media pulgada), 12 cámaras de llanta para el almacenamiento de biogás, 24 metros de manguera de gas, 12 abrazaderas metálicas, 12 manómetros, 4 cintas aislante, desarmador, jeringa para muestreo.

3.5.3. Equipos de laboratorio

Balanza analítica AS R2 PLUS, estufa, digestor Kjeldahl, balones Kjeldahl, potenciómetro, desecador, cromatógrafo de gases.

3.5.4. Materiales de laboratorio

Matraz de Erlenmeyer de 500 mL, pipeta volumétrica de 10 mL, pipeta graduada de 1 mL, bureta de 25 mL, dispensador de 10 mL, dispensador de 20 mL, vaso precipitado con señal en 150 mL, espátulas o cuchara pequeña, matraces aforados, embudos con pico, capsula de porcelana.

3.5.5. Reactivos de laboratorio

H₃PO₄ al 85% grado analítico, H₃PO₄ grado técnico, H₂SO₄ G.A. concentrado (concentración no menor del 96%), H₂SO₄ G.T. para análisis de rutina, Solución 1N de K₂Cr₂O₇, solución indicadora, mezcla de sulfúrico y selenio, solución de KCl, gas Helio.

3.5.6. Materiales de oficina y apunte

Laptop, impresora, papel bond, cuaderno de campo, lapiceros, cadena custodia.

3.6. Procedimiento metodológico

3.6.1. Determinación de las características físico – químicas de la mezcla del estiércol y lodos residuales de la PTAR – Sandia

A. Toma de muestra

La toma de muestra en lechos desecados se dividió el área de un lecho de secado en cuatro cuadrantes. Del medio de cada cuadrante se extrajo una muestra específica sumando un total de cuatro muestras de todo el perfil de lodo o biosólido almacenado, las cuales se homogenizaron para formar una muestra compuesta por lecho, a partir de las cuatro muestras específicas. Es de suma importancia evitar la mezcla del lodo con otros materiales como arena de la capa filtrante del lecho de secado R.M. N°093-2018-VIVIENDA (2018), el cual se realizó con éxito.

La PTAR de Sandia cuenta con 2 lechos de secado, en este caso la operación se realizó en ambos lechos obteniendo una muestra compuesta por cada lecho de 2 kg de cada lecho, posteriormente, se procedió con la homogenización de las muestras de cada lecho, y se preparó una muestra compuesta por lecho de secado de 4 kg.

La muestra compuesta se redujo utilizando el método del cuarteo hasta que se obtuvo 2 kg de material homogéneo así mismo se colocó en una bolsa de polietileno debidamente identificada, y fue trasladada al laboratorio para su análisis, se transportó en un cooler de almacenamiento térmico con un refrigerante ice pack a 4 °C, la muestra fue rotulada según la R.M. N°093-2018-VIVIENDA (2018).

La caracterización de los parámetros físico - químicas (pH, humedad, materia orgánica y nitrógeno total) fue realizada mediante servicio tercerizado en el laboratorio acreditado Laboratorios Analíticos del Sur (LAS), de acuerdo con la normativa vigente.

B. Determinación de pH (método potencimetría)

Según el informe de ensayo, el pH se determinó utilizando el método de potencimetría, utilizando un electrodo sensible al ion hidrógeno (H⁺) y un electrodo de referencia, ambos conectados a un potenciómetro. Para las mediciones se preparó una suspensión de lodo en agua destilada, en proporción 1:1, ajustada según la viscosidad y consistencia del material. Antes de cada

medición, el equipo fue calibrado con soluciones tampón estándar para asegurar la precisión de los resultados. Cabe señalar que los lodos residuales presentan propiedades específicas, tales como: alta concentración de sólidos, alto contenido orgánico y composición química variable, todo lo cual puede afectar la medición del pH (Gomez, 2001).

C. Humedad

Se determinó por el método gravimétrico la determinación de humedad a 70 °C fue el de secado por pérdida de peso. Este método se basó en la pérdida de peso del material cuando se calentó a una temperatura constante de 70°C, para medir el contenido de humedad, se tomaron 5 g de muestra y se colocaron en un plato de porcelana, según el protocolo, la placa con las muestras se colocó a un horno a 70°C durante dos horas valor seleccionado por (Castellanos et al., 2018), al culminar el secado, se trasladaron a un desecador para evitar la absorción de humedad durante el proceso de enfriamiento, finalmente, se pesó el recipiente hasta obtener un peso constante. El contenido de humedad tiene un efecto significativo en la actividad de los microorganismos en los lodos, ya que una disminución en el contenido de humedad reduce la disponibilidad de agua, lo que a su vez afecta la actividad enzimática y las relaciones celulares osmóticas. (Castellanos et al., 2018). Para determinar la humedad se hace uso de la ecuación 1:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{\text{Pérdida de peso}}{\text{Pérdida de la muestra}} * 100\% = X\% \dots (\text{Ec. 1})$$

D. Materia orgánica (método de Walkley-Black)

El método se basó en la oxidación del carbono orgánico de lodos residuales con dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) en una solución de ácido sulfúrico, para lo cual se utilizó una cantidad suficiente de solución de $K_2Cr_2O_7$ y una concentración de 18 mol/L de H_2SO_4 , de modo que al agregar ácido sulfúrico concentrado a la solución de $K_2Cr_2O_7$, el calor generado promueva la oxidación del carbono y optimice la reacción redox, lo que, a su vez, permitió aprovechar al máximo este calor para garantizar la eficiencia del proceso y una determinación más precisa del contenido de carbono orgánico en los lodos. (Paneque et al., 2010).

$$\% \text{ de MO} = \frac{0.6708(B-M)N}{\text{Peso de muestra de suelo en gramos}} \dots (\text{Ec. 2})$$

En Donde:

B= mL de solución ferrosa empleado en la titulación del blanco.

M= mL de solución ferrosa consumido durante la titulación de la muestra de lodos.

N= Normalidad precisa de la solución ferrosa.

Posteriormente aplicando el factor de conversión obtuvimos el valor de carbono orgánico, el cual es el siguiente:

$$\% MO = \%C * 1.724 \dots (\text{Ec. 3})$$

E. Nitrógeno total (método Kjeldahl)

Este método utilizó ácido sulfúrico concentrado para digerir la muestra y convertir el nitrógeno orgánico y el nitrógeno amoniacal de la muestra en amoníaco (NH_3). Luego se destila el amoníaco y se recogió en una solución ácida y se cuantificó su contenido mediante titulación. Los valores obtenidos se utilizaron para determinar el contenido total de nitrógeno en formas orgánicas y amoniacales. Esto es crucial para evaluar la calidad de los lodos y su potencial en procesos de estabilización o compostaje. Este método es particularmente útil para los lodos residuales porque permite el análisis de diferentes formas de nitrógeno, componentes esenciales de los ciclos de nutrientes y la actividad microbiana en estos sistemas (Cepero, 2021).

F. Relación carbono - nitrógeno

El carbono y nitrógeno son las primordiales fuentes de nutrición de las bacterias metanogénicas, el carbono se compone como la principal fuente de energía y el nitrógeno es empleado para la generación de nuevas células, para el caso del estiércol de ovino la relación de C-N es de 35/1 (Varnero, 2011). Siendo indispensable definir este parámetro en los lodos residuales de la PTAR – Sandía. Se obtuvo esta información y se procedió a calcular la cantidad de mezcla de estiércol y lodo residual hasta llegar a una relación de C-N de 20 y 30 (Varnero, 2011), aplicando la siguiente fórmula:

$$R = \frac{C_1*Q_1+C_2*Q_2+\dots+C_n*Q_n}{N_1*Q_1+N_2*Q_2+\dots+N_n*Q_n} \dots (\text{Ec. 4})$$

Donde:

R= Relación de Carbono - Nitrógeno.

C_1, C_2, C_n = Porcentaje de carbono orgánico presente en cada materia prima.

N_1, N_2, N_n = Porcentaje de nitrógeno orgánico en cada materia prima.

Q_1, Q_2, Q_n = Peso fresco de cada materia, medido en kilogramos o toneladas.

3.6.2. Determinación del efecto de la relación carbono – nitrógeno en el tiempo de producción de biogás a partir de la mezcla de estiércol y lodos residuales de la PTAR – Sandía

Una vez obtenidos los datos de la caracterización de los lodos residuales, se procedió a calcular las cantidades de estiércol y lodos residuales necesarios para alcanzar relaciones de carbono - nitrógeno de 20 y 30 (ecuación 4).

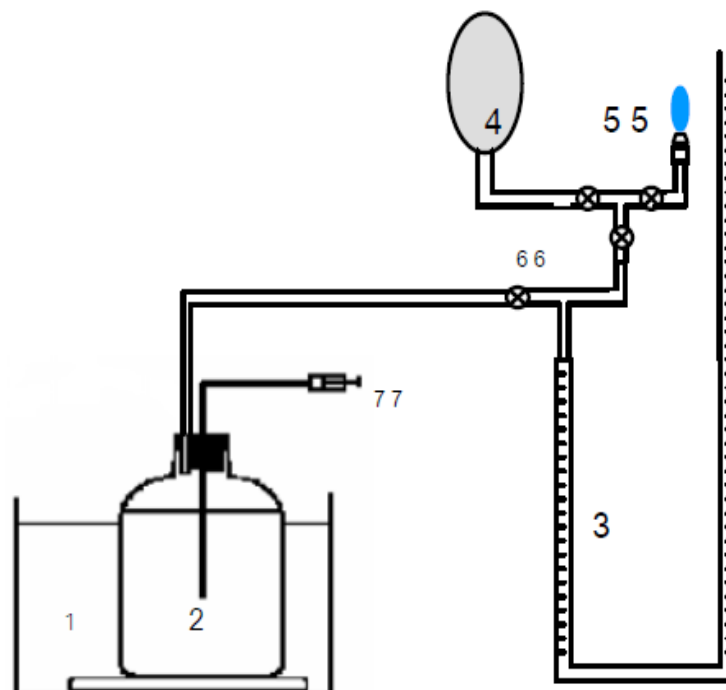
Se aplicó el diseño factorial 2^k con tres repeticiones, donde los factores considerados fueron la relación C-N (con dos niveles de 20 y 30) y humedad (con dos niveles 45% y 55%). En este caso, $k=2$, ya que corresponde a los dos parámetros evaluados: la relación C-N y el nivel de humedad.

Se acondicionó y dispuso la mezcla de estiércol y lodos en los biodigestores ensamblados de acuerdo a la figura 11, ajustando el contenido de humedad según el diseño experimental en la tabla 6. Posteriormente, se continuó con la homogenización de la mezcla de estiércol de oveja y lodos residuales generados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) – Sandía. Tras asegurar la homogeneización de la mezcla, se procedió con el sellado hermético del biodigestor.

El biodigestor fue sellado herméticamente y operado a temperatura controlada de 27 ± 3 °C (el cual se logró en un invernadero y un termo ventilador por las noches) y fue agitado manualmente.

El sistema se equipó con una tubería de policloruro de vinilo (PVC) equipado con un manómetro para registrar la presión del gas producido durante el proceso de digestión anaeróbica, en un extremo del conducto está conectado a un dispositivo hacia una cámara de neumático para almacenar el biogás, y el otro extremo conduce a una salida adicional para la prueba de combustión de biogás, tal como se representa en la figura 11.

Figura 11
Biodigestor adaptado para la producción de biogás



Nota. Este diseño permite controlar, almacenar y aprovechar el biogás. 1) Cámara para acondicionar la temperatura. 2) Reactor o biodigestor acondicionado. 3) Tubo en U (no adaptado al experimento). 4) Cámara para el almacenamiento de biogás. 5) Quemador Bunsen. 6) Válvula para gas. 7) Jeringa para muestreo. Tomado de Kalloum et al. (2011).

Considerando el diseño se procedió a realizar el armado de los biodigestores ya adaptados, como se representa en la figura 12.

Figura 12
Armado de biodigestores



Nota. Figura propia, 2024.

En el presente estudio, los parámetros de humedad y relación carbono – nitrógeno se establecieron inicialmente en dos niveles: relación C-N de 20 y 30, y humedad en 45% y 55% (como se muestra en la tabla 6), fundamentados en los valores teóricos recomendados por Varnero (2011). La relación carbono – nitrógeno fue calculada por medio de la fórmula de relación carbono – nitrógeno de los materiales usados (estiércol y lodos). De esta manera, se aseguró que los sustratos pasen por las condiciones experimentales planteadas.

Tabla 6
Cantidades a utilizar de relación C-N y humedad

Humedad (%)	Relación C-N
45%	20
55%	30

Nota. Los porcentajes de humedad y las relaciones C-N fueron establecidos como parámetros de referencia en el diseño experimental.

Se considero un diseño factorial de 2^2 , en el cual se evaluaron dos factores: la relación carbono – nitrógeno con dos niveles 20 y 30 el contenido de humedad con dos niveles (45% y 55%). La mezcla de estos genera cuatro tratamientos experimentales, cada tratamiento fue repetido a tres veces elaborando así un total de doce experimentos. De acuerdo a lo mostrado en la tabla 7.

Tabla 7
Diseño factorial para el número de experimentos

N° de experimento	Niveles		Variable	
	Factor A	Factor B	Relación C-N	Humedad (%)
1	-1	-1	20	45
2	-1	1	20	55
3	1	-1	30	45
4	1	1	30	55
5	-1	-1	20	45
6	-1	1	20	55
7	1	-1	30	45
8	1	1	30	55
9	-1	-1	20	45
10	-1	1	20	55
11	1	-1	30	45
12	1	1	30	55

Nota. La tabla corresponde a un diseño factorial 2^2 con tres réplicas, considerando como factores la relación C-N y la humedad. Elaboración propia, 2024.

3.6.3. Determinación de la influencia de la relación carbono–nitrógeno en la calidad del biogás producido a partir de la mezcla de estiércol y lodos residuales de la PTAR – Sandia

La evaluación de la composición del biogás se realizó considerando la concentración de metano, empleando el método de cromatografía de gases, que se realizó en el Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos (IIDEPROQ), de la Universidad Mayor de San Andrés, La Paz - Bolivia. Para almacenar el biogás se siguió el procedimiento establecido en la Norma ISO 20675 sobre biogás, producción, acondicionamiento, mejora y utilización de biogás, el cual menciona el uso de materiales impermeables como envase de contenido para las muestras de biogás.

Con el fin de evaluar la calidad del biogás, se empleó la metodología de cromatografía de gases (CG), mediante la cual se cuantificaron las concentraciones de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Esta técnica consistió en el uso de una columna capilar introducida en un horno termostaticado, cuya superficie interna está recubierta con gel de sílice u otro material que actúa como fase estacionaria. La interacción diferencial se establece la interacción similar entre los distintos componentes de la mezcla y la fase estacionaria, que permitió la separación de los constituyentes del biogás. Se inyectó una pequeña muestra en un inyector calentado, lo que facilitó la volatilización de los compuestos. Los elementos volátiles fueron impulsados a lo largo de la columna por una corriente capilar de Helio. A medida que la muestra avanzaba por la columna, los compuestos más volátiles, o aquellos con menor interacción con la fase estacionaria, avanzaron más rápidamente que los compuestos de menor volatilidad. Cada componente se separó en tiempos distintos y conducidos hacia la fuente de iones del espectrómetro de masas, donde se produjo la ionización y fragmentación. Este procedimiento corresponde a la cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (CG-EM), los solutos fluidos de la columna se dirigieron directamente a la cámara de ionización del espectrómetro de masas, minimizando así la presencia del gas portador. En la cámara de ionización, todas las moléculas presentes (gas portador, disolventes y solutos) se ionizaron, y los iones fueron separados según su relación masa/carga. Cada soluto sufrió una fragmentación característica en

iones más pequeños, generando un espectro de masas cuya intensidad en función de la relación masa/carga proporcionó información cualitativa utilizada para identificar los solutos presentes (Pavi & Valencia, 2013).

Los resultados obtenidos en cuanto a metano son comparados con las concentraciones de estos gases propuesto por Varnero (2011) quien indica que un gas de calidad debe presentar la composición expuesta en la tabla 1:

3.7. Análisis de datos

El procesamiento de resultados se llevó a cabo mediante la prueba ANOVA utilizando un modelo factorial con dos 2 factores. En el escenario de un diseño factorial 2^2 , el comportamiento de la variable respuesta se puede describir mediante el siguiente modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + v_{ijk}$$
$$i = 1,2, \dots, a; \quad j = 1,2, \dots, b; \quad k = 1,2, \dots, r$$

Donde:

r = Es el número de replicaciones.

μ = Es la media global.

τ_i = Representa el efecto del i -ésimo nivel del factor relación C-N.

β_j = Denota el efecto asociado del j -ésimo nivel del factor humedad.

$(\tau\beta)_{ij}$ = Indica el efecto producido por la interacción entre ambos factores.

v_{ijkl} = Representa el error aleatorio.

El análisis de varianza correspondiente se muestra en la tabla 8.

Tabla 8
Diseño factorial 2²

Factor de variación	de	Grados de independencia	Suma total de cuadrados	Cuadrados medios	F₀
Factor relación (A)	C-N	a-1	SCA	CMA	CMA/CMR
Factor humedad (B)		b-1	SCB	CMB	CMB/CMR
Interacción		(a-1) (b-1)	SC(AB)	CM(AB)	CM(AB)/CMR
Residual		ab(r-1)	SCR	CMR	
Total		abr-1	SCT	CMT	

Nota. Tabla tomada de Porras (2000).

El flujograma del proceso fue de elaboración propia, incluyendo todos los procesos a realizar según la figura 13.

Figura 13
Flujograma del proceso



Nota. Diagrama de flujo de procesos para la generación y análisis de biogás a partir la mezcla de estiércol y lodos residuales de la PTAR – Sandía. El procedimiento detalla los pasos desde la adquisición de materiales hasta el procesamiento de resultados, incluyendo muestreo, análisis y determinación de parámetros clave. Elaboración propia, 2024.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Características físico-químicas de lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Sandia 2024.

En este trabajo se analizó una sola muestra compuesta de lodos residuales, esto quiere decir que no se tomó un único punto de muestra, sino que se recogieron varias pequeñas porciones en distintos lugares, que luego se mezclaron para obtener una sola muestra final. La razón de hacerlo así es que la norma (R.M. N°093-2018-VIVIENDA, 2018) indica que el análisis debe realizarse sobre una muestra compuesta, ya que esta refleja mejor las características del material en general.

En la tabla 9 se observa los resultados de los parámetros físico-químicas del lodo evaluados en la presente investigación.

Tabla 9

Resultados de los parámetros fisicoquímicas evaluados

N°	MUESTRA	PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADOS
1		pH	unidad	5.513
2		Humedad	%	85.71
3	Lodos residuales	Materia orgánica	%	39.8
4		Nitrógeno total	g/Kg	16.59

Nota. Resultados obtenidos del INFORME DE ENSAYO LAS01-SD-24-00001.

4.1.1. pH

El análisis de pH muestra un valor de pH = 5.513 indicativo de un medio ácido. Los resultados de la investigación coinciden parcialmente con lo obtenido por Velásquez (2022) obtuvo un pH de 6.93, Huanca (2017) obtuvo un pH de 8.08, ante lo cual Varnero (2011) establece que el pH debe estar entre el rango de 6.0 y 8.0, dado que los microorganismo metanogénicos son más susceptibles a las variaciones de pH que los otros microorganismos de la comunidad microbiana anaeróbica, ya que en condiciones distintas a la del rango reduciría la actividad

de las bacterias metanogénicas, y por ende reduciendo el porcentaje de concentración de metano.

4.1.2. Humedad

En cuanto a los resultados de la humedad de los lodos residuales de la PTAR – Sandia, los lodos presentaron un 85.71 % de humedad; para Spahr et al. (2019) la humedad de la biomasa deberá de estar en el rango de 80% y 90%, por ende el resultado obtenido es óptimo y facilitara las condiciones de la etapa inicial del procedimiento de digestión anaeróbica, de igual forma Xavier y Junior (2010) obtuvieron una humedad de 70.8%, al igual Velásquez (2022) obtuvo un resultado de 78%. Porcentajes que permitirán el inicio de la digestión anaeróbica. El contenido de humedad impacta en la acción de la población microbiana de los lodos, a medida que se va deshumedeciendo, reduce la disponibilidad del agua y como resultado la acción enzimática y las relaciones osmóticas de las células (Castellanos et al., 2018).

4.1.3. Carbono orgánico

El contenido de materia orgánica tiene como resultado 39.8% (determinado por el método de Walkley-Black), correspondiente a un carbono orgánico de 23.086%. Estos resultados se encuentran en el rango del 21% reportado por García (2021) y Pimentel López et al. (2019) reportaron un contenido de carbono orgánico del 26%; ante ello Varnero (2011) señaló que la materia orgánica tiene el potencial de producir biogás cuando se utilizan métodos de fermentación anaeróbica, debido a que el carbono y el nitrógeno orgánicos son fuentes de nutrientes esenciales para las bacterias metanogénicas. Si no se alcanza la relación C-N óptima, las bacterias metanogénicas se verán inhibidas debido a la deficiencia de nutrientes. En este sentido, se ha demostrado que las bacterias metanogénicas consumen entre 20 y 30 veces más nitrógeno que carbono. Una relación C-N de 10 o menos indica una descomposición más rápida y eficiente, mientras que una relación C-N superior a 30 indica una descomposición más lenta y difícil (Días, 2019).

4.1.4. Nitrógeno total

La determinación del nitrógeno total, en que la muestra de lodos residuales de la PTAR – Sandía obtuvo un resultado de 16.59 g/Kg, lo cual representa al 1.659%. para Varnero (2011) este parámetro es importante ya que el nitrógeno es una de las primordiales fuentes de alimentación para las bacterias metanogénicas, también es utilizado para la formación de nuevas células, por otra parte el nitrógeno orgánico también contribuye con la alcalinidad; durante la digestión anaerobia, el nitrógeno orgánico es hidrolizado a formas amoniacales.

4.1.5. Relación carbono - nitrógeno

La relación carbono-nitrógeno (C-N) se calculó a partir de los datos anteriores en los lodos residuales de la PTAR – Sandía fue de 13.9 según el informe de laboratorio LAS01 – SD – 24 - 00001. Este resultado se calculó a partir de los porcentajes de carbono orgánico (23.086 %) y nitrógeno total (1.659 %) obtenidos previamente. El valor hallado es más bajo que el rango considerado ideal (20–30) para los procesos de estabilización biológica y digestión anaerobia. Esto significa que, en condiciones como estas, puede liberarse nitrógeno en exceso, generando acumulación de amonio y dificultando la actividad de los microorganismos encargados de producir metano, lo que finalmente afecta la eficiencia en la generación de biogás.

4.2. Influencia de la relación carbono – nitrógeno en el tiempo de generación del biogás a partir de estiércol y lodos residuales de la PTAR – Sandía 2024.

4.2.1. Relación carbono - nitrógeno

Para la determinación de los pesos y la relación de carbono - nitrógeno en cada experimento, se usó la fórmula de relación carbono - nitrógeno de acuerdo a lo establecido por Varnero (2011), para esta presente investigación se requirió que la relación carbono - nitrógeno sea de 20 a 1 en dos experimentos con sus respectivas repeticiones, y a su vez para los dos siguientes experimentos se requirió que cuente con una relación de carbono - nitrógeno de 30 a 1, Los valores de carbono (%C) y nitrógeno (%N) de los lodos se obtuvieron del informe de ENSAYO LAS01-SD-24-00001, aplicando los métodos de Walkley - Black y Kjeldahl. Para el estiércol, se tomaron como referencia los datos reportados por Varnero (2011). Con esta base, se calcularon los pesos necesarios de cada material usando la ecuación de la relación C-N (Ecuación N° 4), de modo que se alcanzaran las proporciones de 20 y 30 planteadas en el diseño experimental. Los datos presentados en la tabla 10 son cálculos para las tres repeticiones de cada experimento y fueron de elaboración propia.

Tabla 10*Determinación de peso y relación de carbono - nitrógeno*

Variable		LODOS		PESO DE	ESTIÉRCOL		PESO DE	TOTAL	RESULT.
C-N	Humedad (%)	%C	%N	LODO (Kg)	%C	%N	ESTIÉRCOL Kg	PESO (Kg)	C-N
20	45	23.09	1.66	8	35	1	6	14	20.48
20	45	23.09	1.66	8	35	1	6	14	20.48
20	45	23.09	1.66	8	35	1	6	14	20.48
20	55	23.09	1.66	8	35	1	6	14	20.48
20	55	23.09	1.66	8	35	1	6	14	20.48
20	55	23.09	1.66	8	35	1	6	14	20.48
30	45	23.09	1.66	1	35	1	6	7	30.43
30	45	23.09	1.66	1	35	1	6	7	30.43
30	45	23.09	1.66	1	35	1	6	7	30.43
30	55	23.09	1.66	1	35	1	6	7	30.43
30	55	23.09	1.66	1	35	1	6	7	30.43
30	55	23.09	1.66	1	35	1	6	7	30.43

Nota. Elaboración propia, 2024.

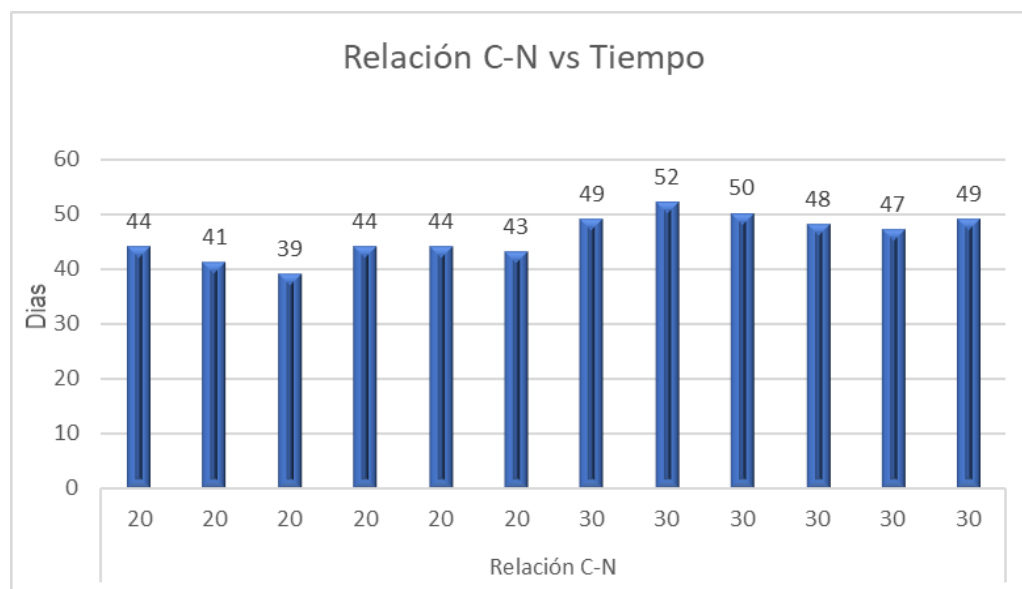
Los resultados de la tabla 10 permitió realizar los cálculos para la mezcla de estiércol de oveja y lodos residuales de la PTAR – Sandia hasta llegar a relaciones de carbono - nitrógeno de 20 y 30 aproximadamente. Investigaciones realizadas por Velásquez (2022), y García (2021) obtuvieron relaciones de carbono - nitrógeno de 19.5 a 21 respectivamente en lodos residuales. Estos resultados determinan la concentración de biogás y el tiempo de generación del mismo en la investigación. Para Varnero (2011) el carbono y nitrógeno son las primordiales fuentes de nutrición de las bacterias metanogénicas, el carbono se compone como la principal fuente de energía y el nitrógeno es empleado para la generación de nuevas células; el carbono orgánico y nitrógeno orgánico son fundamentales puesto que son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas, a su vez estos deben de estar en una relación de carbono - nitrógeno de 20 o 30 ya que las mismas bacterias consumen 20 o 30 veces más el carbono que el nitrógeno, por otra parte, esta relación óptima también determina la calidad del biogás producido. En cambio, si se obtiene una relación menor a la señalada se inhibe la actividad bacteriana ya que se forma en exceso la presencia de amonio, que en niveles elevados resulta tóxico y nociva para el proceso.

4.2.2. Relación carbono - nitrógeno vs tiempo de generación

La figura 14 muestra el tiempo de retención hidráulica para cada uno de los experimentos que cuentan con relación C-N de 20 y 30 respectivamente.

Figura 14

Tiempo de retención hidráulica comparada con la relación C-N



Nota. El TRH fue mayor para la relación de C-N de 30 en comparación a la de 20. Elaboración propia, 2024.

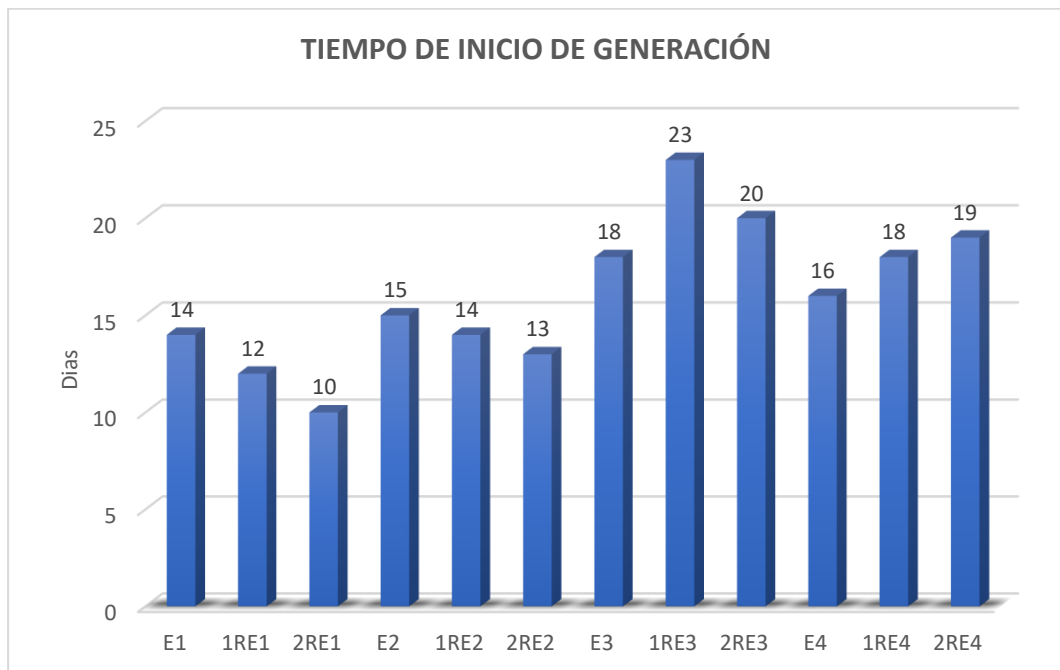
En la figura 14 se observa, que cuando la relación C-N es 20, se redujo el periodo de retención hidráulica (39 a 44 días) en comparación con relación C-N de 30 (47 a 52 días). Este aumento se debe a que los sustratos con elevado contenido de carbono (mayor a 35:1) se descomponen a paso lento, ya que la disponibilidad limitada de nitrógeno reduce la proliferación y actividad bacteriana, prolongando así el proceso. En este contexto, los resultados obtenidos coinciden parcialmente con lo reportado por Kavisa et al. (2020) quienes observaron que una relación C-N de 25/1 permitió la obtención de biogás en 37 días, mientras que una relación C-N de 30/1 el proceso se prolongó a 40 días, esto podría explicarse por la composición de los lodos residuales utilizados, los cuales contienen compuesto lignocelulósicos (compuestos de lignina, celulosa y hemicelulosa) que dificultan la degradación de los sustratos como ya lo señaló Varnero (2011). Este resultado cobra especial relevancia porque sugiere que, bajo las condiciones de este estudio, una relación C-N cercana a 20 favorece la reducción de los tiempos de digestión

y tener un mejor desempeño del proceso, sin embargo, se debe considerar que un exceso de reducción en el contenido de nitrógeno podría provocar la acumulación de amoníaco.

4.2.3. Tiempo de inicio de generación de biogás

En la figura 15 muestra el momento en que comienza la producción de biogás en cada experimento y sus respectivas repeticiones.

Figura 15
Tiempo de inicio de generación de biogás



Nota. Variabilidad en el tiempo de inicio de generación, oscilando entre 10 y 23 días, en cuatro experimentos replicados. Elaboración propia, 2024.

Como se puede ver en la figura 15, el tiempo de inicio más corto para la producción de biogás es de 10 días, este valor se determinó mediante pruebas de combustión, el cual permitió confirmar el momento en el que el gas producido presentaba características inflamables, señal clara del inicio efectivo de la producción de biogás. Este resultado es ventajoso ya que un arranque temprano implica un tiempo de retención hidráulica más corto. En contraste, el tiempo de arranque más largo se registró a los 23 días, lo que evidencia una fase inicial de digestión más lenta, y, en consecuencia, un TRH mayor. Además, los experimentos 1 y 2 y sus respectivas réplicas mostraron el tiempo de inicio de producción de biogás más corto, porque

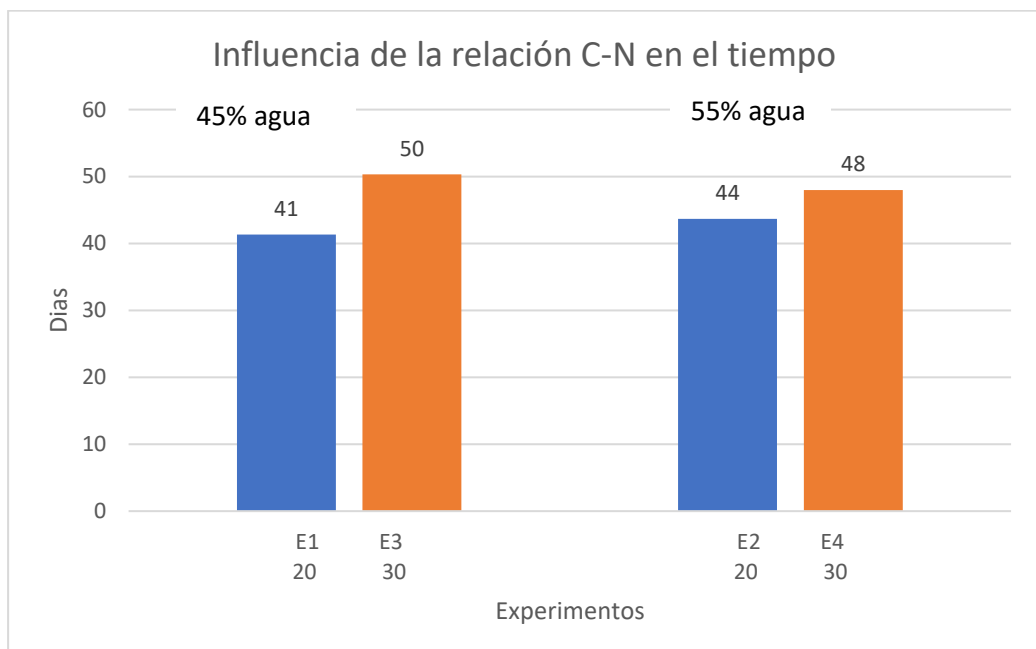
en ambos casos se utilizó una relación C-N de 20, por el contrario, los experimentos 3 y 4 utilizaron una relación C-N de 30 y generalmente mostraron tiempos de arranque más largos. En este sentido Varnero (2011) explicó que la duración de la biodegradación depende de la naturaleza de la materia orgánica polimérica y de la actividad de los microorganismos, ya que este material puede ser utilizado directamente por los microorganismos sólo después de una hidrólisis previa. Durante esta fase se produce el sustrato orgánico necesario para la digestión anaeróbica, por lo tanto, cuanto mayor sea el tiempo de hidrólisis, más tiempo tardará en empezar a producir biogás.

4.2.4. Influencia de la relación carbono – nitrógeno en el tiempo de generación

En la figura 16 se observa la influencia de la relación C-N de 20 y 30 en el tiempo de generación del biogás, considerando las condiciones de porcentaje de humedad de la biomasa es de 45% y 55% respectivamente. Para el análisis de la influencia de la relación C-N se trabajó con los promedios de cada experimento con sus respectivas repeticiones.

Figura 16

Influencia de la relación C-N en el tiempo de generación



Nota. Comparación del tiempo de proceso de experimentos con relación C-N 20 y de 30, resultando una ligera duración mayor para la relación C-N de 30. Elaboración propia, 2024.

Se evaluó el impacto de las relaciones carbono-nitrógeno (C-N) de 20 y 30 sobre el tiempo de generación de biogás. Para este fin se utilizaron cuatro biodigestores de biogás: dos con una relación C-N de 20 y dos con una relación C-N de 30, cada una con un contenido de humedad entre el 45 y el 55%. Se observó que los biodigestores con una relación C-N de 20 tardaron un promedio de 41 a 44 días en producir biogás, mientras que los biodigestores con una relación C-N de 30 tardaron más tiempo, con un promedio de 48 a 50 días. Estos resultados son parcialmente consistentes con estudios previos; por ejemplo, Cadena y Malpica (2019) reportaron un tiempo de retención hidráulica de 36 días cuando la relación C-N fue de 20/1, por otra parte, Velásquez (2022) determinó un tiempo de retención hidráulica de 91 días para una relación C-N de 19.5, y la producción de biogás a partir del día 55, asimismo, Pimentel López et al. (2019) también encontraron que el tiempo de retención hidráulica fue de 40 días con una relación C-N de 26/1. Según Varnero (2011), la relación C-N afecta significativamente el tiempo de producción de biogás; una relación C-N de 30 significa un alto contenido de carbono y un bajo contenido de nitrógeno, lo que limita la formación de nuevas células microbianas y, por lo tanto, reduce la eficiencia del proceso, además, señala que la fase de hidrólisis es una de las etapas más limitantes en la producción de biogás, por lo tanto si se puede acelerar esta fase, el tiempo de producción se puede acortar significativamente. Por otra parte Adolph (2016), ha informado que importantes géneros metanógenos como *Methanosaeta* y *Methanosarcina* dominan en los sistemas de digestión anaeróbica y contribuyen significativamente a la producción de metano. La posible presencia de estos géneros en los lodos residuales indica que tienen una actividad metanogénica comparable o incluso mayor y enfatiza su idoneidad en tecnologías de tratamiento biológico, ya que los lodos residuales contienen bacterias metanogénicas.

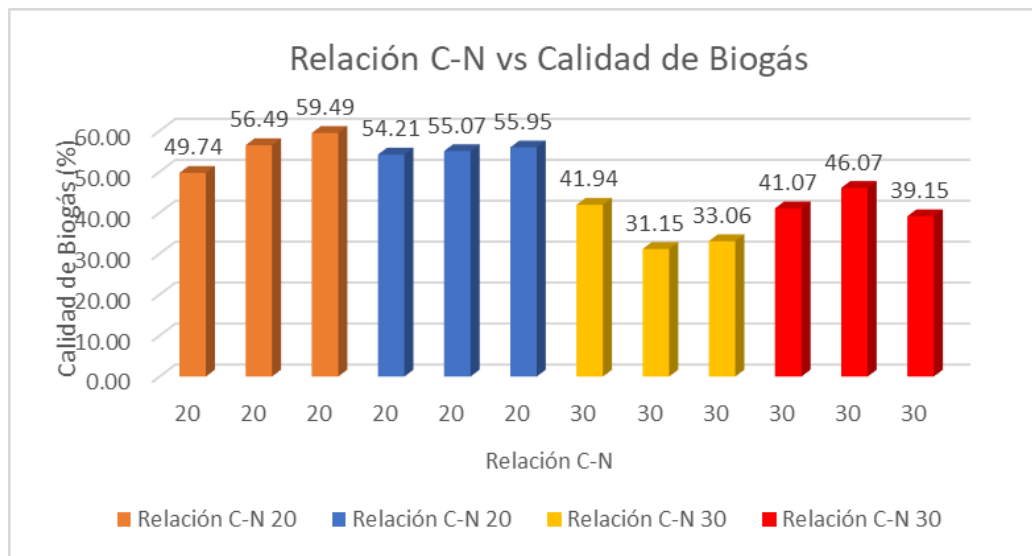
4.3. Influencia de la relación carbono - nitrógeno en la calidad del biogás a partir de estiércol y lodos residuales de la PTAR - Sandia 2024.

4.3.1. Relación carbono – nitrógeno vs calidad de biogás

Los resultados muestran que con una relación C-N de 20 se obtiene un biogás de mejor calidad en comparación con la relación C-N de 30, donde la concentración de metano fue menor, como se aprecia en la siguiente figura.

Figura 17

Influencia de la relación C-N 20 y 30 en la calidad de biogás



Nota. Gráfico de barras que muestra la mayor calidad de biogás generado, medida en la concentración de metano, comparando las relaciones C-N de 20 y 30. Elaboración propia, 2024.

En la Figura 17 se observa que, para una relación carbono - nitrógeno de 20/1, los resultados de concentración de metano en el Experimento 1 y sus repeticiones fueron: 49.74%, 56.49% y 59.49%, respectivamente. En el Experimento 2 y sus repeticiones, las concentraciones de metano fueron 54.21%, 55.07% y 55.95%. Por otro lado, para una relación carbono - nitrógeno de 30/1, los resultados obtenidos en el Experimento 3 y sus repeticiones fueron 41.94%, 31.15% y 33.06% de metano, mientras que en el Experimento 4 y sus repeticiones, las concentraciones de metano fueron 41.07%, 46.07% y 39.15%. En una relación de carbono - nitrógeno de 20/1 el de más alta calidad de 59.49% de concentración de gas metano y el más bajo 49.74% de concentración, mientras que en una relación

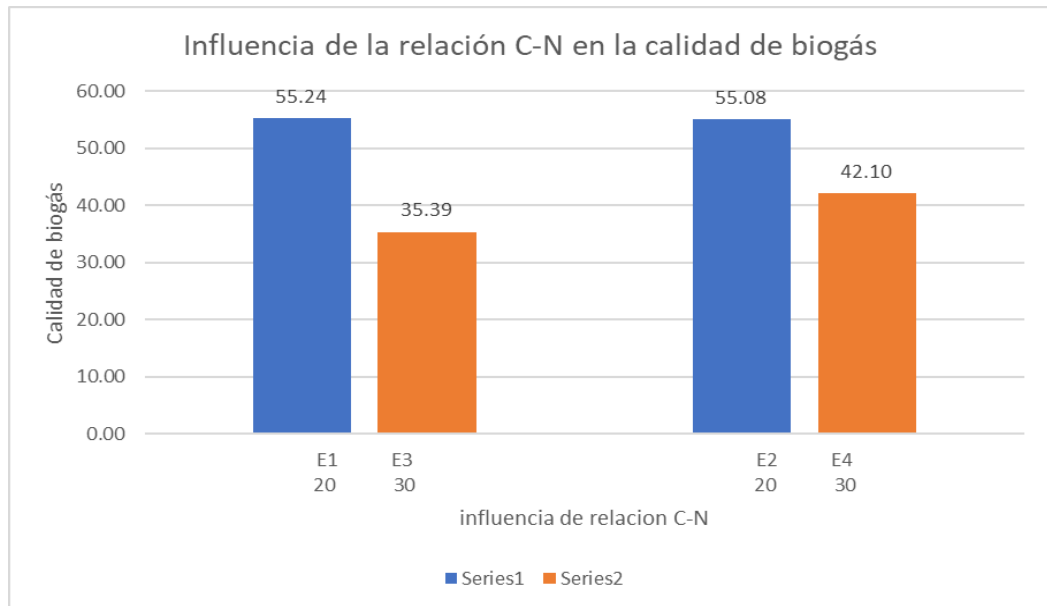
carbono - nitrógeno de 30/1 presenta porcentajes de metano de 46.07% mientras que la más baja calidad fue de 31.15 % de metano. De lo cual se concluye que la variación de calidad de biogás depende de la de la relación de carbono - nitrógeno. Para Varnero (2011) la calidad del biogás es dependiente de la composición y la naturaleza del residuo, siendo el carbono y nitrógeno fundamentales fuentes de nutrición para las bacterias metanogénicas, la composición depende mucho del sustrato digerido; cuando el contenido de metano supera el 45% es inflamable, otros factores también son determinantes a la hora de calidad de biogás. Para García (2015) si la relación de carbono - nitrógeno es muy baja (10/1) existe pérdida de nitrógeno asimilable lo cual disminuye la calidad de la materia prima digerida, por otro lado, si la relación es muy alta (40/1) se impide el crecimiento de las bacterias a causa de la falta de nitrógeno.

4.3.2. Influencia de la relación carbono – nitrógeno en la calidad de biogás

En la figura 18 se observa la comparación de la influencia de las relaciones carbono - nitrógeno de 20/1 y las de 30/1, teniendo en consideración el factor de porcentaje de humedad de 45% y 55% en ambos casos. Para la presente determinación se trabajó con los promedios de los experimentos con sus respectivas repeticiones, así solo presentándose como única variante la relación de carbono - nitrógeno.

Figura 18

Influencia de la relación C-N en la calidad de biogás



Nota. Figura de barras que compara la calidad de biogás a distintas relaciones de C-N: 20 (E1 y E2) y 30 (E3 y E4). Los resultados muestran que la relación C-N de 20 generó biogás de mejor calidad. Elaboración propia, 2024.

La figura 18 se evidencia la influencia de la relación carbono-nitrógeno (C-N) en la calidad del biogás de digestión, comparando el experimento 1 y el experimento 3, ambos con un contenido de humedad del 45% y 55% respectivamente, se puede observar particularmente que la diferencia en la concentración de metano en el experimento 1 es del 19.85%; de manera similar, entre el experimento 2 y el experimento 4, incluso con el mismo contenido de humedad, se registró una diferencia del 12.98% en la concentración de metano, estos hallazgos sugieren que una relación C-N de 20/1 es más favorable que 30/1 para producir biogás de mayor calidad debido al mayor contenido de metano. Investigaciones anteriores respaldan estos hallazgos, como Kalloum et al. (2011) reportaron una concentración de metano de 45%, mientras que Rumiche Peña (2021) alcanzó 62% de concentración de metano, y Castro y Flores (2019) 57% de concentración de metano. Según Varnero (2011), los microorganismos metanogénicos son el grupo más importante de bacterias anaerobias y son los responsables directos de la producción de metano, denominándose al proceso de generación de metano como metanogénesis, la etapa final del proceso anaeróbico está dominada por arqueas metanogénicas que aparecen durante la fase de proliferación, los géneros

más representados son *Methanobacterium*, *Methanospirillum hungatii* y *Methanosarcina*. La calidad y composición del biogás están directamente relacionadas con la relación carbono-nitrógeno, debido a que esta controla la disponibilidad de nutrientes críticos para las arqueas metanogénicas responsables de la producción de metano, la deficiencia de nutrientes especialmente debido al exceso de carbono o de nitrógeno, inhibe la actividad de estos microorganismos. Para que el biogás se considere de alta calidad, debe contener al menos un 55% de metano; en este sentido, sólo los experimentos 1 y 2 cumplieron este criterio, reforzando la conclusión de que una relación C-N de 20/1 permite obtener biogás de mayor calidad que 30/1. Finalmente, según la Fundación Naturgy (2020), aproximadamente el 90% del metano se produce durante la fase de metanogénesis, este proceso lo llevan a cabo principalmente los metanógenos acetolíticos, que son los responsables de convertir el ácido acético en metano y al igual que dióxido de carbono, mientras que los metanógenos utilizan el hidrógeno para reducir el carbono a hidróxido para producir metano y agua.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- De acuerdo con el estudio fisicoquímico realizado a los lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales de Sandia, se determinó un pH = 5.513, un contenido de carbono orgánico en forma de materia orgánica de 39.8% y un valor de nitrógeno total 16.59 g/Kg. Con base a estos resultados, se realizó una mezcla con estiércol de oveja, con la finalidad de ajustar la relación carbono – nitrógeno y favorecer la producción de biogás de calidad.
- La mayor significancia en generación de biogás se logró con una relación carbono-nitrógeno de 20/1 a partir del décimo día después de la carga inicial del sistema, el tiempo de retención hidráulica fue de 41 días, mientras que el experimento con una relación C-N de 30/1 requirió 50 días.
- La relación carbono - nitrógeno (C-N) óptima para mejorar la calidad del biogás generado a partir de estiércol y lodos provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales de Sandia fue de 20/1, con una concentración de metano del 59.49%, en contraste, sólo el 35.39% del metano se produjo con una relación C-N de 30/1, lo que confirma el efecto significativo de esta relación en la calidad del biogás.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda elaborar el biodigestor del diseño a gran escala de acuerdo a los lodos residuales producidos en una planta de tratamiento de aguas residuales.
- Se recomienda el uso de agua no potable en el proceso de armado de biodigestores de biogás, porque el agua destinada al consumo humano contiene desinfectantes como el cloro residual que inhiben la actividad de las bacterias metanogénicas, por lo tanto, reducen la eficiencia del proceso.
- Transportar la muestra de biogás en bolsas Tedlar o de similar material o construcción.
- Se recomienda investigar el potencial del sustrato seco como biofertilizantes en cultivos y programas de reforestación, así como su aplicación como acelerante de compostaje, estos estudios deberían incluir evaluaciones de su composición nutricional, asegurando así un aprovechamiento seguro y eficiente.
- Se recomienda realizar otras investigaciones de acuerdo a la realidad de cada planta de tratamiento de aguas residuales, acorde a la producción de biogás.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adolph, R. (2016). *Actividad metanogénica de lodos procedentes de Villavicencio y Busbanza, Boyacá*. 1–23.
- Arenas, J. J., Tito Lllactuahuaman, J. J., & Sanchez Galicio, L. J. (2021). *Influencia del humus de ovino y vacuno en el rendimiento de la especie Spinacia oleracea L , en el distrito de Huamancaca, provincia de Huancayo - 2021*.
- Bahamón, D. marín. (2019). Propuesta de aprovechamiento de lodos residuales provenientes de una PTAR del municipio de Sopó Cundinamarca para la producción de un fertiizante organo - mineral. *Jurusan Teknik Kimia USU*, 3(1), 18–23.
- Baredar, P., Khare, V., & Nema, S. (2020a). Biogas energy system. In *Design and Optimization of Biogas Energy Systems* (pp. 1–31). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-822718-3.00001-0>
- Baredar, P., Khare, V., & Nema, S. (2020b). Optimum sizing and modeling of biogas energy system. In *Design and optimization of biogas energy systems* (pp. 33–78). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-822718-3.00002-2>
- Cadena, L. R. B., & Malpica, C. M. M. (2019). Evaluación de la producción de biogás mediante digestión anaerobia a partir de lodos residuales de la PTAR Villas del Nuevo Siglo, en la Mesa - Cundinamarca. In *Departamento de Ingeniería Química* (Issue 2).
- Canziani, R., & Spinosa, L. (2019). Sludge from wastewater treatment plants. In *Industrial and municipal sludge: emerging concerns and scope for resource recovery* (pp. 3–30). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815907-1.00001-5>
- Cárdenas, G., & Molina, F. (2022). *Alternativas para tratar lodos originados en sistemas de tratamiento de aguas residuales: una revisión*.
- Castellanos, J., Merchán, N. A., Galvis, J., & Manjarres, E. H. (2018). Deshidratación de los lodos en lecho de secado y su influencia sobre la actividad biológica de los microorganismos. *Gestión y Ambiente*, 21(2), 242–251. <https://doi.org/10.15446/ga.v21n2.75876>
- Castrejón, A., & Barrios, J. (2000). Evaluación de la calidad de lodos residuales de México. *Instituto de Ingeniería, May 2014*. <http://bvs.per.paho.org/bvsaidis/mexico13/061.pdf>

- Castro, C. B., & Flores, J. E. D. (2019). Biogás a partir de lodos producidos en la planta de tratamiento de aguas residuales del distrito de Comas 2019. In *Repositorio institucional - UCV*. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/42516>
- Cepero, R. E. (2021). *Caracterización físico-química y microbiológica de lodos residuales y propuesta de tratamiento con CBQ-Biorrem*® Autor: Nataly Broche Hernández Tutores: Lic. Elizabeth Cepero Rodríguez Consultante: MSc. Mirelys Montesino (Issue October 2020).
- Cuba, I. (2015). *Generación del gas metano por biodigestión anaeróbica a partir de los lodos del tanque Imhoff, de la planta de tratamiento de aguas residuales, provincia de Lampa - Puno*. 106. <http://repositorio.uancv.edu.pe/handle/UANCV/717>
- Delgado, N. (2018). Evaluación de la influencia de la temperatura en el tiempo de producción de biogás de excretas de bovino en el centro poblado de Callqui Grande - Huancavelica. *Repositorio Institucional - UNH*, 80. https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/Libros/Osinergmin-Energia-Renovable-Peru-10anios.pdf
- Dennis, O. E. (2015). Efecto de los inóculos sobre el rendimiento de biogás. *Of Applied Chemistry (IOSR-JAC)*, 5–8. <https://doi.org/10.9790/5736>
- Días, E. O. (2019). Relación entre el contenido de materia orgánica y nitrógeno total de los suelos de la provincia de Leoncio Prado. *Facultad De Zootecnia*, 1–91. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1507>
- Espinoza, J. J., & Santos, E. G. (2021). Innovación en la gestión de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales de origen doméstico en Lima-Perú. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 24(48), 205–215. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i48.21773>
- Ferreira, D., Santos, L., & Montoro, S. B. (2013). Análise econômica de investimentos que visam a produção de biogás e biofertilizante por meio de biodigestão anaeróbica na bovinocultura de corte. *Revista Eletrônica Mestrado Em Administração*, July. <https://repositorio.unp.br/index.php/raunp/article/download/314/321>
- Fuentes, J., & Vicente, J. (2021). FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA 01 Facultad de Ingeniería y Arquitectura. In *Universidad Andina del Cusco*.

http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez_RS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Fundación Naturgy. (2020). Gases renovables: tecnologías, usos y beneficios. Bloque 1. Introducción al biogás. *Universitat Oberta de Catalunya*. <https://estaticos.naturgy.com/fundacion/B1-introduccion-biogas-scorm/curso/pdf/B1-introduccion-biogas.pdf>

García, A. (2021). *Co-digestión anaerobia de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales para producir biogás*.

García, V. (2015). MANUAL DE BIOGÁS. Conceptos básicos. Beneficios de su producción y la aplicación de sus sub-productos. In *Dirección de Sustentabilidad, Medio Ambiente y Cambio Climático*. https://www.gba.gov.ar/sites/default/files/agroindustria/docs/Manual_de_Biogas01.pdf

Gomez, M. (2001). *Method 1684 Total , Fixed , and Volatile Solids in Water , Solids , and Biosolids Draft January 2001 U . S . Environmental Protection Agency Office of Water Office of Science and Technology Engineering and Analysis Division (4303)*. January, 1–13. http://water.epa.gov/scitech/methods/cwa/bioindicators/upload/2008_11_25_methods_method_biological_1684-bio.pdf

Grangeiro, L. C., Almeida, S. G. C. de, Mello, B. S. de, Fuess, L. T., Sarti, A., & Dussán, K. J. (2019). New trends in biogas production and utilization. In *Sustainable Bioenergy: Advances and Impacts* (pp. 199–223). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817654-2.00007-1>

Hernández, D., Pinilla, F., Rebolledo-leiva, R., Aburto-Hole, J., Díaz, J., Quijano, G., Gonzales-García, S., & Tenreiro, C. (2024). *Anaerobic Co-Digestion of Agro-Industrial Waste Mixtures for Biogas Production : An Energetically Sustainable Solution*.

Hernandez, S. C., Sanchez, E. N., Béteau, J. F., & Jiménez, L. D. (2014). Análisis de un proceso de tratamiento de efluentes para producción de metano. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, 11(2), 236–246. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2014.02.006>

Huanca, E. D. (2017). *Producción de biogás a partir de los lodos de aguas residuales urbanas*

- *Puno*.

- Huang, X. (2024). *The Promotion of Anaerobic Digestion Technology Upgrades in Waste Stream Treatment Plants for Circular Economy in the Context of “ Dual Carbon ”: Global Status , Development Trend , and Future Challenges*.
- Hurtado, C. (2023). Revisión sistemática de la valorización del biogás de residuos sólidos del relleno sanitario Portillo Grande. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 26(51), e25264. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i51.25264>
- Iglesia, J. A. D., Caballero, A. M., & Romero, E. J. A. (2016). *Metodología para obtención de biogás a partir de residuos de cosechas del arroz utilizando como inóculo aguas residuales*.
- Jimenez, D. M. (2012). *Evaluación de los parámetros de un biodigestor anaerobio tipo continuo*.
- Kabbashi, N. (2011). Sewage sludge composting simulation as carbon/nitrogen concentration change. *Journal of Environmental Sciences*, 23(11), 1925–1928. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60642-0](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60642-0)
- Kalloum, S., Bouabdessalem, H., Touzi, A., Iddou, A., & Ouali, M. S. (2011). Biogas production from the sludge of the municipal wastewater treatment plant of Adrar city (southwest of Algeria). *Biomass and Bioenergy*, 35(7), 2554–2560. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.012>
- Kavisa, D. De, Sari, N., Hawali, H., & Matin, A. (2020). *Codigestión*. 8(1), 1–7.
- Luque, C. (2017). *Tratamiento de lodos residuales generados en la planta de tratamiento de aguas residuales Doris Mendoza utilizando digestor anaerobio*. 1–78.
- Mantilla, K. G. E. (2021). Biogás de residuos orgánicos como fuente de energía renovable. *UASB-DIGITAL Repositorio Institucional Del Organismo de La Comunidad Andina, CAN*, 99.
- Martínez, L. (2005). El estiercol y las practicas agrarias respetuosas con el ambiente. *Hojas Divulgadoras*, 24. https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1994_01.pdf

- Montenegro, M. (2012). *Biogás: una alternativa ecológica para la producción de energía*. 7(85), 881–894.
- Morero, B., Vicentin, R., & Campanella, E. A. (2017). Assessment of biogas production in Argentina from co-digestion of sludge and municipal solid waste. *Waste Management*, 61, 195–205. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.033>
- Municipalidad Provincial de Sandia, E. (2022). *DIAGNOSTICO DE LOS SISTEMAS DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO DE LA CIUDAD DE SANDIA Y CENTROS POBLADOS ALEDAÑOS*.
- Oropeza, N., Bahía, B., Ignacio Comonfort, E., del Bosque Chetumal, C., & Roo, Q. (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. In *Caos Conciencia* (Vol. 1).
- Pachauri, R., Meyer, L., Allen, M., Barros, V., Broome, J., & Cramer, W. (2014). Cambio climático 2014 informe de síntesis. In *Contribución de los Grupos de trabajo I,II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf
- Paneque, V. M., Calaña, J. M., Calderón, M., Borges, Y., Hernández, T. C., & Caruncho, M. (2010). *Manual de técnicas analíticas para análisis de suelo, foliar, abonos orgánicos y fertilizantes químicos* (INCA). http://ediciones.inca.edu.cu/files/folletos/folleto_suelos.pdf
- Parra Huertas, R. (2015). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *Producción + Limpia*, 10(2), 142–159. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1909-04552015000200014
- Patiño, L. E. bernal, & Ramírez, L. S. S. (2018). Diseño conceptual de un biodigestor partiendo de estiércol vacuno y avícola, producido en la finca el Guarumal, para la obtención de biogás. In *Transcommunication* (Vol. 53, Issue 1). <http://www.tfd.org.tw/opencms/english/about/background.html><http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.001><http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.055><https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.02.006><https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.04.024>

- Pavi, S. A. M., & Valencia, C. A. P. (2013). DOCUMENTACIÓN DE LA TÉCNICA DE CROMATOGRAFÍA DE GASES EN EL ANÁLISIS DE HIDROCARBUROS ALIFÁTICOS EN AGUAS RESIDUALES. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- Pimentel, J., Amante-Orozco, A., Martínez-Esquivel, R., Rössel-Kipping, E. D., García-Herrera, E. J., & Gómez-González, A. (2019). Digestión anaerobia de estiércol de ovino para producir biogás y bioabono. *Agro Productividad*, 12(4), 39–43. <https://doi.org/10.32854/agrop.v0i0.1201>
- Porras, L. (2000). Diseño estadístico de experimentos, análisis de la varianaza y temas relacionados: tratamiento informatico mediante SPSS. In P. sur de Ediciones (Ed.), 2000 (pp. 1–10).
- R.M. N°093-2018-VIVIENDA. (2018). *Protocolo de monitoreo de biosólidos*.
- Rojas, R. (2002). *Curso Internacional “Gestión integral de tratamiento de aguas residuales” 25 al 27 de setiembre de 2002 conferencia sistemas de tratamiento de aguas residuales*.
- Rossana, B., Corcio, J., Asesor, B., Luis, I., & Albitres, M. (2006). *Tesis Para optar el Título de Ingeniero Químico*.
- Rossana, B., Corcio, J., Asesor, B., Luis, I., Albitres, M., Huanca Ccaza, Ojeda, L., Lizeth, L., Molina, G., Maria, A., Bermudez, M., Galvis, J., Ximena, T., Guerrero, R., Por, P., Jhon, :, Andrade, P., Jhon, Q., & Peralta, E. P. (2019). *Producción de biogás a partir de los lodos de aguas residuales urbanas - Puno*.
- Rumiche, S. O. (2021). *Uso de microorganismos benéficos para mejorar la calidad y cantidad de biogás producido a partir de desechos orgánicos del comedor UNI, controlando la temperatura mediante biodigestores automatizados*. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/22298>
- Sandoval, A. M., Santacruz Flores, F. R., Chuquer Sola, D. S., & Astorga García, D. (2020). Análisis de inóculos microbianos para la optimización de la producción de biogás a partir de fangos residuales. *Revista Alfa*, 4(12), 255–284. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v4i12.88>
- Spahr, D. A., Carrizo, J. F., Rubiolo, G. S., Patiño, M. B., & Manera, M. E. (2019).

Relevamiento, evaluación y optimización de biodigestores. *Istec*, 36–54.

Torre, A. (2018). Diseño y análisis ambiental de una planta de tratamiento de aguas residuales en la ciudad de Huaraz. *Pontificia Universidad Católica Del Perú*, 104.

Udaeta, M. E. M., Guilherme, G. A., da Silva, V. O., & Galvão, L. C. R. (2019). Basic and procedural requirements for energy potential from biogas of sewage treatment plants. *Journal of Environmental Management*, 236, 380–387. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.110>

Varnero, M. (2011). *Manual de biogás* (C. R. de barreras para la electrificación rural con energías Renovables (ed.); CHI/00/G32).

Velásquez, P. M. M. (2022). *Efecto de la temperatura en el proceso de obtención de biogás a partir de lodos en lagunas de estabilización en la ciudad de Juliaca*.

Xavier, C. D. A., & Junior, J. D. L. (2010). *Parámetros de dimensionamiento para biodigestores batelada operados com dejetos de vacas leiteiras com e sem uso de inóculo*. <https://www.scielo.br/j/eagri/a/cYnDMSKWtmNQkfNZJQDR7Cy/?format=pdf&lang=pt>

ANEXOS

Anexo I: Carta de autorización de acceso a la planta de tratamiento de aguas residuales



Municipalidad Provincial De Sandia
Jr. Arica 420
Área Técnica Municipal en Saneamiento Básico y Salud Pública



CARTA DE AUTORIZACIÓN DE ACCESO A LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Yo, Isau Lazo Huanca, identificado con DNI N°43194751, en mi calidad de jefe del Área Técnica Municipal en Saneamiento Básico y Salud Pública de la Sub – Gerencia de Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Municipalidad Provincial de Sandia con R.U.C. 20192145831, ubicada en el distrito de Sandia, provincia de Sandia del departamento de Puno.

Otorgo la autorización

Al señor Elio Ronaldino Mamani Ccora identificado con DNI N° 72202027 bachiller de la carrera de Ingeniería Ambiental y Forestal de la Universidad Nacional de Juliaca para que pueda acceder a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Ciudad de Sandia, con la finalidad de que pueda desarrollar su trabajo de investigación denominado **“Influencia de la relación carbono – nitrógeno en el tiempo de generación y calidad de biogás producido a partir de estiércol y lodos residuales de la PTAR-Sandia”**.


Ing. Isau Lazo Huanca
AREA TECNICA MUNICIPAL EN
SANEAMIENTO BASICO Y SALUD PUBLICA

Anexo II: Resultados del análisis físico químico de los lodos residuales



Laboratorios Analíticos del Sur

Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado – Arequipa – Perú
www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

+51 (054) 443294
+51 (054) 444582
+51 958 961 254
+51 958 961 253

Clave generada : 375896EC

INFORME DE ENSAYO LAS01-SD-24-00001

Fecha de emisión: 15/01/2024

Página 1 de 3

Señores : ELIO RONALDINO MAMANI CCORA
Dirección : JIRON JORGE CHAVEZ 220 SANDIA
Atención : ELIO RONALDINO MAMANI CCORA

Proyecto : INFLUENCIA DE LA RELACION CARBONO - NITROGENO EN EL TIEMPO DE GENERACION Y CALIDAD DEL BIOGAS PRODUCIDO A PARTIR DE ESTIERCOL Y LODOS RESIDUALES PTAR - SANDIA 2024

Muestreo realizado por : Cliente : ELIO RONALDINO MAMANI CCORA

Registro de muestreo : Cadena de custodia N°: 002-24

Número de muestras : 1

Fecha de recepción : 4/01/2024
Fecha de ensayo : 4/01/2024

Cod. Interno L.A.S.	(c) Nombre de muestra	(c) Matriz de la muestra	(c) Zona, Urb, AAHH/Dist/Prov/Depart.	(c) Punto de muestreo y/o coordenadas	(c) Fecha de inicio de muestreo	(c) Hora de inicio de muestreo
SD24000002	M-01-LODOS-PTAR-SANDIA	Lodo	SANDIA / SANDIA / SANDIA / PUNO	450835 8417209	4/01/2024	05:54

Condiciones de recepción de la muestra

Cooler refrigerado

Observación

Sixto Vicente Juárez Neira
Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Sixto Vicente Juárez Neira
Gerente General
Ing. Químico C.I.P. 19474

"Los ensayos acreditados del presente informe/certificado al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo del os miembros firmantes de IAAC e ILAC"

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

"a<Valor numérico"=Limite de detección del método, "b<Valor Numérico"=Limite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos 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. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada.

Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió



Validar el informe
via web



Laboratorios Analíticos del Sur

Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Rio Seco C-1 Cerro Colorado – Arequipa – Perú
www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

+51 (054) 443294
+51 (054) 444582
+51 958 961 254
+51 958 961 253

Clave generada : 375896EC

INFORME DE ENSAYO LAS01-SD-24-00001

Fecha de emisión:15/01/2024

Página 2 de 3

RESULTADOS DE ENSAYO FISICO QUÍMICO

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	*7005	*7006	*7023	*7097
		N	MO	pH (Compensado a 25°C)	H ₂ O
		g/kg	%	Unidad de pH	%
SD24000002	M-01-LODOG-PTAR-SANDIA	16,59	39,80	5,513	85,71

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Sixto Vicente Juárez Neira
Gerente General
Ing. Químico C.I.P.19474

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

"a<Valor numérico">=Limite de detección del método, "b<Valor Numérico">=Limite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos 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. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>

Parque Ind. Rio Seco C-1 Cerro Colorado Arequipa Perú (054) 443294 (054) 444582



Validar el informe
vía web



Laboratorios Analíticos del Sur

Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Rio Seco C-1 Cerro Colorado – Arequipa – Perú
www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

+51 (054) 443294
+51 (054) 444582
+51 958 961 254
+51 958 961 253

Clave generada : 375896EC

INFORME DE ENSAYO LAS01-SD-24-00001

Fecha de emisión: 15/01/2024

Página 3 de 3

MÉTODOS DE ENSAYO UTILIZADOS

Código	Título	Rango de método analítico
*7035	Método de Ensayo para Nitrógeno total por Destilación - Fotometría en suelos y sedimentos	[0 - 1000] g/kg
*7036	Método de Ensayo para Materia Orgánica - Fotometría en suelos y sedimentos	[0 - 10] %
*7023	Determinación de pH 1.2 potenciométrica en suelos - pH	[0 - 14] Unidad de pH
*7027	Método de ensayo para la determinación de Humedad a 70C	[0.001 - 100] %

a : Límite detección

b : Límite de cuantificación

----- Fin del informe -----

Sixto
Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Sixto Vicente Juárez Neira
Gerente General
Ing. Químico C.I.P. 19474

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

"a"<Valor numérico">Límite de detección del método, "b"<Valor Numérico">Límite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos 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. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

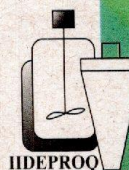
Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Validar el informe
vía web



Anexo III: Formulario de cotización IIDEPROQ

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA, PETROQUÍMICA, AMBIENTAL Y ALIMENTOS



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE PROCESOS QUÍMICOS
Acreditado al ARCU SUR - MERCOSUR

FORMULARIO DE COTIZACION IIDEPROQ Nº 36/2024

SERVICIO DE ANALISIS DE METANO Y CO2
PROYECTO: SERVICIO DE ANÁLISIS

SOLICITANTE: UNAJ - PERU
ATN: UNIV. ELIO MAMANI CCORA

Nº	Descripción	Cant	Precio Unit.	Precio Total
1	Metano y CO2 (Cromatografía)	5	427.00	2,135.00

TOTAL Bs. 2,135.00

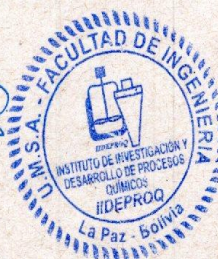
SON: DOSMIL CIENTO TREINTA Y CINCO 00/100 BOLIVIANOS

NOTAS:

Plazo máximo de entrega de resultados 15 días calendario.
El tiempo de validez de la oferta es de 30 días calendario.

La Paz, junio 10 de 2024

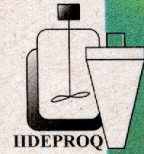
Jorge Oscar Mendez Bengur.
ADMINISTRADOR IIDEPROQ-UMSA



Anexo IV: Informe de análisis del experimento E1

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA, PETROQUÍMICA, AMBIENTAL Y ALIMENTOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE PROCESOS QUÍMICOS
Acreditado al ARCU SUR - MERCOSUR



N° IIDEPROQ 016-2024

INFORME DE ANÁLISIS

Atención	Univ. Elio Mamani
Responsable de Laboratorio	M.Sc. Lic. Carlos H. Díaz Mercado TÉCNICO EN INVESTIGACIÓN I - IIDEPROQ
Responsable de análisis	Ing. Ph.D. René Álvarez Apaza
Tipo de muestra	1 Muestra de Biogás
Responsable del muestreo	REALIZADO POR EL CLIENTE
Fecha de Recepción de muestra	10/06/2024
Fecha de emisión de informe	14/06/2024

RESULTADOS

CÓDIGO	UNIDAD	CH ₄	CO ₂	MÉTODO
CG-E1 SANDÍA	%	49,7383	15,0627	Cromatografía de Gases, Detector TCD, Columna Supelco- Carboxen.

OBSERVACIONES:

Ninguna.


M.Sc. Lic. Carlos Héctor Díaz Mercado
TÉCNICO DE INVESTIGACIÓN
RESPONSABLE DE LABORATORIO
IIDEPROQ - UMSA



Anexo V: Informe de análisis del experimento IRE1

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA, PETROQUÍMICA, AMBIENTAL Y ALIMENTOS



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE PROCESOS QUÍMICOS

Acreditado al ARCU SUR - MERCOSUR

N° IIDEPROQ 04-2024

INFORME DE ANÁLISIS

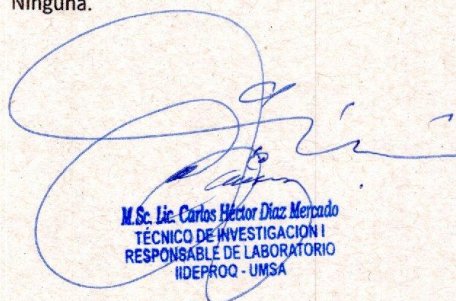
Atención	Univ. Elio Mamani
Responsable de Laboratorio	M.Sc. Lic. Carlos H. Díaz Mercado TÉCNICO EN INVESTIGACIÓN I - IIDEPROQ
Responsable de análisis	Ing. Ph.D. René Álvarez Apaza
Tipo de muestra	1 Muestra de Biogás
Responsable del muestreo	REALIZADO POR EL CLIENTE
Fecha de Recepción de muestra	5/04/2024
Fecha de emisión de informe	15/04/2024

RESULTADOS

CÓDIGO	UNIDAD	CH ₄	CO ₂	MÉTODO
CG-1RE1	%	56,4875	9,3419	Cromatografía de Gases, Detector TCD, Columna Supelco- Carboxen.

OBSERVACIONES:

Ninguna.


M.Sc. Lic. Carlos H. Díaz Mercado
TÉCNICO DE INVESTIGACIÓN I
RESPONSABLE DE LABORATORIO
IIDEPROQ - UMSA

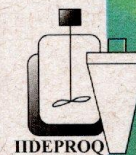


Anexo VI: Informe de análisis del experimento 2RE1

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA, PETROQUÍMICA, AMBIENTAL Y ALIMENTOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE PROCESOS QUÍMICOS

Acreditado al ARCU SUR - MERCOSUR



N° IIDEPROQ 018-2024

INFORME DE ANÁLISIS

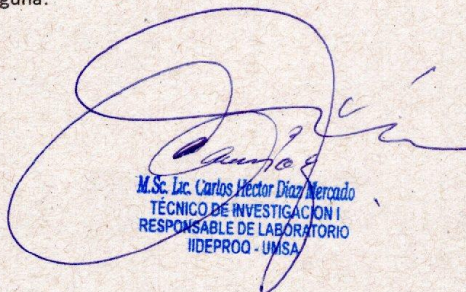
Atención	Univ. Elio Mamani
Responsable de Laboratorio	M.Sc. Lic. Carlos H. Díaz Mercado TÉCNICO EN INVESTIGACIÓN I - IIDEPROQ
Responsable de análisis	Ing. Ph.D. René Álvarez Apaza
Tipo de muestra	1 Muestra de Biogás
Responsable del muestreo	REALIZADO POR EL CLIENTE
Fecha de Recepción de muestra	10/06/2024
Fecha de emisión de informe	14/06/2024

RESULTADOS

CÓDIGO	UNIDAD	CH ₄	CO ₂	MÉTODO
GC-2RE1 SANDIA	%	59,4872	11,6174	Cromatografía de Gases, Detector TCD, Columna Supelco- Carboxen.

OBSERVACIONES:

Ninguna.


M.Sc. Lic. Carlos H. Díaz Mercado
TÉCNICO DE INVESTIGACIÓN I
RESPONSABLE DE LABORATORIO
IIDEPROQ - UMSA



Anexo VII: Informe de análisis del experimento E2

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA, PETROQUÍMICA, AMBIENTAL Y ALIMENTOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE PROCESOS QUÍMICOS

Acreditado al ARCU SUR - MERCOSUR



N° IIDEPROQ 010-2024

INFORME DE ANÁLISIS

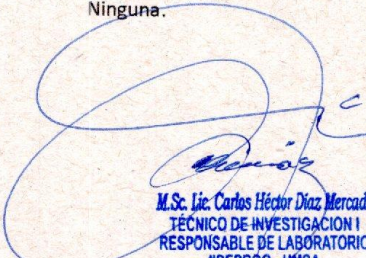
Atención	Univ. Elio Mamani
Responsable de Laboratorio	M.Sc. Lic. Carlos H. Díaz Mercado TÉCNICO EN INVESTIGACIÓN I - IIDEPROQ
Responsable de análisis	Ing. Ph.D. René Álvarez Apaza
Tipo de muestra	1 Muestra de Biogás
Responsable del muestreo	REALIZADO POR EL CLIENTE
Fecha de Recepción de muestra	5/04/2024
Fecha de emisión de informe	15/04/2024

RESULTADOS

CÓDIGO	UNIDAD	CH ₄	CO ₂	MÉTODO
CG-E2	%	54,2091	7,8068	Cromatografía de Gases, Detector TCD, Columna Supelco- Carboxen.

OBSERVACIONES:

Ninguna.

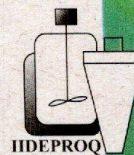

M.Sc. Lic. Carlos Héctor Díaz Mercado
TÉCNICO DE INVESTIGACIÓN I
RESPONSABLE DE LABORATORIO
IIDEPROQ-UMSA



Anexo VIII: Informe de análisis del experimento IRE2

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA, PETROQUÍMICA, AMBIENTAL Y ALIMENTOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE PROCESOS QUÍMICOS
Acreditado al ARCU SUR - MERCOSUR



N° IIDEPROQ 07-2024

INFORME DE ANÁLISIS

Atención	Univ. Elio Mamani
Responsable de Laboratorio	M.Sc. Lic. Carlos H. Díaz Mercado TÉCNICO EN INVESTIGACIÓN I - IIDEPROQ
Responsable de análisis	Ing. Ph.D. René Álvarez Apaza
Tipo de muestra	1 Muestra de Biogás
Responsable del muestreo	REALIZADO POR EL CLIENTE
Fecha de Recepción de muestra	5/04/2024
Fecha de emisión de informe	15/04/2024

RESULTADOS

CÓDIGO	UNIDAD	CH ₄	CO ₂	MÉTODO
CG-1 RE2	%	55,0715	11,2093	Cromatografía de Gases, Detector TCD, Columna Supelco- Carboxen.

OBSERVACIONES:

Ninguna.


M.Sc. Lic. Carlos H. Díaz Mercado
TÉCNICO DE INVESTIGACIÓN I
RESPONSABLE DE LABORATORIO
IIDEPROQ - UMSA



Anexo IX: Informe de análisis del experimento 2RE2

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA, PETROQUÍMICA, AMBIENTAL Y ALIMENTOS



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE PROCESOS QUÍMICOS

Acreditado al ARCU SUR - MERCOSUR

N° IIDEPROQ 06-2024

INFORME DE ANÁLISIS

Atención	Univ. Elio Mamani
Responsable de Laboratorio	M.Sc. Lic. Carlos H. Díaz Mercado TÉCNICO EN INVESTIGACIÓN I - IIDEPROQ
Responsable de análisis	Ing. Ph.D. René Álvarez Apaza
Tipo de muestra	1 Muestra de Biogás
Responsable del muestreo	REALIZADO POR EL CLIENTE
Fecha de Recepción de muestra	5/04/2024
Fecha de emisión de informe	15/04/2024

RESULTADOS

CÓDIGO	UNIDAD	CH ₄	CO ₂	MÉTODO
CG-2RE2	%	55,9541	10,0892	Cromatografía de Gases, Detector TCD, Columna Supelco- Carboxen.

OBSERVACIONES:

Ninguna.

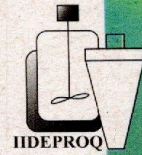

M.Sc. Lic. Carlos Héctor Díaz Mercado
TÉCNICO DE INVESTIGACIÓN I
RESPONSABLE DE LABORATORIO
IIDEPROQ - UMSA



Anexo X: Informe de análisis del experimento E3

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA, PETROQUÍMICA, AMBIENTAL Y ALIMENTOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE PROCESOS QUÍMICOS
Acreditado al ARCU SUR - MERCOSUR



N° IIDEPROQ 017-2024

INFORME DE ANÁLISIS


Atención	Univ. Elio Mamani
Responsable de Laboratorio	M.Sc. Lic. Carlos H. Díaz Mercado TÉCNICO EN INVESTIGACIÓN I - IIDEPROQ
Responsable de análisis	Ing. Ph.D. René Álvarez Apaza
Tipo de muestra	1 Muestra de Biogás
Responsable del muestreo	REALIZADO POR EL CLIENTE
Fecha de Recepción de muestra	10/06/2024
Fecha de emisión de informe	14/06/2024

RESULTADOS

CÓDIGO	UNIDAD	CH ₄	CO ₂	MÉTODO
CG-E3 SANDIA	%	41,9448	16,4082	Cromatografía de Gases, Detector TCD, Columna Supelco- Carboxen.

OBSERVACIONES:

Ninguna.


M.Sc. Lic. Carlos H. Díaz Mercado
TÉCNICO DE INVESTIGACIÓN I
RESPONSABLE DE LABORATORIO
IIDEPROQ / UMSA



Anexo XI: Informe de análisis del experimento IRE3

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA, PETROQUÍMICA, AMBIENTAL Y ALIMENTOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE PROCESOS QUÍMICOS

Acreditado al ARCU SUR - MERCOSUR



N° IIDEPROQ 05-2024

INFORME DE ANÁLISIS

Atención	Univ. Elio Mamani
Responsable de Laboratorio	M.Sc. Lic. Carlos H. Díaz Mercado TÉCNICO EN INVESTIGACIÓN I - IIDEPROQ
Responsable de análisis	Ing. Ph.D. René Álvarez Apaza
Tipo de muestra	1 Muestra de Biogás
Responsable del muestreo	REALIZADO POR EL CLIENTE
Fecha de Recepción de muestra	5/04/2024
Fecha de emisión de informe	15/04/2024

RESULTADOS

CÓDIGO	UNIDAD	CH ₄	CO ₂	MÉTODO
CG-IRE3	%	31,1524	3,2378	Cromatografía de Gases, Detector TCD, Columna Supelco- Carboxen.

OBSERVACIONES:

Ninguna.


M.Sc. Lic. Carlos H. Díaz Mercado
TÉCNICO DE INVESTIGACIÓN I
RESPONSABLE DE LABORATORIO
IIDEPROQ - UMSA



Anexo XII: Informe de análisis del experimento 2RE3

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA, PETROQUÍMICA, AMBIENTAL Y ALIMENTOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE PROCESOS QUÍMICOS

Acreditado al ARCU SUR - MERCOSUR



N° IIDEPROQ 019-2024

INFORME DE ANÁLISIS

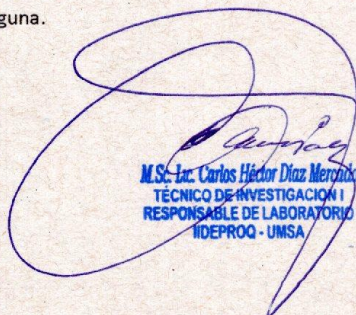
Atención	Univ. Elio Mamani
Responsable de Laboratorio	M.Sc. Lic. Carlos H. Díaz Mercado TÉCNICO EN INVESTIGACIÓN I - IIDEPROQ
Responsable de análisis	Ing. Ph.D. René Álvarez Apaza
Tipo de muestra	1 Muestra de Biogás
Responsable del muestreo	REALIZADO POR EL CLIENTE
Fecha de Recepción de muestra	10/06/2024
Fecha de emisión de informe	14/06/2024

RESULTADOS

CÓDIGO	UNIDAD	CH ₄	CO ₂	MÉTODO
CG-2RE3 SANDIA	%	33,0607	19,0658	Cromatografía de Gases, Detector TCD, Columna Supelco- Carboxen.

OBSERVACIONES:

Ninguna.


M.Sc. Lic. Carlos H. Díaz Mercado
TÉCNICO DE INVESTIGACIÓN I
RESPONSABLE DE LABORATORIO
IIDEPROQ - UMSA



Anexo XIII: Informe de análisis del experimento E4

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA, PETROQUÍMICA, AMBIENTAL Y ALIMENTOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE PROCESOS QUÍMICOS

Acreditado al ARCU SUR - MERCOSUR



N° IIDEPROQ 015-2024

INFORME DE ANÁLISIS

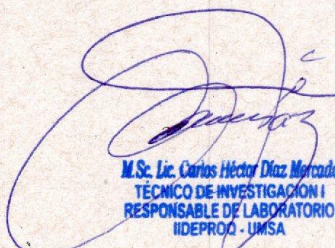
Atención	Univ. Elio Mamani
Responsable de Laboratorio	M.Sc. Lic. Carlos H. Díaz Mercado TÉCNICO EN INVESTIGACIÓN I - IIDEPROQ
Responsable de análisis	Ing. Ph.D. René Álvarez Apaza
Tipo de muestra	1 Muestra de Biogás
Responsable del muestreo	REALIZADO POR EL CLIENTE
Fecha de Recepción de muestra	10/06/2024
Fecha de emisión de informe	14/06/2024

RESULTADOS

CÓDIGO	UNIDAD	CH ₄	CO ₂	MÉTODO
CG-E4 SANDIA	%	41,0743	13,2852	Cromatografía de Gases, Detector TCD, Columna Supelco- Carboxen.

OBSERVACIONES:

Ninguna.

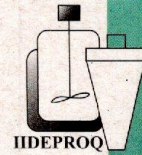

M.Sc. Lic. Carlos Héctor Díaz Mercado
TÉCNICO DE INVESTIGACIÓN I
RESPONSABLE DE LABORATORIO
IIDEPROQ - UMSA



Anexo XIV: Informe de análisis del experimento 1RE4

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA, PETROQUÍMICA, AMBIENTAL Y ALIMENTOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE PROCESOS QUÍMICOS
Acreditado al ARCU SUR - MERCOSUR



N° IIDEPROQ 08-2024

INFORME DE ANÁLISIS

Atención	Univ. Elio Mamani
Responsable de Laboratorio	M.Sc. Lic. Carlos H. Díaz Mercado TÉCNICO EN INVESTIGACIÓN I - IIDEPROQ
Responsable de análisis	Ing. Ph.D. René Álvarez Apaza
Tipo de muestra	1 Muestra de Biogás
Responsable del muestreo	REALIZADO POR EL CLIENTE
Fecha de Recepción de muestra	5/04/2024
Fecha de emisión de informe	15/04/2024

RESULTADOS

CÓDIGO	UNIDAD	CH ₄	CO ₂	MÉTODO
CG-1RE4	%	46,0686	17,1949	Cromatografía de Gases, Detector TCD, Columna Supelco- Carboxen.

OBSERVACIONES:

Ninguna.

M.Sc. Lic. Carlos Héctor Díaz Mercado
TÉCNICO DE INVESTIGACIÓN I
RESPONSABLE DE LABORATORIO
IIDEPROQ - UMSA



Anexo XV: Informe de análisis del experimento 2RE4

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA, PETROQUÍMICA, AMBIENTAL Y ALIMENTOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE PROCESOS QUÍMICOS
Acreditado al ARCU SUR - MERCOSUR



N° IIDEPROQ 09-2024

INFORME DE ANÁLISIS

Atención	Univ. Elio Mamani
Responsable de Laboratorio	M.Sc. Lic. Carlos H. Díaz Mercado TÉCNICO EN INVESTIGACIÓN I - IIDEPROQ
Responsable de análisis	Ing. Ph.D. René Álvarez Apaza
Tipo de muestra	1 Muestra de Biogás
Responsable del muestreo	REALIZADO POR EL CLIENTE
Fecha de Recepción de muestra	5/04/2024
Fecha de emisión de informe	15/04/2024

RESULTADOS

CÓDIGO	UNIDAD	CH ₄	CO ₂	MÉTODO
CG-2RE4	%	39,1539	3,6537	Cromatografía de Gases, Detector TCD, Columna Supelco- Carboxen.

OBSERVACIONES:

Ninguna.


M.Sc. Lic. Carlos Héctor Díaz Mercado
TÉCNICO DE INVESTIGACIÓN I
RESPONSABLE DE LABORATORIO
IIDEPROQ-UMSA



Anexo XVI Prueba de hipótesis de la variable del tiempo de generación de biogás

Variable tiempo de generación del biogás

Hipótesis:

Ho: No existe influencia de la relación óptima de carbono – nitrógeno en el tiempo de generación del biogás a partir de estiércol y lodos residuales de la PTAR – Sandía 2024.

H_a: Existe influencia de la relación óptima de carbono – nitrógeno en el tiempo de generación del biogás a partir de estiércol y lodos residuales de la PTAR – Sandía 2024.

$$\alpha=5\%=0.05$$

Si P-valor $\leq \alpha$, se rechaza Ho y se acepta Ha.

A. Prueba de normalidad

Ho: Los datos analizados siguen una distribución normal.

H₁: Los datos analizados no siguen una distribución normal.

Tabla 11

Resumen de procesamiento de datos de tiempo de generación del biogás

	Casos validos	Porcentaje	Perdidos	Porcentaje	Total	Porcentaje
	N		N		N	
Tiempo de generación del biogás	12	100.0%	0	0.0%	12	100.0%

Nota. Generada en el programa SPSS.

A continuación, se determina la prueba de normalidad.

Tabla 12*Pruebas de normalidad de tiempo de generación de biogás*

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Tiempo de generación del biogás	0.180	12	0.200*	0.961	12	0.804

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Nota. Generada en el programa SPSS.

Dado que la muestra utilizada consta de 12 observaciones, se procedió a verificar la normalidad de los datos mediante la prueba de Shapiro-Wilk. El análisis arrojó un valor de significancia de 0.804, superior al 0.05, lo que sugiere que la hipótesis de normalidad es aceptable. Esto sugiere que es apropiado utilizar pruebas estadísticas paramétricas, por ello, se eligió el análisis de varianza (ANOVA).

Tabla 13*Prueba de homogeneidad de tiempo de generación de biogás*

		Prueba de			
		Levene	gl1	gl2	Sig.
Tiempo de generación del biogás	Basada en la media	0.554	1	10	0.474
	Basada en la mediana	0.160	1	10	0.698
	Basada en la mediana y con gl ajustado	0.160	1	8.942	0.699
	Basada en la media recortada	0.452	1	10	0.517

Nota. Generada en el programa SPSS.

Finalmente se determina con la prueba ANOVA.

Tabla 14
Prueba ANOVA de tiempo de generación de biogás

	Suma total de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	133.333	1	133.333	36.697	0.001
Dentro de grupos	36.333	10	3.633		
Total	169.667	11			

Nota. Generada en el programa SPSS.

De acuerdo con los datos presentados en la tabla 14, el valor $F= 36.697$ es elevado y la significancia correspondiente $p<0.001$ se encuentra por debajo del nivel de significancia de referencia $\alpha=0.05$. Esto indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los grupos analizados, lo que lleva a rechazar la hipótesis nula y respaldar la hipótesis de investigación de que la relación carbono - nitrógeno influyó en el tiempo de generación del biogás a partir de estiércol y lodos residuales de la PTAR – Sandía 2024.

Anexo XVII: Prueba de hipótesis de la variable calidad del biogás

Variable calidad del biogás

Hipótesis:

Ho: No existe influencia de la relación óptima de carbono – nitrógeno en la calidad del biogás a partir de estiércol y lodos residuales de la PTAR – Sandía 2024.

H_a: Existe influencia de la relación óptima de carbono – nitrógeno en la calidad del biogás a partir de estiércol y lodos residuales de la PTAR – Sandía 2024.

$$\alpha=5\%=0.05$$

Si P-valor $\leq \alpha$, se rechaza Ho y se acepta Ha.

A. Prueba de normalidad

Ho: Los datos analizados siguen una distribución normal.

H₁: Los datos analizados no siguen una distribución normal.

Tabla 15

Resumen de procesamiento de datos de calidad del biogás

	Casos validos	Porcentaje	Perdidos	Porcentaje	Total	Porcentaje
	N		N		N	
Calidad del biogás	12	100.0%	0	0.0%	12	100.0%

Nota. Generada en el programa SPSS.

A continuación, se determina la prueba de normalidad.

Tabla 16
Pruebas de normalidad de calidad de biogás

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Calidad del biogás	0.191	12	0.200*	0.925	12	0.334

*. Esto corresponde al límite inferior del nivel de significancia verdadera.

a. Ajuste de significación según Lilliefors

Nota. Generada en el programa SPSS.

La muestra considerada consta de 12 experimentos, por lo que se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk para comprobar si los datos seguían una distribución normal. El valor de significancia obtenido fue 0.334, superior al 0.05, sugiriendo que la hipótesis de normalidad se mantiene. Esto sugiere que es apropiado utilizar pruebas estadísticas paramétricas, por ello, se eligió el análisis de varianza (ANOVA).

Tabla 17
Prueba de homogeneidad de varianzas de calidad de biogás

		Prueba de			
		Levene	gl1	gl2	Sig.
Calidad del biogás	Basada en la media	2.357	1	10	0.156
	Basada en la mediana	1.612	1	10	0.233
	Basada en la mediana y con gl ajustado	1.612	1	8.470	0.238
	Basada en la media recortada	2.337	1	10	0.157

Nota. Generada en el programa SPSS.

Finalmente determinamos con la prueba ANOVA.

Tabla 18
Prueba ANOVA de calidad de biogás

	Suma total de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	808.685	1	808.685	38.351	0.001
Dentro de grupos	210.865	10	21.087		
Total	1019.550	11			

Nota. Generada en el programa SPSS.

Decisión: Según los resultados de la tabla 18, el valor $F= 38.351$ es alto y la significancia obtenida, $p<0.001$, se sitúa por debajo del nivel de referencia $\alpha=0.05$. Esto evidencia diferencias estadísticamente significativas entre los grupos evaluados, permitiendo rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis de investigación de que la relación carbono - nitrógeno influyó en la calidad del biogás generado a partir de estiércol y lodos residuales de la PTAR – Sandia 2024.

Anexo XVIII: Panel fotográfico

Figura 19

Formato llenado de cadena custodia

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.Ltda.
 Parq. Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado Arequipa.
 Telf: (054) 443294 Fax (054) 444582 Whatsapp: 98661254-958961253
 www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

CADENA DE CUSTODIA - SEDIMENTOS, LODOS Y SUELOS

Código Reg F-007-18 Versión: 00
 Aprobó por GO Fecha Rev 11/05/2023

Señores: Elio Ronoldino Mamani Coora RUC: 10722020273 Datos de envío
 Dirección: Sr. Jorge Chávez #220 Cotización: 23-SD-00091-01 Enviado por:
 Atención: e-mail: elioromacc@gmail.com Fecha: 04/01/23 Hora:
 Responsable del muestreo: Elio Ronoldino Mamani Coora Teléf: 986664621 Medio de envío
 Muestreado por el cliente: Muestreado por LAS: Proyecto/ Programa: Agencia: Aerolínea:
 T. Privado: Otros:

Codigo LAS (Número para ser llenado solo por el laboratorio)	Fecha	Hora	Codigo de campo	Tipo de Matriz (*)	Muestra Puntal Composito	Nombre de la Muestra	Lugar de muestreo		Envase				
							Zona, Urb, AAHH / Dist. / Prov. / Depart.	Punto de muestreo y/o coordenadas UTM	Plástico	Vidrio	Bolsa Plástica	Cantidad de muestra (kg)	
	04/01/23	05:54	LD	LOD	X	M-01-Lodos-PTAR-SMDM	Sandia / Sandia / Sandia / Puno	450835	04/01/23			X	0.5

NOTA: Estimado cliente, colocar el nombre de la muestra tal como desea que aparezca en el informe de ensayo

Observaciones: Responsable: _____
 Entregado por: _____
 Recibido por: _____
 Entregado por: _____
 Recibido por: _____

(*) Tipo de Matriz
 SUE Suelos
 BUEA Suelos Agrícolas
 SED Sedimentos
 LOD Lodos
 Otros No AC

Información a completar al momento de ingresar las muestras en LAS
 Envases adecuados y en buen estado:
 Temperatura (para ensayo Hg): _____
 Fecha de recepción: _____
 Hora de recepción: _____

Firma Repras. cliente: _____ Firma Entrega a LAS: _____ Firma Recibido (LAS): _____

Nota. Figura propia, 2024.

Figura 20

Reconocimiento y zonificación de cuadrantes



Nota. Figura propia, 2024.

Figura 21

Muestra compuesta para análisis en laboratorio



Nota. Figura propia, 2024.

Figura 22

Armado de los biodigestores



Nota. Figura propia, 2024.

Figura 23

Preparado del sustrato de la mezcla de estiércol y lodos residuales



Nota. Figura propia, 2024.

Figura 24

Prueba de combustión



Nota. Figura propia, 2024.

Anexo XIX: Protocolo de monitoreo de biosólidos aprobado con Resolución Ministerial N°093-2018- Vivienda



Resolución Ministerial

13 MAR. 2018

N° 093-2018-VIVIENDA

CONSIDERANDO:

Que, la Sexta Disposición Complementaria Final del Decreto Legislativo N° 1278, Decreto Legislativo que aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos establece que el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento emite, mediante Decreto Supremo, el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos de los Sistemas de Tratamiento generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas para consumo humano, Plantas de Tratamiento de Agua Residuales y otros sistemas vinculados a la prestación de los servicios de saneamiento, el cual debe contar con el refrendo del Ministerio del Ambiente

Que, mediante Decreto Supremo N° 015-2017-VIVIENDA, se aprueba el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, el cual tiene por objeto establecer las disposiciones para determinar las características de los Lodos, así como la clasificación, los parámetros para la producción y el control de la aplicación de los biosólidos provenientes de la estabilización de Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales domésticas o municipales;

Que, la Quinta Disposición Complementaria Final del referido Reglamento dispone que el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento en el término de ciento ochenta (180) días calendario aprueba, mediante Resolución Ministerial, el Protocolo de Monitoreo de Biosólidos;

Que, el Protocolo de Monitoreo de Biosólidos es la herramienta que permite establecer los procedimientos y metodologías que deben cumplirse para la determinación de la calidad de los Lodos provenientes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales u otros sistemas de saneamiento para la disposición final o reaprovechamiento, en el marco de lo establecido en las Condiciones Mínimas de Manejo de Lodos y las Instalaciones para su Disposición Final, aprobadas mediante Resolución Ministerial N° 128-2017-VIVIENDA;

De conformidad con lo dispuesto en la Ley N° 30156, Ley de Organización y Funciones del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, su Reglamento de Organización y Funciones, aprobado por Decreto Supremo N° 010-2014-VIVIENDA, modificado por el Decreto Supremo N° 006-2015-VIVIENDA y en el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, aprobado mediante Decreto Supremo N° 015-2017-VIVIENDA;



SE RESUELVE:

Artículo 1. Aprobación del Protocolo de Monitoreo de Biosólidos

Apruébese el Protocolo de Monitoreo de Biosólidos que como anexo forma parte integrante de la presente Resolución Ministerial.

Artículo 2. Publicación

La presente Resolución Ministerial y el Protocolo de Monitoreo de Biosólidos que se aprueba en el artículo precedente, son publicados en el Portal Institucional del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (www.vivienda.gob.pe) el mismo día de su publicación en el Diario Oficial El Peruano.

Regístrese, comuníquese y publíquese




.....
CARLOS BRUCE
Ministro de Vivienda,
Construcción y Saneamiento

PROTOCOLO DE MONITOREO DE BIOSÓLIDOS

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	3
2	JUSTIFICACIÓN.....	4
3	OBJETIVO	4
3.1	Objetivo general.....	4
3.2	Objetivo específico	4
4	MARCO LEGAL	4
5	ALCANCE Y APLICACIÓN DEL PROTOCOLO.....	5
6	METODOLOGÍA	5
6.1	Toma y manejo de muestra	5
6.1.1	Plan de monitoreo – Control de calidad en el monitoreo	5
6.1.2	Toma de muestra.....	6
6.1.3	Preservación - Conservación y transporte de muestra.....	17
6.1.4	Frecuencia de monitoreo.....	19
6.1.5	Documentación	19
6.1.6	Normas y buenas prácticas nacionales e internacionales	21
6.2	Análisis de muestras en laboratorios.....	21
6.2.1	Parámetros relevantes.....	21
6.2.2	Número de análisis.....	22
6.2.3	Términos de referencia para el análisis en los primeros 3 años.....	22
6.2.4	Términos referencia para el análisis luego de los 3 años	27
6.2.5	Manejo de los resultados de monitoreo	27
7	BIBLIOGRAFÍA.....	28
8	ANEXOS	29
8.1	Etiqueta del envase de muestra.....	29
8.2	Protocolo de transporte – Cadena de custodia.....	30
8.3	Equipos de muestreo de lodos o biosólidos	31



Índice de ilustraciones

ilustración 1:	Ejemplo de una tabla de números aleatorios (Brobst, 2017).....	13
Ilustración 2:	Las líneas 3 hasta 5 de la tabla de número aleatorios según Ilustración 1 con determinación de los 27 números de dos (2) dígitos que representan los números de las cuadras de donde se tomará la muestra de puntual del cuerpo del sustrato.	13
Ilustración 3:	Esquema de la laguna con malla de 100 cuadrados uniformes sobre toda la superficie de lodo o biosólido acumulado (cuadro con línea ancha).	14

Índice de tablas

Tabla 1: Cantidad de muestras requeridas (Brobst, 2017) 12

Tabla 2: Equipos de toma de muestra según consistencia del lodo o biosólido (Brobst, 2017) (Véase también el anexo) 16

Tabla 3: Condición de preservación y tiempos de almacenamiento de muestras de biosólidos (US EPA, POW Sludge Sampling And Analysis Guidance Document , 1989), (State of Ohio Environmental Protection Agency, 2009) (New Jersey Department of Environmental Protection, 2012) 19

TABLA 4: Normas y recomendaciones internacionales para la medición de los parámetros de biosólidos relevantes según el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (Moodley, Archer, Hawksworth, & Leibach, 2008) (New Jersey Department of Environmental Protection, 2012) (State of Ohio Environmental Protection Agency, 2009) (US EPA, Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge, 2003) 25



1 INTRODUCCIÓN

El Decreto Legislativo N° 1278, Decreto Legislativo que aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos¹ establece entre las finalidades de la gestión integral, la valorización de los residuos, a través de la reutilización, reciclaje, compostaje u otras alternativas de aprovechamiento o disposición final.

Por otro lado, el precitado Decreto Legislativo establece en su Sexta Disposición Complementaria Final que el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento regula el reaprovechamiento de lodos generados en las plantas de tratamiento de agua para consumo humano, las plantas de tratamiento de aguas residuales y otros sistemas vinculados a la prestación de los servicios de saneamiento, de acuerdo con el tipo de actividad a desarrollar.

En ese marco, se emitió el Decreto Supremo N° 015-2017-VIVIENDA que aprueba el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, el cual establece las características de los lodos; así como la clasificación, los parámetros para la producción y el control de la aplicación de biosólidos provenientes de la estabilización de lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) domésticas o municipales.

El Protocolo de Monitoreo de Biosólidos es la herramienta que permite establecer los procedimientos y metodologías que deben cumplirse para determinar si un lodo proveniente de una PTAR puede ser calificado como biosólido, cumpliendo exigencias definidas respecto:

- Al grado mínimo de estabilización,
- A concentraciones máximas de metales pesados y
- A concentraciones máximas de parámetros microbiológicos, según el caso.

Además, permite determinar las restricciones en la tasa de aplicación de biosólidos en suelos para evitar dotaciones en exceso de nitrógeno y metales pesados.

La aplicación del protocolo, ante la ausencia de capacidades y oferta actual de laboratorios acreditados a nivel Nacional permite el desarrollo de actividades de monitoreo y control del cumplimiento de las disposiciones contenidas en el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos Generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, contribuyendo a la protección del ambiente y la salud de las personas.



¹ Decreto Legislativo N° 1278, Decreto Legislativo que aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos se emitió en el marco de la Ley N° 30506, Ley que delega en el Poder Ejecutivo la facultad de legislar en materia de reactivación económica y formalización, seguridad ciudadana, lucha contra la corrupción, agua y saneamiento y reorganización de Petoperú S.A., mediante la cual el Congreso de la República delega en el Poder Ejecutivo la facultad para legislar, por el término de noventa (90) días calendario, entre otras, en materia de reactivación económica y formalización, así como en agua y saneamiento.

2 JUSTIFICACIÓN

El Protocolo de Monitoreo de Biosólidos es la herramienta que brinda la orientación técnica necesaria para sustentar la producción de biosólidos y su reaprovechamiento adecuado, de conformidad con lo establecido en el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. Asimismo, permitirá el desarrollo de acciones de monitoreo a cargo de productores y comercializadores, siendo una herramienta indispensable para las acciones de supervisión y fiscalización ambiental, ante la ausencia de laboratorios con acreditación de métodos necesarios para la caracterización de biosólidos.

Esta herramienta podrá utilizarse supletoriamente para la determinación de la calidad de los lodos generados en las PTAR u otros sistemas de saneamiento para la disposición final o reaprovechamiento en el marco de la Resolución Ministerial N° 128-2017-VIVIENDA.

3 OBJETIVO

3.1 Objetivo general

Estandarizar la metodología y unidades para el desarrollo del monitoreo, análisis de muestras y evaluación de biosólidos.

3.2 Objetivo específico

El protocolo de monitoreo tiene los siguientes objetivos específicos:

- a) Determinar el procedimiento y criterio técnico para la toma y manejo de muestras de lodos o sustratos de lodo producido en una PTAR; y,
- b) Definir criterios de análisis de estas muestras para evaluar si el lodo o sustrato de lodo producido en una PTAR cumple los criterios para ser calificado como biosólido.

4 MARCO LEGAL

El Protocolo de Monitoreo de Biosólidos es la herramienta que sirve como base para el desarrollo de las acciones de monitoreo, supervisión y fiscalización en el marco de lo establecido en el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. En este sentido estas acciones están vinculadas a la aplicación e implementación de las siguientes normas:

- Ley N° 28611, Ley General del Ambiente.
- Ley N° 28245, Ley Marco del Sistema Nacional de Gestión Ambiental.
- Ley N° 29325, Ley del Sistema Nacional de Evaluación y Fiscalización Ambiental.
- Ley N° 30224, Ley que crea el Sistema Nacional para la Calidad y el Instituto Nacional de Calidad.
- Decreto Legislativo N° 1280, Decreto Legislativo que aprueba la Ley Marco de la Gestión y Prestación de los Servicios de Saneamiento.
- Decreto Legislativo N° 1278, Decreto Legislativo que aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos.



- Decreto Supremo N° 014-2017-MINAM, que aprueba el Reglamento del Decreto Legislativo N° 1278, Decreto Legislativo que aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos.
- Decreto Supremo N° 019-2017-VIVIENDA, que aprueba el Reglamento del Decreto Legislativo N° 1280, Decreto Legislativo que aprueba la Ley Marco de la Gestión y Prestación de los Servicios de Saneamiento.
- Decreto Supremo N° 015-2017-VIVIENDA, que aprueba el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.
- Decreto Supremo N° 004-2015-PRODUCE, que aprueba el Reglamento de Organización y Funciones del Instituto Nacional de Calidad.
- Resolución Ministerial N° 128-2017-VIVIENDA, que aprueba las Condiciones Mínimas de Manejo de Lodos y las Instalaciones para su Disposición Final.

5 ALCANCE Y APLICACIÓN DEL PROTOCOLO

El Protocolo de Monitoreo de Biosólidos es aplicable de forma obligatoria para determinar si se ha producido un biosólido a partir de lodos o sustratos de lodos provenientes de una PTAR, así como para las acciones de monitoreo, supervisión y fiscalización en el proceso de producción y comercialización de biosólidos.

Por otro lado, el Protocolo de Monitoreo de Biosólidos se centra en la definición de condiciones para el análisis de los parámetros con límites definidos en el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales y otros sistemas de saneamiento que los generen.

No obstante, según el Reglamento precitado, la Dirección General de Asuntos Ambientales del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (en adelante, **MVCS**) puede exigir el monitoreo de parámetros adicionales. En este caso, es responsabilidad del productor o comercializador revisar si las condiciones definidas en el presente protocolo son aplicables para el monitoreo de parámetros adicionales.

El Protocolo de Monitoreo de Biosólidos debe ser aplicado para efectos de control operacional de los productores o comercializadores de biosólidos, sin perjuicio de la acreditación de laboratorios ante el Instituto Nacional de Calidad (en adelante, **INACAL**).

Asimismo, el presente Protocolo podrá ser aplicado para las actividades de monitoreo y supervisión en el marco de la Resolución Ministerial N° 128-2017-VIVIENDA "Aprueban Condiciones Mínimas de Manejo de Lodos y las Instalaciones para su Disposición Final".



6 METODOLOGÍA

6.1 Toma y manejo de muestra

6.1.1 Plan de monitoreo – Control de calidad en el monitoreo

El plan de monitoreo del lodo o biosólido es un documento adicional al manual de operación y mantenimiento de una PTAR (productora del lodo o biosólido) y es la base principal para el control de la calidad en el monitoreo. El plan debe asegurar condiciones similares cada vez que se realiza el monitoreo, a fin de asegurar la comparabilidad de los resultados, considerando los siguientes puntos:

- Metodología para la toma de muestra (se deben considerar las condiciones operacionales representativas de la PTAR productora del lodo o biosólido,

punto de toma muestra – de ser posible georreferenciación, volúmenes de muestras, reactivos de preservación, equipamiento usado, descripción del procedimiento, seguridad del trabajo).

- Contratación de laboratorios externos (lista de laboratorios, verificación de acreditación por parámetro requerido, definición de análisis requeridos, organización de la cadena de custodia, asegurar la adecuada cantidad y calidad de envases para el transporte).
- Documentación (etiquetas estandarizadas, formato y/o registro en el libro de ocurrencias, cadena de custodia).
- Procesamiento de la data (ruta para la evaluación interna, reportes de resultados a terceros).

6.1.2 Toma de muestra

La correcta toma de muestra es crucial para la representatividad de los resultados del análisis del lodo o biosólido y, por lo tanto, para concluir que se cumple con los criterios o parámetros establecidos para los biosólidos, lo que permite su aprovechamiento con riesgos controlados.

La representatividad de los resultados de una toma de muestra se aumenta analizando varias muestras puntuales en una ocasión o muestras compuestas preparadas de varias muestras puntuales. Sin embargo, el mejor conocimiento y fiabilidad sobre la calidad de lodos o biosólidos a largo plazo se logra realizando los monitoreos con las frecuencias definidas en el presente protocolo.

Los lodos o los biosólidos se monitorean, principalmente, en las condiciones en las cuales son entregados al usuario o comercializador, en el momento de la extracción de la PTAR. En caso los lodos o los biosólidos proceden de diferentes procesos de una PTAR como, por ejemplo, de los lechos de secados de los Tanques Imhoff (tratamiento primario) o de las lagunas de estabilización (tratamiento secundario) de la misma PTAR, donde no se puede asegurar una buena homogenización de los diferentes sustratos, se debe realizar lo siguiente:

1. Analizar el lodo o el biosólido de cada procedencia por separado.
2. Producir muestras compuestas con fracciones relacionadas a la producción de cada lodo o biosólido dentro la producción total de estos.

6.1.2.1 Tipos de muestras

6.1.2.1.1 Muestra puntual

La muestra puntual es la muestra de cierto tamaño que ha sido tomada en un punto y momento determinado. La muestra puntual representa únicamente la calidad del lodo o biosólido en el momento del muestreo y respecto a un punto determinado.

La extrapolación de los resultados a partir de una sola muestra puntual a todo el lodo o biosólido producido no es válida. Para asegurar la representatividad sobre la calidad del lodo o biosólido se deben tomar varias muestras puntuales y analizar cada muestra de manera separada o preparar y analizar muestras compuestas a partir de varias muestras puntuales.

6.1.2.1.2 Muestra compuesta

La muestra compuesta es una muestra que resulta de la mezcla y homogenización de varias muestras puntuales. En caso del monitoreo de un lodo o biosólido acumulado por varias semanas o incluso por años, antes de la entrega al usuario (por ejemplo, en



contenedores, reservorios, lechos de secado, fondo de lagunas de estabilización, almiarés, etc.), la muestra compuesta se constituye de muestras puntuales tomadas al azar respecto a la ubicación en el cuerpo total del lodo acumulado, siguiendo las especificaciones en adelante.

Considerando que se trata de la toma de muestra de lodos o biosólidos acumulados por varias semanas, el tiempo entre dos (2) tomas de muestras puntuales no es un factor relevante para la calidad de la muestra compuesta. Se pueden tomar las muestras en el mismo momento o una tras otra, según el avance del trabajo de la toma de muestra.

En caso del monitoreo de un lodo o biosólido de un proceso productivo continuo (deshidratación mecánica, purga de lodo o biosólido líquido a un camión con tanque) la muestra compuesta se compone de muestras puntuales tomadas en el mismo punto. El intervalo entre la toma de cada muestra puntual debe ser por lo menos de treinta (30) minutos. Sin embargo, una mayor representatividad se asegura con la toma de un mínimo de cinco (5) muestras puntuales en un período de dos (2) semanas.

Generalmente, se produce la muestra compuesta de muestras puntuales de la misma masa o volumen. Es importante asegurar una buena homogenización de las muestras puntuales que forman la muestra compuesta, porque finalmente en el laboratorio se utiliza solo una menor parte de la muestra, lo que aumenta el riesgo de analizar solo la parte de una muestra puntual.

De toda la muestra compuesta se obtiene el volumen de muestra necesario para el análisis principal y en caso de su necesidad el volumen para la muestra dirimente.

El procedimiento práctico de la preparación y subdivisión de la muestra compuesta depende de la condición física de la muestra (véase los ítems 6.1.2.1.2.1 hasta 6.1.2.1.2.3).

6.1.2.1.2.1 La preparación de muestras compuestas de lodos o biosólidos líquidos

Las muestras compuestas de sustratos líquidos se producen asegurando una homogenización completa entre muestras puntuales dentro de un envase / botella de cuello ancho de plástico o acero inoxidable con un volumen que permite una agitación intensiva con barras batidoras de vidrio, teflón o cucharas de acero inoxidable.

Es importante que se evite la separación de las fases de la muestra por sedimentación, especialmente en el momento de transvasado de una submuestra, por ejemplo, para el envío al laboratorio. Una alternativa es la toma de la submuestra del volumen bien agitado mediante una pipeta con boca suficientemente abierta para tomar todas fracciones de sólidos de la muestra.

6.1.2.1.2.2 La preparación de muestras compuestas de lodos o biosólidos pastosos

Dependiendo de la consistencia se puede homogenizar lodos o biosólidos pastosos con batidoras mecánicas manuales. Otra opción aceptable es la homogenización con la mano (con guantes adecuados) de varias submuestras antes de juntar y homogenizar todo el sustrato.

La reducción de la muestra compuesta al volumen necesario para el análisis se realiza por cuarteo. Se forma de toda la muestra homogenizada una torta regular encima de una superficie lisa y limpia, partiéndola en 4 pedazos uniformes; 2 partes



diametralmente opuestas se homogeniza nuevamente y cuartea de la manera descrita antes, hasta cuando el volumen de la muestra se haya reducido al volumen necesario para el análisis principal y de ser el caso para la muestra dirimente.

La subdivisión y toma de la muestra se debe realizar rápidamente para evitar que se descomponga la mezcla.

6.1.2.1.2.3 La preparación de muestras compuestas de lodos o biosólidos secos

Los sustratos o lodos o biosólidos secos tienen la tendencia a formar conglomerantes de diferentes tamaños y de alta dureza. Por lo tanto, para una buena homogenización puede ser necesario reducir sus tamaños mediante el uso de molinos, batidoras o almireces.

Las submuestras, preparadas de tal manera, se juntan y homogenizan posteriormente en un envase cerrado, agitándolas o rotándolas.

En caso de grandes cantidades de muestras de sustrato granular se asegura la homogenización, ordenando las muestras puntuales en forma de un anillo encima de una superficie plana, lisa y limpia. Posteriormente, con una pala se lleva una parte del anillo hacia su centro avanzando por todo el perímetro del anillo donde se acumula un cono de las muestras mezcladas. Luego, se aplasta el cono para obtener un disco el cual se divide en cuatro (4) partes, se apila nuevamente en un cono, el cual se aplasta y divide nuevamente para su apilamiento. Este procedimiento se repite por lo menos 3 (tres) veces.

La reducción de la muestra compuesta al volumen necesario para el análisis se realiza por cuarteo como descrito en el ítem 6.1.2.1.2.2.

6.1.2.1.3 Tipo de muestras para el análisis de los diferentes parámetros

En caso del análisis de los parámetros químicos se analiza en el laboratorio muestras compuestas preparadas de un mínimo de cinco (5) muestras puntuales, salvo la definición de cantidades diferentes en el presente protocolo.

En caso del análisis de los parámetros microbiológicos se analizan muestras puntuales, sin mezcla con otras muestras.

6.1.2.2 Punto de la toma de muestra

Un buen punto de toma de muestra es representativo del material a evaluar, debe ser fácil de alcanzar sin peligros para la persona que toma la muestra. En el caso ideal debe asegurar la toma de muestra del lodo o biosólido en un proceso de movimiento, por ejemplo descargas de máquinas procesadoras del lodo, fajas transportadoras, tubos y canal de transporte de lodo. Sin embargo, esto depende mucho del proceso de generación del lodo y su condición física.

6.1.2.2.1 Lodos o biosólidos líquidos

Toma de muestra de tubos

Las muestras puntuales deben obtenerse directamente de tuberías transportadoras del lodo o biosólido. El punto de la toma de muestra debe ser siempre el mismo. Los puntos que aseguran una buena homogenización de las muestras son tubos de presión directamente después de la bomba de lodos, y tubos de mayor velocidad de flujo (> 0,6 m/s). La instalación de la toma de muestra (tubos, válvulas) debe ser lavado con el mismo flujo de lodo o biosólido ante de la toma de muestra. El tiempo de lavado debe asegurar un volumen de lavado correspondiente a mayor que 3 veces del



volumen de la instalación misma. Además, hay que asegurar que sedimentos filamentosos atrapados en la instalación de muestra no favorezcan una filtración de la muestra tomada.

La toma de muestra de canales abiertos se realiza en zonas de buena mezcla mediante baldes o probetas adecuadas. Dependiendo del contenido de sólidos del lodo es posible toma la muestra por bombeo.

Toma de muestra de reservorios o cisternas

En caso de la toma de muestras puntuales de reservorios con agitación completa se puede sacar muestras de lodos o biosólidos líquidos en cualquier punto que asegure la representatividad y la toma de muestra en condiciones de seguridad.

En caso de toma de muestra de reservorios o camiones cisternas sin mezcla completa, se toma las muestras puntuales preferentemente durante la descarga del contenido en determinados intervalos. De esta manera se asegura la toma de muestras de los distintos estratos que se pueden formar en el lodo estancado. De las muestras puntuales se prepara una muestra compuesta, representativa del lodo total.

En caso de toma de muestra de reservorios sin agitación completa y acceso correspondiente se puede sacar también muestras puntuales de diferentes puntos distribuidos al azar sobre la superficie del reservorio. La cantidad (N) mínima de muestras puntuales a tomar en este caso se puede determinar según la Ecuación 1. de un volumen de lodo o biosólido conocido (V en m³) se puede determinar según la siguiente fórmula:

Ecuación 1: Determinación de la cantidad mínima de muestras puntuales de un volumen de lodo o biosólido conocido

$$N = V^{0.5}/2.$$

N = Cantidad mínima de muestras puntuales

V = Volumen del lodo o biosólido en m³

La cantidad mínima (n) debe ser en todo caso mayor o igual que 5. Opcionalmente se puede aplicar también el método descrito en el ítem 6.1.2.2.1.

Si no es posible asegurar la toma de todo el perfil del lodo o biosólido, se puede tomar en los puntos definidos alternativamente submuestras en diferentes profundidades, por ejemplo, a 25%, 50%, 75% de la profundidad total del sustrato acumulado.

6.1.2.2 Lodos o biosólidos pastosos y secos

Toma de muestra de descargas

En caso de la toma de muestra de lodos o biosólidos deshidratados mecánicamente se deben tomar muestras puntuales de la descarga del equipo de deshidratación, de las caídas de las fajas transportadoras a otras fajas o al punto almacenamiento temporal (contenedor o apilamiento), cada vez captando la muestra directamente de la caída de los lodos o biosólidos. Si es posible se capta toda la caída durante un tiempo definido en un recipiente adecuado o solo una parte.

Toma de muestras de fajas transportadoras

Como conglomerados de lodo tienen la tendencia de clasificarse según tamaño en una faja transportadora es importante tomar muestras de la sección transversal completa



de la faja. Esto se logra por ejemplo pasando una pala de forma transversal de un lado al otro lado de la faja operativa, desviando la cantidad necesaria del lodo o biosólido al recipiente de la muestra. En caso que la cinta no opere se toma el volumen necesario de la muestra directamente de la cinta.

Toma de muestra de contenedores

En caso de la toma de muestra de un contenedor estándar para el transporte vial, se debe conseguir al menos cuatro (4) muestras de diferentes puntos del contenedor. Cada muestra debe contener todo el perfil del lodo o biosólido acumulado o submuestra de diferentes profundidades a lo largo del perfil. Es importante no tomar solo muestras superficiales, porque la superficie generalmente está expuesta a impactos climáticos, lo que puede afectar la concentración de sólidos, sólidos volátiles y nutrientes. Por lo tanto, preferentemente se toma muestras intermitentes durante el proceso de descarga del lodo o biosólido.

Toma de muestra de lechos de secado

En caso de toma de muestras de lechos de secado se divide la superficie de un lecho en cuatro (4) cuadros. Del centro de cada cuadro se saca una muestra puntual (en total cuatro (4) muestras) de todo el perfil del lodo o biosólido acumulado, permitiendo la preparación de una muestra compuesta por lecho a partir de las cuatro (4) muestras puntuales. Es importante evitar que la muestra de lodo sea contaminada con arena de la capa filtrante del lecho de secado.

En caso de la operación de varios lechos de secado en paralelo se repite este procedimiento en cada lecho.

Si los lechos de secado reciben el lodo o biosólido de diferentes procesos, por ejemplo, de diferentes Tanques Imhoff de una PTAR, es responsabilidad del productor decidir:

1. Si las unidades que alimentan los lechos de secado tienen un funcionamiento y eficiencia similar (por lo cual se pudiera esperar calidades similares en cada lecho de secado) y/o
2. El lodo o biosólido de los lechos de secado será bien homogenizado antes de su entrega.

En caso que se puedan homogenizar las muestras tomadas en cada lecho, se debe preparar mínimo una (1) muestra compuesta de las muestras compuestas por lecho de secado para el análisis en el laboratorio. De no ser posible, se deben analizar las muestras compuestas por lecho de secado separado.

Toma de muestra de almiarés o apilamientos

En caso de la toma de muestra de almiarés o apilamientos de lodos o biosólidos secos, que requieren ser removidos frecuentemente como en el proceso de compostaje, se obtienen las muestras puntuales de la máquina o del equipo que descarga el lodo o biosólido al envase de entrega o a diferentes profundidades de la parte del almiar desde la cual se está tomando el sustrato para el envasado. Es importante no tomar solo muestras superficiales, porque la superficie generalmente está expuesta a impactos climáticos, que pueden afectar la concentración de sólidos y nutrientes.



La cantidad mínima de muestras a tomar se puede determinar según la Ecuación 1. Opcionalmente se puede aplicar también el método descrito en el ítem 6.1.2.2.1.

En caso de toma de muestra desde arriba de almiarés o apilamientos hay que tomar precauciones especiales respecto a la seguridad en el trabajo.

6.1.2.2.1 Muestras de cuerpos de lodo o biosólido acumulado de grandes extensiones

En caso de toma de muestras puntuales de cuerpos de lodo o biosólido acumulado de grandes extensiones, por ejemplo, en patios de acopio y/o en el fondo de lagunas de estabilización, se deberá determinar mediante consideraciones estadísticas:

- la ubicación de los puntos de la toma de muestra y
- la cantidad (N) mínima de muestras puntuales

La cantidad (N) de muestras puntuales a tomar por superficie del cuerpo de lodo o biosólido corresponde a lo indicado en la Tabla 1 y depende del caudal de ingreso a la PTAR generadora del lodo o biosólido.

Determinación de la ubicación de los puntos de muestra

Para determinar la ubicación de los puntos de toma de muestras puntuales se sigue los siguientes pasos:

- 1) Preparar un esquema del cuerpo del lodo o biosólido según escala en una hoja A4.
- 2) Poner una malla de 100 cuadrados de la misma superficie encima del esquema. Asignar a cada cuadrado un número, contando de 0 a 99 de un cuadrado al siguiente. Este procedimiento es comparable con el procedimiento para la definición de los puntos de medición cuando se realiza la batimetría de lodos en una laguna operativa.
- 3) Determinar en una tabla de números aleatorios la cantidad (N) de números de dos (2) dígitos. Se empieza con una línea de la tabla de números aleatorios elegida al azar. La Ilustración 1 demuestra el ejemplo de una tabla de números aleatorios. Entre los números de 2 dígitos determinados no se permite repeticiones.
- 4) Los (N) números aleatorios determinados corresponden con los números de los cuadrados de la malla puesta encima del esquema en el segundo paso.

Cabe mencionar que en caso de irregularidad del cuerpo de lodos o biosólidos algunos cuadrados de la malla quedan fuera de cuerpo de lodo o biosólido. En este caso hay que aumentar la cantidad de los números determinados de la tabla de número aleatorios hasta cuando la cantidad de los cuadrados dentro del cuerpo de biosólidos determinados corresponde con la cantidad (N) mínima de muestras a tomar "N".

Como se indica en el ítem 6.1.2.1.3, para el análisis de parámetros microbiológicos se analizan muestras puntuales. Por lo tanto, la Tabla 1 indica también la cantidad mínima de muestras puntuales del lodo o biosólido que se deben analizar en caso de necesidad, dependiendo del tamaño de la PTAR.



Tabla 1: Cantidad de muestras requeridas (Brobst, 2017)

Tamaño de la PTAR en caudal en L/s	Cantidad mínima de muestras puntuales tomadas "N" ^{1),3)} (Para preparar muestra compuesta)	Número de muestras compuestas preparadas a partir de (N) a analizar ^{1),2)}	Número mínimo de muestras puntuales para el análisis de parámetros microbiológicos ¹⁾
< 10	15	1	2
≥ 10 < 100	27	1	3
≥ 100 < 300	31	2	4
≥ 300	36	3	5

Nota:

- 1) En caso de lagunas el número de muestras se refiere a cada laguna.
- 2) Corresponde con la frecuencia anual de monitoreo para PTAR con producción anual de sustrato, según tabla 4 del Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales para biosólidos de Clase A
- 3) De forma opcional se puede determinar la cantidad mínima (N) de muestras puntuales por laguna según la Ecuación 1, considerando el volumen de lodo acumulado en la laguna.



39 65 76 45 45	19 90 69 64 61	20 26 36 31 62	38 24 97 14 97	95 06 70 99 00
73 71 23 70 90	65 97 60 12 11	31 56 34 19 19	47 83 75 51 33	30 62 38 20 46
72 20 47 33 84	51 67 47 97 19	98 40 07 17 66	23 05 09 51 80	59 78 11 52 49
75 17 25 69 17	17 95 21 78 58	24 33 45 77 48	69 81 84 09 29	93 22 70 45 80
37 48 79 88 74	63 52 06 34 30	01 31 60 10 27	35 07 79 71 53	28 99 52 01 41
02 89 08 16 94	85 53 83 29 95	56 27 09 24 43	21 78 55 09 82	72 61 88 73 61
87 18 15 70 07	37 79 49 12 38	48 13 93 53 96	41 92 45 71 51	09 18 25 38 94
98 83 71 70 15	89 09 39 59 24	00 06 41 41 20	14 36 59 25 47	54 45 17 24 89
10 08 58 07 04	76 62 16 48 68	58 76 17 14 86	59 53 11 52 21	66 04 18 72 07
47 90 56 37 31	71 82 13 50 41	27 55 10 24 92	28 04 67 53 44	95 23 00 84 47
93 05 31 03 07	34 18 04 52 35	74 13 39 35 22	68 95 23 92 35	36 63 70 35 33
21 89 11 47 99	11 20 99 45 18	76 51 94 84 86	13 79 93 37 55	98 16 04 41 67
95 18 94 06 97	27 37 83 28 71	79 57 95 13 91	09 61 87 25 21	56 20 11 32 44
97 08 31 55 73	10 65 81 92 59	77 31 61 95 46	20 44 90 32 64	26 99 76 75 63
69 26 86 86 13	59 71 74 17 32	48 38 75 93 29	73 37 32 04 05	60 82 29 20 25
41 47 10 25 03	87 63 93 95 17	81 83 83 04 49	77 45 85 50 51	79 88 01 97 30
91 94 14 63 62	08 61 74 51 69	92 79 43 89 79	29 18 94 51 23	14 85 11 47 23
80 06 54 18 47	08 52 85 08 40	48 40 35 94 22	72 65 71 08 86	50 03 42 99 36
67 72 77 63 99	39 85 84 46 06	64 71 06 21 66	89 37 20 70 01	61 65 70 22 12
59 40 24 13 75	42 29 72 23 19	06 94 76 10 08	81 30 15 39 14	81 83 17 16 33
63 62 06 34 41	79 53 36 02 95	54 61 09 43 62	20 21 14 68 86	94 95 48 46 45
78 47 23 53 90	79 93 96 38 63	34 85 52 05 09	85 43 01 72 73	14 93 87 81 40
87 68 62 15 43	97 48 72 66 48	53 16 71 13 81	59 97 50 99 52	24 52 20 42 31
47 60 92 10 77	26 97 05 73 51	88 46 38 03 58	72 68 49 29 31	75 70 16 08 24
36 88 87 59 41	06 87 37 78 48	65 88 69 58 39	88 02 84 27 83	85 81 56 39 38
22 17 68 65 84	87 02 22 57 51	68 69 80 95 44	11 29 01 95 80	49 34 35 86 47
19 36 27 59 46	39 77 32 77 09	79 57 92 36 59	89 74 39 82 15	08 58 94 34 74
16 77 23 02 77	28 06 24 25 93	22 45 44 84 11	87 80 61 65 31	09 71 91 74 25
78 43 76 71 61	97 67 63 99 61	80 45 67 93 82	59 73 19 85 23	53 33 65 97 21
03 28 28 26 08	69 30 16 09 05	53 58 47 70 93	65 56 45 65 79	45 56 20 19 47
04 31 17 21 56	33 73 99 19 87	28 72 39 27 67	53 77 57 68 93	60 61 97 22 61
61 06 98 03 91	87 14 77 43 96	43 00 65 98 50	45 60 33 01 07	98 99 46 50 47
23 68 35 26 00	99 53 93 61 28	52 70 05 48 34	55 65 05 61 88	90 92 10 70 80
15 39 25 70 99	93 86 52 77 85	15 33 59 05 28	22 87 26 07 47	86 96 98 29 06
58 71 96 30 24	18 46 23 34 27	85 13 99 24 44	49 18 09 79 49	74 16 32 23 02
93 22 53 64 39	07 10 63 76 35	87 03 64 79 88	08 13 13 85 51	55 34 57 72 69
78 76 58 54 74	92 38 70 96 92	52 06 79 79 45	82 63 18 27 44	69 66 92 19 09
61 81 31 96 82	00 57 25 60 59	46 72 60 18 77	55 66 12 62 11	08 99 55 64 57
42 88 07 10 05	24 98 65 63 21	47 21 61 88 32	27 80 30 21 60	10 92 35 36 12
77 94 30 05 39	28 10 99 00 27	12 73 73 99 12	49 99 57 94 82	96 88 57 17 91

Ilustración 1: Ejemplo de una tabla de números aleatorios (Brobst, 2017)

El siguiente ejemplo ilustra la determinación de los 27 puntos de monitoreo del lodo o biosólido de una laguna de una PTAR de un caudal de $\geq 10 < 100$ L/s.

- La Ilustración 2 indica la determinación de los 27 números de dos (2) dígitos en el rango de 00 hasta 99 de la tabla de números aleatorios según Ilustración 1, empezando con la línea 3, siguiendo con las líneas 4 y 5 de la tabla.

72 20 47 33 84	51 67 47 97 19	98 40 07 17 66	23 05 09 51 80	59 78 11 52 49
75 17 25 69 17	17 95 21 78 58	24 33 45 77 48	69 81 84 09 29	93 22 70 45 80
37 48 79 88 74	63 52 06 34 30	01 31 60 10 27	35 07 79 71 53	28 99 52 01 41

Ilustración 2: Las líneas 3 hasta 5 de la tabla de número aleatorios según Ilustración 1 con determinación de los 27 números de dos (2) dígitos que representan los números de las cuadras de donde se tomará la muestra de puntual del cuerpo del sustrato.



- La Ilustración 3 muestra el esquema de la laguna de estabilización con la malla de 0 hasta 99 cuadrados uniformes encima de su superficie (según el paso 1 del procedimiento definido anteriormente). Los cuadrados con líneas cruzadas representan los espacios determinados para la toma de muestra en el procedimiento indicado en la Ilustración 2. Las muestras se sacan del centro de cada cuadrado.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
70	71	72	73	74	75	76	77	78	79
80	81	82	83	84	85	86	87	88	89
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99

Ilustración 3: Esquema de la laguna con malla de 100 cuadrados uniformes sobre toda la superficie de lodo o biosólido acumulado (cuadro con línea ancha).

El incremento de la frecuencia de monitoreo a la que hace referencia el párrafo 17.5 del artículo 17 del Reglamento para el Reaprovechamiento de Lodos generados en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales no se considera para la toma de muestras establecidas en el presente numeral.

En caso que la calidad del lodo acumulado no corresponda a las exigencias de un biosólido, el reaprovechamiento no será posible.

6.1.2.3 Consideraciones para la muestra

Para la toma de muestra se debe considerar lo siguiente:

- En caso de no usar para cada toma de muestra un equipo nuevo, debe lavarse intensamente² el equipo usado, para prevenir la contaminación de las siguientes muestras.
- En caso del monitoreo de parámetros microbiológicos es importante la desinfección del equipo después de cada toma de muestra.
- El procedimiento de la toma de muestra debe ser adecuadamente documentado.

En caso de toma de muestra de tubos transportadores de lodo, se debe purgar los restos de muestras anteriores del tubo de toma y lodo o biosólido estancado en la



² El lavado intenso involucra las siguientes actividades:

1. Remoción de sólidos pegados en el equipo.
2. Lavado del equipo en un balde con detergente y escobilla.
3. Enjuagar el equipo con agua y después con agua destilada.
4. En caso de medición de parámetros microbiológicos esterilizar el equipo.

línea de transporte. El equipo de toma de muestra se enjuaga tres (3) veces cada vez, antes que se tome una muestra, para reducir la contaminación cruzada.

6.1.2.3.1 Volumen de la muestra

El análisis de los parámetros establecidos en el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, requiere un volumen de aproximadamente 2 kg (2 litros aproximadamente) para el total de los parámetros químicos y 0,5 kg (0,5 litros aproximadamente) para los parámetros microbiológicos.

El volumen total de una muestra compuesta debe ser suficiente para realizar hasta un mínimo de dos (2) análisis en paralelo, para el análisis principal y para la posible muestra dirimente.

El volumen o masa necesaria para la muestra depende también de la concentración de los sólidos. El análisis de los parámetros químicos requiere siempre de una masa mínima de sólidos, por lo cual lodos o biosólidos muy líquidos requieren más volumen, para tener la misma cantidad de sólidos que un lodo o biosólido ya deshidratado.

Por lo tanto, en caso de contratación de laboratorios externos se debe consultar antes sobre los volúmenes o masas exactas requeridas para las muestras, generalmente los laboratorios suministran los envases adecuados y preparados para envasar la cantidad necesaria.

6.1.2.3.2 Equipo para la toma de muestra

El equipo correcto para la toma de muestras del lodo o biosólido depende de su consistencia y del punto de monitoreo. La Tabla 2 indica los equipos de toma de muestra, para el caso que no sea posible obtenerla directamente de una tubería de transporte o la descarga del lodo o biosólido no sea accesible para la toma de muestra.

En caso de muestras puntuales líquidas de un reservorio, tanque o laguna, ésta se toma con un tubo de metal, plástico o vidrio de 1 – 2 pulgadas, con una válvula check en el fondo. El tubo se desliza lentamente y verticalmente por el lodo o biosólido acumulado, entonces la válvula check se abre y el lodo o biosólido ingresa al tubo según el perfil del lodo o biosólido analizado. En el momento de retiro del tubo la válvula check cierra y el lodo o biosólido queda atrapado.

El extractor de muestras de lodos o biosólidos secos es similar a un extractor de muestras de suelo y contiene 2 tubos concéntricos. El tubo exterior tiene una punta con la cual permite la penetración de la muestra. El extractor se cierra rotando el tubo interior.

El barreno de barrilete tubular para lodos o biosólidos semisecos o pastosos es un tubo cortado y abierto a lo largo del eje longitudinal. Este equipo se utiliza también para el monitoreo de suelos. La punta de un lado es puntiaguda, lo que permite la penetración del lodo o biosólido. La muestra queda atrapada en el espacio hueco del tubo cortado una vez que se lo retira del lodo o biosólido.

El barreno manual de tipo espiral permite sacar muestras de lodos o biosólidos compactos, este equipo se utiliza también para el monitoreo de suelos.

En el caso de lodos o biosólidos granulares, una pala de mano permite obtener la muestra.



Tabla 2: Equipos de toma de muestra según consistencia del lodo o biosólido (Brobst, 2017) (Véase también el anexo)

Equipo	Tamaño de muestra	Consistencia del sustrato	Tamaño del equipo
Equipo de toma de lodos o biosólidos líquidos	Corte transversal de toda la columna de lodo o biosólido o solo de una cierta altura de la columna (según equipo)	Sustratos de fluidez libre	1,5 – 15 m
Extractor de muestras	Corte transversal de la columna de lodo o biosólido	Sustratos granulares o en polvo	0.5 – 1.0 m
Barreno de barrilete tubular	Corte transversal de la columna de lodo o biosólido	Sustratos pegajosos	hasta 1.0 m
Barreno manual de tipo espiral	Corte transversal de la columna de lodo biosólido, muestra puntual	Biosólido compacto	variable
Pala manual	Muestra puntual	Sustratos granular, polvorizado o suelto	variable

El material del equipo para tomar y procesar las muestras no debe ser fuente de contaminación para la muestra, por lo cual se debe utilizar dispositivos de vidrio, teflón, acero inoxidable o plástico.

6.1.2.3.3 Preparación de materiales y equipos

El siguiente listado considera los materiales, equipos e implementos de seguridad indispensables para llevar a cabo un monitoreo de forma efectiva. En ese sentido, es importante preparar con anticipación los materiales de trabajo, formatos (registro de datos de campo, etiquetas para las muestras de agua residual y cadena de custodia). Se debe contar, sin carácter limitante, con lo siguiente:

6.1.2.3.3.1 Materiales

- Fichas de registro de campo
- Fichas de cadena de custodia
- Papel secante
- Cinta adhesiva
- Plumón indeleble
- Frascos debidamente preparados y etiquetados
- Cajas térmicas (pequeña y grande)
- Hielo u otro refrigerante
- Bolsas de poliburbujas u otro material de embalaje adecuado
- Piseta
- Agua destilada y/o desionizada
- Reloj
- Cinta métrica
- Papel aluminio
- Plano con los puntos de monitoreo predefinidos (en caso de monitoreo de mayores cuerpos de lodo)

6.1.2.3.3.2 Equipos

- GPS para la identificación de los puntos de monitoreo



- Cámara fotográfica
- Equipamiento para la mezcla y homogenización según condición esperada del sustrato (botellas, batidora, pala, molino, almirez, etc.)
- Equipo de toma de muestra de lodo, según consistencia del biosólidos muestreado.

6.1.2.3.3 Implementos de seguridad

- Botines de seguridad
- Gafas de seguridad
- Guantes de jebe antideslizantes con cubierta de antebrazo
- Guantes de látex descartables
- Casco
- Arnés para profundidades mayores a 1,50 m
- Escalera móvil en caso de toma de muestra de contenedores
- Mascarilla protectora descartable
- Mascarillas con filtros antigases, cuando corresponda
- Mameluco (en caso de muestreo de biosólido en forma de polvo)

6.1.2.3.4 Seguridad de trabajo

Se establecen las siguientes consideraciones para prevenir daños personales, daños de materiales y equipos durante la ejecución del monitoreo de biosólidos:

1. Se debe preferir puntos de toma de muestra seguros, de fácil acceso.
2. Si la muestra se extrae por encima de un buzón, reactor, tanque, laguna u otro recipiente se deben guardar las medidas de seguridad para trabajos en alturas y/o encima de cuerpos de agua (uso de arnés, chalecos flotadores, máscara antigases, etc.)
3. Si el punto de muestreo está confinado es necesario ventilarlo antes de realizar la toma de muestra en un período mínimo de una hora. Es necesario, además, usar un detector de gas y/o usar un equipo de respiración autónoma.
4. Debe utilizarse guantes, zapatos antideslizantes y cascos.
5. Después del monitoreo es necesario cambiar los materiales, equipos e implementos de seguridad utilizados durante el mismo y que estuvieron en contacto con el lodo o biosólido, para prevenir contaminación de terceros.
6. El personal debe demostrar contar con vacunas vigentes a la fecha para Tetanus, Difteria, Polio, Hepatitis A, según correspondan.

En general se debe tener conocimiento de lo siguiente:

1. El peligro de explosión causado por la mezcla de gases explosivos en sistemas de alcantarillado o tanques de lodo insuficientemente estabilizados.
2. El riesgo de envenenamiento por gases tóxicos, por ejemplo, ácido sulfhídrico en lugares poco ventilados y aireados.
3. El riesgo de sofocación por la falta de oxígeno en lugares poco ventilados y aireados.
4. El riesgo de enfermedades causadas por organismos patógenos en biosólidos.
5. El riesgo de heridas físicas debido a caídas y deslizamiento.
6. El riesgo de ahogamiento.
7. El riesgo de impacto por objetos que puedan caer.

6.1.3 Preservación - Conservación y transporte de muestra

Las muestras se transportan en envases de boca ancha de polietileno o teflón, materiales que no reaccionan con las muestras. El uso de envases de vidrio es



posible, sin embargo, requiere precauciones de seguridad especiales, debido a que se pueden formar gases y mayores presiones durante el transporte de la muestra, lo cual genera el riesgo de destrucción del envase implicando riesgos para la salud del personal y la pérdida de la muestra.

Los envases tienen que ser libres de fisuras y resistentes contra fuerzas mecánicas típicas durante el envío de cargas, utilizando en caso de botellas de vidrio, bolsas de poliburbujas, de embalaje o de cualquier otro material. Las tapas de los envases deben asegurar el sello de la muestra contra el aire ambiental.

Es importante, que todos los envases sean lavados y esterilizados antes de llenarlos con la muestra. En caso del análisis por laboratorios acreditados, ellos normalmente entregan los envases adecuados, lavados y de ser el caso esterilizados, por lo tanto, preparados para el uso directo.

Durante todo el proceso de preparación de muestra, el personal debe cumplir con las exigencias mínimas para la prevención de una contaminación cruzada de las muestras.

Para conservar las muestras hay que guardarlas en ambientes oscuros con temperaturas menores a 4 °C. Estas temperaturas previenen procesos de digestión que pueden alterar la calidad de la muestra y conservan las condiciones biológicas³. Por tal razón, es importante realizar el enfriamiento en un corto período. Para acelerar el proceso de enfriamiento es recomendable poner las botellas con la muestra en un baño con cubos de hielo y agua o almohadillas refrigerantes. Una vez enfriada, la muestra debe colocarse en una caja de almacenamiento térmica con refrigerante (ice pack), para cumplir con la recomendación de temperatura indicada. En caso de utilizar hielo, se debe colocar éste en bolsas herméticas para evitar fugas de la caja donde se transportan las muestras.

La congelación es una opción para la preservación de muestras de lodos o biosólidos, salvo para aquellas que servirán para el análisis de parámetros microbiológicos establecidos en el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. La conservación química de las muestras no es necesaria para el análisis de los mencionados parámetros.

A pesar de las temperaturas bajas, se debe tomar precauciones durante el transporte y la apertura de los envases ante la posible acumulación de gases dentro del envase.

Se permite diferentes tiempos de almacenamiento de la muestra, según el parámetro analizado, para realizar muestras dirimentes posteriormente. En tanto los parámetros microbiológicos deben ser analizados dentro de 24 horas a partir de la toma de muestra, para el análisis de metales pesados se puede guardar la muestra hasta seis (6) meses, véase la Tabla 3.

La muestra y su envase deben estar cerrados y sellados adecuadamente para su transporte. El formato de cadena de custodia debe acompañar a las muestras desde su obtención o toma, transporte hasta su ingreso al laboratorio.



³ Los parámetros microbiológicos deben ser analizados dentro de las 24 horas después de la toma de muestra.

Tabla 3: Condición de preservación y tiempos de almacenamiento de muestras de biosólidos (US EPA, POW Sludge Sampling And Analysis Guidance Document , 1989), (State of Ohio Environmental Protection Agency, 2009) (New Jersey Department of Environmental Protection, 2012)

Parámetros	Material del envase	Tiempo máximo de almacenamiento
Pérdida por calcinación (sólidos totales, sólidos volátiles)	Plástico, Vidrio	7 días con Temperaturas $\leq 4^{\circ}\text{C}$
Arsénico, Cadmio, Cobre, Plomo, Níquel, Zinc, Cromo	Plástico, Vidrio	6 meses con Temperaturas $\leq 4^{\circ}\text{C}$
Mercurio	Plástico, Vidrio	28 días con Temperaturas $\leq 4^{\circ}\text{C}$
Nitrógeno total		
Nitrógeno total de Kjeldahl	Plástico, Vidrio	28 días con Temperaturas $\leq 4^{\circ}\text{C}$
Nitrato	Plástico, Vidrio	28 días con Temperaturas $\leq 4^{\circ}\text{C}$
Escherichia coli	Plástico, Vidrio	24 horas con Temperaturas $\leq 4^{\circ}\text{C}$
Salmonella Sp.	Plástico, Vidrio	24 horas con Temperaturas $\leq 4^{\circ}\text{C}$
Huevos de helmintos viables	Plástico, Vidrio	1 mes con Temperaturas $\leq 4^{\circ}\text{C}$

6.1.4 Frecuencia de monitoreo

La obligación de monitoreo y de los parámetros monitoreados depende principalmente de la clase (A o B) que se pretende asignar o al biosólido producido, las exigencias normativas, los resultados de los monitoreos anteriores, el estado operativo y la tecnología del tratamiento de agua y lodo aplicada en la PTAR productora.

En caso de producción y calificación del lodo como biosólido, la Tabla 4 del Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales indica las frecuencias mínimas de monitoreo del biosólido dependiendo de la cantidad entregada por año y la Clase (A o B) y los resultados de los monitoreos anteriores.

En caso de producción y entrega del biosólido en períodos intermedios de varios años, por ejemplo, en caso del biosólido de lagunas de estabilización, la frecuencia de monitoreo es de menor importancia. En su caso importa más la cantidad de muestras puntuales a tomar para su análisis directo o el procesamiento de muestras compuestas, según las indicaciones del ítem 6.1.2.2.2.1.

6.1.5 Documentación

6.1.5.1 Etiquetado de la muestra

Los frascos deben ser etiquetados, con letra clara y legible. De preferencia debe usarse plumón de tinta indeleble y cubrir la etiqueta con cinta adhesiva transparente conteniendo la siguiente información:

- Número de identificación de la muestra.
- Nombre de la empresa y unidad del proceso donde se toma la muestra.
- Fecha y hora de la toma de muestra.
- Ubicación del punto de la toma de muestra (georeferenciada).



- Tipo de muestra (compuesta, puntual).
- Nombre de la persona que toma la muestra.
- Tipo y procedimiento de medidas de conservación.
- Parámetros analizados de la muestra.
- Comentarios.

Los envases pueden estar previamente etiquetados o se podrán utilizar adhesivos específicos para registrar o rotular la información indicada.

Un ejemplo para una etiqueta se encuentra en el ítem 8.1. del presente protocolo. Laboratorios acreditados ante INACAL pueden utilizar su propio formato de etiqueta.

6.1.5.2 Protocolo de transporte – Cadena de custodia

La Cadena de Custodia es el procedimiento documentado de la toma de muestra, su transporte y entrega al laboratorio. El formato de cadena de custodia debe indicar al menos:

- Número de muestra.
- Parámetros a evaluar.
- Tipo de frascos que contienen la muestra.
- Condiciones o características de la muestra de lodo o biosólido: líquido, pastoso o seco.
- Volumen de la muestra.
- Condiciones de conservación.
- Nombres y firmas de cada persona involucrada entre la toma de muestra hasta la recepción en el laboratorio. (Con hora y fecha de entrega en cada paso).
- Observaciones

Un ejemplo de formato se encuentra en el ítem 8.2. del presente protocolo. Laboratorios acreditados ante INACAL pueden utilizar su propio formato de etiqueta.

6.1.5.3 Libro de ocurrencias – Protocolo de la toma de muestra

El generador del lodo o biosólido debe contar con un libro de ocurrencia y monitoreo en el cual se anota información técnica del muestreo como condiciones del punto o puntos de muestreo y descripción del proceso, así como otros datos referenciales. Es recomendable trabajar con un formato propio.

La información del libro de ocurrencias y monitoreo sirve para aclarar incertidumbres en la interpretación de los resultados, pero también para analizar y eventualmente optimizar las actividades para el siguiente monitoreo. La información relevante para el registro, sin perjuicio de la información que el generador considere oportuna, es:



- Fecha, hora y ubicación de los puntos de la toma de muestra.
- Tipo, cantidad y volumen de las muestras tomadas.
- Personas participantes
- Condiciones climáticas.
- Equipo de toma de muestra.
- Descripción del proceso de la toma.
- Número de identificación de las muestras.
- Método y empresa responsable del transporte de las muestras.

6.1.6 Normas y buenas prácticas nacionales e internacionales

Los métodos de ensayo incluyen indicaciones sobre la toma de muestra para los lodos o biosólidos. Sin embargo, estos métodos deben estar acreditados por el INACAL o cualquier Organismo de acreditación firmante de acuerdos de Reconocimiento Multilateral (MLA) de la cooperación Internacional de Acreditación de laboratorios (ILAC).

No obstante, el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales permite en los primeros tres (3) años a partir de la publicación del protocolo de monitoreo, el análisis de los parámetros de los biosólidos previstos en el Reglamento, mediante laboratorios con aplicación de métodos no acreditados por INACAL.

Por tal razón, debido que para la calidad de una muestra es muy relevante la determinación del punto de la toma de muestra y siendo esta responsabilidad del productor y/o comercializador de biosólidos, el presente protocolo proporciona orientaciones respecto a normas internacionales reconocidas, relacionadas a la toma de muestra de lodos y biosólidos. Sin carácter limitante, algunas de estas son:

Normas del Deutsches Institut fuer Normung y de la International Standard Organisation - DIN ISO

- DIN EN ISO 5667-13:2011-08:
- DIN 38414-11:1987-08

United States Environmental Protection Agency – US EPA (nacional, federal)

- US EPA 833-B-89-100:
- US EPA: Biosolids Reference Sheet (Brobst, 2017)
- EPA New Jersey: New Jersey Sludge Sampling and Analytical Guidance Document
- EPA, Ohio: Manual of Ohio EPA Sludge Program Field Sampling Methods and Quality Assurance Practices

6.2 Análisis de muestras en laboratorios

6.2.1 Parámetros relevantes

El Reglamento para el Reaprovechamiento de los lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales establece en sus artículos 13 y 14, los parámetros relevantes para el análisis de biosólidos. A continuación, se indican los parámetros químicos y microbiológicos, así como las unidades para su análisis:

Los parámetros químicos relevantes para el análisis de biosólidos según el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales son:

- Pérdida por calcinación (determina el grado de estabilización) en % o $\frac{\text{kg}_{\text{Sólidos totales volátiles}}}{\text{kg}_{\text{Sólidos totales}}}$,
- Nitrógeno total en $\frac{\text{g}_{\text{Nitrógeno}}}{\text{kg}_{\text{Sólidos totales}}}$,
- Metales pesados (arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, níquel y zinc) en $\frac{\text{mg}_{\text{Metal}}}{\text{kg}_{\text{Sólidos totales}}}$,

Los parámetros microbiológicos relevantes para el análisis de biosólidos según el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales son:



- Salmonellas sp. en NMP / 10 g Sólidos totales,
- Escherichia coli en NMP / 1g Sólidos totales
- Huevos viables de Helmintos en 1 / 4 g Sólido totales

Los laboratorios deben relacionar la masa o cantidad de la contaminación detectada a la masa de los sólidos totales de la muestra, por lo cual, parte del análisis de la muestra es siempre determinar también la concentración de los sólidos.

6.2.2 Número de análisis

Se debe realizar por cada parámetro al menos un análisis. En caso se realice más de un análisis, el resultado válido en caso de parámetros químicos será el promedio aritmético de ambos análisis y en caso de parámetros microbiológicos el promedio geométrico.

6.2.2.1 Muestra dirimente

La muestra dirimente es la muestra que se toma en la misma oportunidad que la muestra original, sea esta puntual o compuesta, la cual es analizada bajo los mismos criterios y es comparable en caso existan eventuales reclamos sobre la validez de los resultados de la muestra original. En este caso, se aplicará la muestra dirimente según lo establecido por el laboratorio de acuerdo al literal k, del numeral 4.6.1 del Reglamento para la Acreditación de Organismos de Evaluación de la Conformidad (OEC).

La muestra dirimente se aplica solo a los parámetros químicos y a la presencia de huevos de helmintos viables, aplicando las medidas de conservación de muestras adecuadas en el laboratorio.

La muestra dirimente se contrata separadamente, por lo cual los laboratorios tienen la obligación de informar a los productores y/o comercializadores de los lodos o biosólidos, previamente a su contratación sobre los alcances y costos de ella.

6.2.3 Términos de referencia para el análisis en los primeros 3 años

Los métodos de ensayo para el producto de lodos o biosólidos deberán estar acreditados por el INACAL o cualquier Organismo de acreditación firmante de acuerdos de Reconocimiento Multilateral (MLA) de la Cooperación Internacional de Acreditación de Laboratorios (ILAC).

Si bien el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales permite en un período de tres (3) años de aprobado el protocolo de monitoreo, el análisis de parámetros a través de laboratorios con aplicación de métodos no acreditados por INACAL, debido a la importancia de un buen monitoreo de los lodos o biosólidos para la salud pública y el ambiente, también los laboratorios sin metodología acreditada deben aplicar metodologías según las buenas prácticas y normas internacionales indicadas en la TABLA 4.

A continuación se presentan algunos términos de referencia que contienen normas internacionales de referencia para el monitoreo del lodo o biosólido.

6.2.3.1 Parámetros químicos

6.2.3.1.1 Pérdida por calcinación

Para determinar la pérdida por calcinación se debe medir primero los sólidos totales, después se queman los sólidos, quedando la ceniza. La diferencia de masa entre los sólidos totales y la ceniza corresponde a la pérdida por calcinación o también a los



sólidos volátiles. La relación de la pérdida de calcinación y la masa de los sólidos totales en porcentaje (%) corresponde al indicador del grado de la estabilización del sustrato.

La información sobre los sólidos totales de la muestra es también base para el análisis de la presencia de metales pesados, nitrógeno y parámetros microbiológicos en el sustrato.

Normas y recomendaciones internacionales para la medición de sólidos totales y sólidos totales volátiles se encuentran en la TABLA 4 del presente Protocolo de Monitoreo de Biosólidos.

6.2.3.1.2 Metales pesados

Hay diferentes tecnologías para la detección de metales pesados.

1. Una tecnología normalizada internacionalmente para el análisis de lodos o biosólidos es la espectroscopia de emisión por plasma de acoplamiento inductivo (ISP), la cual sirve para detectar una gran parte de los metales pesados, menos el mercurio.

Al inicio de la medición hay que preparar una dilución de la muestra del lodo o biosólido que contiene todos los metales, esto se puede hacer por la extracción mediante agua regia. Dicho líquido alimenta el equipo analizador en el cual será transformado en un aerosol mediante el gas Argón para su ionización en un plasma generado por un campo magnético oscilante. Las temperaturas hasta 8000 K dentro del plasma aseguran que todos átomos serán ionizados.

Dependiendo del tipo de medición por ISP:

- a. Los iones serán acelerados por un campo eléctrico hacia un espectrómetro de masas, el cual detecta la presencia y concentración (masa) de presencia del elemento (p. e. metal pesado). En este caso se habla del ISP-MS.
- b. Sensores ópticos miden las radiaciones emitidas de los iones, las cuales tienen longitudes de ondas específicas por cada elemento y la intensidad de la radiación. De esta manera se identifica el elemento (p. e. metal pesado) presente y su concentración. En este caso se habla del ISP-OES

La tecnología tiene su debilidad en caso de dominancia de presencia de un elemento particular. Sin embargo, normalmente este punto no es relevante en los lodos o biosólidos dentro del marco del presente protocolo.

2. Otra tecnología normalizada internacionalmente para el análisis de presencia y concentraciones de metales pesados en lodos o biosólidos es la espectrometría de absorción atómica (AA). Se atomiza y activa los elementos (metales pesados) de una dilución de la muestra del lodo o biosólido, por ejemplo, en temperaturas elevadas, y manda luz de cierta longitud de onda por la nube de átomos. Dependiendo del tipo del átomo y la concentración de su presencia en la nube parte de la luz será adsorbida. La diferencia entre la luz emitida y adsorbida identifica el elemento y la concentración de su presencia en la muestra.

Dependiendo del tipo de atomización de la muestra del lodo o biosólido se diferencia los sistemas de análisis de la espectrometría de absorción atómica de mayor aplicación entre:



- a. El sistema de calentamiento en tubos de grafito (AA-ET) hasta temperaturas de 2500 °C,
- b. El sistema de reducción primero los elementos (metales pesados) presentes a sus hidruros gaseosos, tras reacción química y calentarlos después hasta temperaturas cerca de 1000 °C. En este caso se habla de la (AA-HG o AA Hidruro). Esta tecnología detecta solamente aquellos elementos que reaccionan a hidruros gaseosos.

En caso de la detección de mercurio se trabaja con otros químicos para su reducción y además con menores temperaturas. Por esto se habla en su caso con detección en vapor frío (AA-CV).

Normas y recomendaciones internacionales para la medición de metales pesados se encuentran en la TABLA 4 del presente Protocolo de Monitoreo de Biosólidos.

6.2.3.1.3 Nitrógeno total

El nitrógeno total se mide quemando la muestra en condiciones especiales, las cuales aseguran que todas las formas químicas de nitrógeno se conviertan en nitrógeno elemental, presente en el gas de incineración. El nitrógeno del gas se separa para la determinación de su concentración.

La concentración de nitrógeno orgánico y nitrógeno amoniacal se determina mediante el método de Kjeldahl, donde se separa primero ambas fracciones del nitrógeno de la muestra del lodo o biosólido por digestión en condiciones ácidas y extracción en condiciones básicas. La cantidad del nitrógeno extraído se determina posteriormente.

El nitrato se mide en la solución de la muestra por ejemplo por fotometría.

Normas y recomendaciones internacionales para la medición de nitrógeno total se encuentran en la TABLA 4 del presente Protocolo de Monitoreo de Biosólidos.

6.2.3.2 Parámetros microbiológicos

6.2.3.2.1 Escherichia Coli

El primer paso para su análisis consiste en lavar la muestra del sustrato en agua destilada por cierto tiempo y diluir esta solución varias veces. De la dilución se realiza el monitoreo de Escherichia Coli según el procedimiento para la determinación del NMP en aguas vía tubos de incubación con sustrato de incubación de Escherichia Coli.

Normas y recomendaciones internacionales para la medición de Escherichia Coli se muestran en la Tabla 4 del presente Protocolo de Monitoreo de Biosólidos.

6.2.3.2.2 Salmonellas sp.

El procedimiento es similar al procedimiento para Escherichia Coli, pero se utiliza el medio de incubación correspondiente para Salmonellas sp.

Normas y recomendaciones internacionales para la medición de Salmonellas sp se detallan en la TABLA 4 del presente Protocolo de Monitoreo de Biosólidos.

6.2.3.2.3 Huevos de helmintos

En un proceso de lavado (con surfactantes), colado y centrifugado (con ciertos químicos) de la muestra en varias etapas, se separa los huevos de helmintos del resto de la sustancia particular de la muestra. En una segunda etapa se incuban los huevos separados para determinar su viabilidad.



Normas y recomendaciones internacionales para la medición de Huevos de Helmintos se detallan en la TABLA 4 del presente Protocolo de Monitoreo de Biosólidos.

TABLA 4: Normas y recomendaciones internacionales para la medición de los parámetros de biosólidos relevantes según el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (Moodley, Archer, Hawksworth, & Leibach, 2008) (New Jersey Department of Environmental Protection, 2012) (State of Ohio Environmental Protection Agency, 2009) (US EPA, Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge, 2003)

Parámetro	Norma y/o método normalizada ¹⁾
Pérdida por calcinación (sólidos totales)	SM 2540 G-1997 DIN EN 12880:2001-02
Pérdida por calcinación (sólidos totales volátiles)	SM 2540 G-1997 DIN EN 15935:2012-11
Arsénico	SW-846 Method 6010 (ICP) SW-846 Method 6020 (ICP/MS) SW-846 Method 7061 (AA Hidruro) SW-846 Method 7060*, SW-846 Method 7010 (AA ET) DIN 38405-35:2004-09 (AA) DIN EN ISO 15586:2004-02 (AA) ISO 17378-2:2014-02 (AA Hidruro) DIN EN ISO 17294-2: 2005-02 (ICP-MS) DIN EN ISO 11885:2009-09 (ICP-OES)
Cadmio	SW-846 Method 6010 (ICP) SW-846 Method 6020 (ICP/MS) SW-846 Method 7130*, SW-846 Method 7000 (AA Direct Aspiration) SW-846 Method 7131*, SW 846 Method 7010 (AA Graphite Furnace) DIN EN 13346:2001-04 (Extracción con agua regia) DIN ISO 11047:2003-05 (AA ET) DIN EN ISO 11885:2009-09 (ICP-OES) DIN EN ISO 17294-2 (ICP-MS) DIN 38406-16:1990-03 (Voltametría)
Cromo	SW-846 Method 6010 (ICP) SW-846 Method 6020 (ICP/MS) SW-846 Method 7190*, SW-846 Method 7000 (AA Direct Aspiration) SW-846 Method 7191*, SW 846 Method 7010 (AA Graphite Furnace) DIN EN 13346:2001-04 (Extracción con agua regia) DIN ISO 11047:2003-05 (AA ET) DIN EN ISO 11885:2009-09 (ICP-OES) DIN EN ISO 17294-2 (ICP-MS)
Cobre	SW-846 Method 6010 (ICP) SW-846 Method 6020 (ICP/MS) SW-846 Method 7210*, SW-846 Method 7000 (AA Direct Aspiration) SW-846 Method 7211*, SW 846 Method 7010 (AA Graphite Furnace) DIN EN 13346:2001-04 (Extracción con agua regia) DIN ISO 11047:2003-05 (AA ET) DIN EN ISO 11885:2009-09 (ICP-OES) DIN EN ISO 17294-2 (ICP-MS) DIN 38406-7:1991-09 DIN 38406-16:1990-03 (Voltametría)



Parámetro	Norma y/o método normalizada ¹⁾
Plomo	SW-846 Method 6010 (ICP) SW-846 Method 6020 (ICP/MS) SW-846 Method 7420*, SW-846 Method 7000 (AA Direct Aspiration) SW-846 Method 7421*, SW 846 Method 7010 (AA Graphite Furnace) DIN EN 13346:2001-04 (Extracción con agua regia) DIN ISO 11047:2003-05 (AA ET) DIN EN ISO 11885:2009-09 (ICP-OES) DIN EN ISO 17294-2 (ICP-MS) DIN 38406-6:1998-07 DIN 38406-16:1990-03 (Voltametría)
Mercurio	SW-846 Method 7471 (Cold Vapor (manual)) DIN EN ISO 17294-2 DIN EN ISO 12846:2012-08
Níquel	SW-846 Method 6010 (ICP) SW-846 Method 6020 (ICP/MS) SW-846 Method 7520*, SW-846 Method 7000 (AA Direct Aspiration) SW-846 Method 7521*, SW 846 Method 7010 (AA Graphite Furnace) DIN EN 13346:2001-04 (Extracción con agua regia) DIN ISO 11047:2003-05 (AA ET) DIN EN ISO 11885:2009-09 (ICP-OES) DIN EN ISO 17294-2 (ICP-MS) DIN 38406-11:1991-09 DIN 38406-16:1990-03 (Voltametría)
Zinc	SW-846 Method 6010 (ICP) SW-846 Method 6020 (ICP/MS) SW-846 Method 7950*, SW-846 Method 7000 (AA Direct Aspiration) SW-846 Method 7951*, SW 846 Method 7010 (AA Graphite Furnace) DIN EN 13346:2001-04 (Extracción con agua regia) DIN ISO 11047:2003-05 (AA ET) DIN EN ISO 11885:2009-09 (ICP-OES) DIN EN ISO 17294-2 (ICP-MS) DIN 38406-8:2004-10 DIN 38406-16:1990-03 (Voltametría)
Nitrógeno total	ISO 13878:1998-03
Nitrógeno total de Kjeldahl	SM 4500-Norg B or C-1997 EPA Method 351.1 (TKN) EPA Method 351.2 (TKN) SM 4500-Norg D-1997 DIN EN 13342:2001-01
Nitrógeno del nitrato	SW-846 Method 9056
Salmonellas Sp.	DIN 38414-13:1992-03 SM 9260 D EPA Method 1682 Note 11,12 "Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge", Appendix G (Kenner and Clark), EPA/625/R-92/013, July 2003 (Método de análisis) "Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge", Appendix F, EPA/625/R-92/013, July 2003



Parámetro	Norma y/o método normalizada ¹⁾
Escherichia Coli	(Método de preparación de muestra) SM-9221 C E-2006 EPA Method 1680 Note 15,12 EPA Method 1681 Note 16,12 (Método de análisis) "Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge", Appendix F, EPA/625/R-92/013, July 2003 (Método de preparación de muestra)
Huevos de helmintos viables	Yanko (1987) and "Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge", Appendix I, EPA/625/R-92/013, July 2003 Standard Methods for the Recovery and Enumeration of Moodley et al: Helminth Ova in Wastewater, Sludge, Compost and Urine-Diversion Waste in South Africa (Moodley, Archer, Hawksworth, & Leibach, 2008)

- 1) SM significa Método estandarizado para la examinación de aguas y aguas residuales, American Public Health Association, 1015 15th Street, NW., Washington, DC 20005
SW-846 significa Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods, EPA Publication SW-846, incluyendo todas modificaciones y actualizaciones.
- 2) ISP, ISP-OES, ISP-MS, AA, AA-ET, AA-Hidruro véase el ítem 6.2.3.1.2.

6.2.4 Términos referencia para el análisis luego de los 3 años

Según el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales se reconoce después de un plazo de tres (3) años de adecuación solo resultados de mediciones en base de la aplicación de métodos de análisis acreditados por INACAL.

6.2.5 Manejo de los resultados de monitoreo

6.2.5.1 Registro y reportes internos

Los resultados de los análisis son almacenados y registrados colocando toda la información en orden cronológico (señalando la fecha de monitoreo) en una hoja de cálculo o una base de datos computarizada. La información es comparada con los límites de calidad para biosólidos establecidos en el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.

El registro cronológico de los datos es necesario para determinar tendencias a largo plazo respecto a la calidad del lodo o biosólido, permitiendo obtener conclusiones sobre el funcionamiento de su producción e ingreso de contaminantes (metales pesados) no controlados en el proceso de producción.

Esta información, conjuntamente con la información del protocolo de monitoreo, la cadena de Custodia y los documentos conteniendo los reportes de los análisis realizados en los laboratorios correspondientes, deberá ser almacenada por un periodo mínimo de cinco años, debiendo estar, el archivo, a disposición del MVCS.

6.2.5.2 Registro y reportes externos

Los resultados del monitoreo son reportados al Registro Nacional de Producción y Reaprovechamiento de Biosólidos, que administra el MVCS y entregados a los adquirientes y/o usuarios finales de biosólidos, según las indicaciones del Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales .





UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA

"Universidad Pública de Calidad"