

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

Evaluación del uso de cosustratos alimenticios para potenciar la digestión anaeróbica y la producción de metano en aguas residuales domésticas a partir de ensayos biológicos

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Químico

Presentado por:

Kevin Rubén Errazuriz Guerrero

Erick Misael Limones Obando

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a Dios, quien es guía principal de nuestras vidas. Cada paso, decisión y acción que realizamos fue influenciada por él para terminar esta etapa de vida con el mayor éxito posible.

También queremos dedicar este trabajo a nuestros padres. Gracias a sus innumerables sacrificios, se convirtieron en pilar fundamental de nuestro peregrinaje universitario. Sin ellos, nada de lo obtenido en nuestras vidas hubiera sido posible.

Por último, queremos dedicar este proyecto a todos nuestros amigos y profesores, quienes nos acompañaron a lo largo de nuestra vida universitaria. Gracias a su apoyo, nos motivaron a dar siempre nuestro mayor esfuerzo para alcanzar la excelencia.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a nuestros tutores, MSc. Francesca Escala y a PhD. Luis Domínguez por brindarnos la oportunidad de llevar a cabo este tema de proyecto integrador, por darnos su apoyo para sacar lo mejor de nosotros y así representarlo en un buen trabajo.

También a la Ing. Andrea Rosado, gracias a su paciente supervisión y colaboración con el desarrollo de nuestra experimentación, se convirtió en pilar fundamental para alcanzar nuestra meta.

Finalmente, queremos agradecer a todas aquellas personas que nos brindaron su apoyo, más aún en los momentos más difíciles de nuestro trabajo.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me(nos) corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Kevin Rubén Errazuriz Guerrero y Erick Misael Limones Obando damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



**Kevin Rubén
Errazuriz Guerrero**



**Erick Misael
Limones Obando**

EVALUADORES

MSc. Nadia Flores
PROFESOR DE LA MATERIA


MSc. Francesca Escala
PROFESOR TUTOR

PhD. Luis Domínguez
PROFESOR COTUTOR

RESUMEN

Este trabajo se enfoca en evaluar el uso de cosustratos alimenticios para potenciar la digestión anaeróbica y la producción de metano en aguas residuales domésticas. Esta idea surge de la problemática que genera la acumulación de lodos en los reactores anaeróbicos de las PTAR, causando una baja tasa de biodegradación de materia orgánica.

La metodología empleada continúa con el trabajo de pregrado de Anguisaca & Chinchin, (2021), tomando como base la Norma Internacional Estándar ISO 11734, a Cardona et al. (2019) para el montaje/monitoreo de los reactores; y el trabajo de Rosales & Villón (2020) para la cuantificación de metano. De esta manera, se prepararon 5 tratamientos con diferentes proporciones de residuos de comida y lodo crudo, que se dejaron digerir durante 46 días. Con esto, se buscó encontrar la mejor relación de cosustrato/lodo que potencie la digestión y favorezca la producción de metano en el biogás.

Los resultados muestran que los tratamientos de codigestión tuvieron tasas de biodegradación de 13.12%, 18.57% y 22.76%, además, una producción final de metano de 10.9 mgC/gDQO, 20.2 mgC/gDQO y 32.0 mgC/gDQO; la cual fue mayor a la generada en la monodigestión de los lodos y el cosustrato. Adicionalmente, se encontró que el tratamiento más efectivo fue aquel con una proporción de 80% lodo y 20% residuos de comida. Por lo tanto, los resultados revelan que el uso de residuos de comida como cosustrato alimenticio, representa una alternativa rentable y sostenible para la potenciación de las PTAR en un país como Ecuador.

Palabras claves: Codigestión anaeróbica, cosustrato, residuos de comida, biogás, fracción de metano.

ABSTRACT

This work focuses on evaluating the use of food co-substrates to improve anaerobic digestion and methane production in domestic wastewater. This idea arises from the problem generated by the accumulation of sludge in the anaerobic reactors of different WWTP, which provokes a low efficiency in the biodegradation of organic matter.

The methodology applied was based on the undergraduate work of Anguisaca & Chinchin, (2021), based on the International Standard ISO 11734, Cardona et al. (2019) for the assemble and monitoring of the reactor, and the study of Rosales & Villón (202) for the quantification of the methane. In this way, 5 treatments with different proportion of sludge and food waste have been launched over a period of 46 days. Hence, we sought to find the best ratio of co-substrate and sludge that would improve the biodegradation rate and favor methane production in the biogas.

The results show that the co-digestion treatments had biodegradation rates of 13.12%, 18.57% and 22.76%, in addition, a final methane production of 10.9 mgC/gCOD, 20.2 mgC/gCOD and 32.0 mgC/gCOD; which was higher than that generated in the monodigestion of sludge and cosubstrate. Additionally, it was found that the most effective treatment was the one with a ratio of 80% sludge and 20% food waste. Therefore, the results reveal that the use of food waste as co-substrates is a cost-effective and sustainable alternative for the upgrading of WWTPs in developing countries.

Keywords: Anaerobic codigestion, cosubstrates, food waste, biogas, methane fraction.

Contenidos

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
DECLARACIÓN EXPRESA.....	iv
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
Contenidos	viii
Abreviaturas	x
Simbología	xi
Índice de tablas	xii
Índice de figuras	xiii
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Descripción del problema	1
1.2. Justificación del problema	2
1.3. Objetivos.....	3
1.4. Marco teórico	4
Capítulo 2.....	10
2. METODOLOGÍA	10
2.1. Diseño experimental	10
2.2. Lodos de PTAR	11
2.3. Preparación de inóculos	12
2.4. Preparación de cosustratos	13
2.5. Caracterización de las muestras.....	13
2.6. Medio de ensayo	16

2.7.	Montaje de reactores	17
2.8.	Mediciones de biogás	19
2.9.	Reactivos	23
Capítulo 3	25
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	25
3.1.	Caracterización de lodos	25
3.2.	Presión	26
3.3.	Producción de metano en el biogás.....	28
3.4.	Carbono inorgánico	31
3.5.	Tasa de biodegradación	33
3.6	Escalamiento de los resultados a una PTAR y Biogás generado	34
Capítulo 4	36
4.	Conclusiones y recomendaciones.....	36
4.1.	Conclusiones	36
4.2.	Recomendaciones	37
Bibliografía	40
Apéndice	42

Abreviaturas

ESPOL	Escuela Superior del Litoral
PTAR	Planta de Tratamientos de Aguas Residuales
L	Lodos
I	Inóculo
RC	Residuos de comida

Simbología

mg	miligramos
C/N	relación carbono nitrógeno
CH ₄	metano
DQO	Demanda Química de Oxígeno
COT	Carbono Orgánico Total
NPOC	carbono orgánico no purgable, por sus siglas en inglés
bar	bar, unidad de presión
barg	barg unidad de presión manométrica
mgC/dDQO	mg de carbono por g de demanda química de oxígeno presente

Índice de tablas

Tabla 1.1. Componentes del biogás en función del sustrato	7
Tabla 1.2. Características del biogás	8
Tabla 2.1. Contenido de los reactores según el tratamiento	11
Tabla 3.1. Caracterización de lodos de la PTAR.....	25
Tabla 3.2. Presión de los tratamientos de codigestión	28
Tabla 3.3. Fracción de metano promedio obtenida por tratamiento	30
Tabla 3.4. Validación de los resultados de la fracción de metano.....	31
Tabla 3.5. Resultados del carbono inorgánico disuelto	32
Tabla 3.6. Masa de carbono total en el biogás.....	32
Tabla 3.7. Aumento de la tasa de biodegradación por uso del cosustrato alimenticio en cada tratamiento.....	34
Tabla 3.8. Masa de cosustrato alimenticio requerida para biodegradación y biogás generado por tratamiento.....	34

Índice de figuras

Figura 2.1. Toma de muestra de la PTAR.....	12
Figura 2.. Lavado de inóculos	13
Figura 2.. Secado de muestras	14
Figura 2.. Homogenización de lodos	15
Figura 2.. Determinación de DQO	16
Figura 2.6. Montaje de reactores anaeróbicos	18
Figura 2.. Incubación de reactores anaeróbicos.....	19
Figura 2.. Medición de presión en los reactores.....	20
Figura 2.. Sistema de medición de metano	21
Figura 3.1. Comportamiento Presión vs Tiempo del tratamiento #1.....	26
Figura 3.2. Comportamiento Presión vs Tiempo de los tratamientos 2 a 6	27
Figura 3.3. Comparativa de la presión esperada vs la presión final obtenida en la codigestión	28
Figura 3.4. Producción de metano en el tiempo en los diferentes tratamientos.	29
Figura 3.5. Tasa de biodegradación en los diferentes tratamientos a los 46 días de experimentación.....	33
Figura 3.6. Producción anual de biogás a partir de 1 tonelada de lodo.....	35

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Descripción del problema

El crecimiento poblacional sumado a la falta de conciencia sobre el uso y cuidado del agua, implican un consumo desmedido de la misma, ocasionando un exceso de carga orgánica contaminante a través del tiempo, que influye directamente sobre la eficiencia en los procesos de digestión anaeróbica. Esto origina la necesidad de potenciar los sistemas de tratamiento existentes tal que las condiciones operativas sean las adecuadas. Tomando en cuenta lo mencionado, los parámetros de control y operación que se deben tomar con mayor consideración tal que el proceso se desarrolle de manera eficiente son los siguientes: temperatura, agitación, carga orgánica, tiempo de retención hidráulica, humedad, pH, concentración de ácidos y de materia nitrogenada.

La temperatura influye en la actividad microbiana y en la estabilidad del proceso (Fernández, Pérez, & Romero, 2008), la agitación mejora el contacto entre las bacterias y el sustrato. Una carga orgánica baja está ligada al dimensionamiento del reactor y a las características del sustrato utilizado (Arhoun, 2017). El tiempo de retención hidráulica debe ser alto para sistemas discontinuos debido a que así se beneficia la tasa de biodegradabilidad en los lodos, la humedad debe estar entre 60% y 80% para mejorar la digestión y la tasa de producción de metano. (Arhoun, 2017), un pH estable entre 6.5 y 7.5 incrementa la obtención de biogás (Liu et al, 2007), las concentraciones de ácidos y materia nitrogenada deben ser bajas debido a que actúan como inhibidores. (De Baere et al, 1983)

Para el caso de estudio, se considera una de las plantas de tratamiento de aguas residuales del cantón Samborondón, la cual presenta problemas de bajo rendimiento en la digestión anaeróbica de las aguas que se tratan

debido a la acumulación de lodos. La mayor cantidad de los problemas están asociados al dimensionamiento del reactor anaeróbico con el que operan, ya que este no satisface la demanda de lodos que se pueden tratar. Por consiguiente, esto origina una sobrecarga orgánica (baja tasa de biodegradabilidad) en el sistema que disminuye la eficiencia del proceso.

Las afectaciones resultantes de estos problemas recaen sobre las poblaciones aledañas y el personal operativo a cargo del proceso, ya que se genera desbordamiento de lodos con malos olores más altas cargas de contaminación. Por lo antes mencionado, se propone evaluar el uso de residuos orgánicos alimenticios para la potenciación de la digestión anaeróbica como una alternativa rentable y sostenible para un país en vías de desarrollo como Ecuador.

1.2. Justificación del problema

En Ecuador, el último registro sobre gestión de agua potable y alcantarillado se realizó en el 2016. Dentro del mismo, se consideraron 421 plantas de tratamiento de aguas residuales. El informe reportó que a nivel nacional se trataron el 29.3% de las aguas que ingresaron al sistema de alcantarillado, donde la región Costa trató el 33.3%. Por otro lado, el agua residual no tratada contempló un porcentaje del 69.7% del cual el 56.3% tuvo como disposición final los ríos (Terán & Christian Cando, 2016).

Con lo anteriormente mencionado, si bien existe una gran cantidad de plantas dedicadas al tratamiento de aguas residuales, estas no logran tratar toda la demanda existente en el país debido a la capacidad de las mismas. Por ello, es importante encontrar nuevas tecnologías que permitan satisfacer las necesidades poblacionales y mejorar la eficiencia de la digestión anaeróbica de lodos en la PTAR del cantón Samborondón.

De esta manera, la codigestión anaeróbica surge como una propuesta rentable para la gestión de residuos orgánicos ya que implica una disminución de costos por gestión de residuos. Además, favorece la conversión de la materia orgánica en metano y dióxido de carbono, reduciendo los malos olores que afectan al personal operativo y a los sectores aledaños de la planta (Álvarez, Otero, & Lema, 2010). Por otra parte, el cosustrato también tiene un efecto amortiguador en el sistema permitiendo tener un mayor control en la operación del reactor (Arhoun, 2017). Por estas razones, la codigestión anaeróbica es una opción viable para mejorar el tratamiento de lodos.

Para el caso de estudio, se utilizará como cosustrato residuos de comida ricos en carbono recolectados de restaurantes con la intención de evaluar su impacto sobre el proceso de biodegradación de lodos y la producción de biogás con alta concentración de metano. Por lo tanto, la relevancia que implica mejorar los sistemas de tratamientos anaeróbicos a partir de la evaluación del uso de cosustratos alimenticios en el Ecuador toma importancia como una alternativa económica viable para mejorar la calidad del agua tratada en las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Evaluar el uso de cosustratos alimenticios mediante ensayos biológicos para el análisis de su impacto sobre la digestión anaeróbica y la producción de metano en aguas residuales domésticas.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar las muestras de lodos de la PTAR en Samborondón a partir de análisis de laboratorio.
- Analizar la tasa de biodegradación de lodos variando el contenido de sustrato utilizado.

- Cuantificar la producción de metano en la codigestión anaeróbica a partir de un método volumétrico de desplazamiento.

1.4. Marco teórico

1.4.1. Aguas residuales domésticas

Estas comprenden el agua que se abastece a conjuntos residenciales, negocios, instituciones públicas y privadas, espacios recreativos, en general, lugares donde se desarrollen actividades antropomórficas. Algunos de los usos de la misma implican: agua para consumo humano, limpieza e higiene, evacuación de residuos y riegos de áreas verdes. (Eddy, 1996)

1.4.2. Tratamientos de agua

Es importante conocer los contaminantes presentes en el agua residual para establecer un proceso de tratamiento. De esta manera, los principales tratamientos son: primarios, secundarios y terciarios.

El tratamiento primario está basado en el uso de operaciones físicas como sedimentación y flotación. Los tratamientos secundarios y terciarios tienen como fundamento, el uso de procesos químicos y biológicos para la eliminación de materia orgánica. Ejemplos de estos son la adsorción, precipitación química y la digestión anaeróbica.

La existencia del tratamiento terciario implica mejoras en la evacuación y reutilización de lodos, lo cual hace relevante la propuesta de evaluación de usos de cosustratos alimenticios para potenciar la digestión anaeróbica y la producción de metano en aguas residuales domésticas. (Eddy, 1996)

1.4.3. Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica engloba una serie de procesos biológicos en los cuales la materia orgánica se transforma parcialmente en ausencia de oxígeno, en una mezcla de gases compuesta principalmente por metano y dióxido de carbono (Rumana, 2013). En la digestión anaeróbica existen 4 etapas principales. La primera etapa es la hidrólisis y licuefacción, en donde el material orgánico más complejo (proteínas, grasas y carbohidratos) se degrada en sus partes más simples (aminoácidos, ácidos grasos, azúcares). Luego de ello, en la fermentación o acidogénesis empieza la descomposición de los productos de la hidrólisis en ácidos grasos volátiles (AGV), dióxido de carbono (CO_2), amoníaco (NH_3) y ácido sulfhídrico (H_2S). Después, le sigue la acetogénesis donde los AGV y alcoholes se oxidan mayormente en ácido acético. Además, se produce CO_2 e hidrogeno (H_2). Finalmente, la digestión termina con la metanogénesis donde se produce el metano a partir de la reducción del ácido acético y del CO_2 (Rumana, 2013).

1.4.4. Limitaciones de la digestión anaeróbica

En un reactor anaeróbico coexiste una amplia diversidad de bacterias que llevan a cabo los procesos de degradación de la materia orgánica. Estas bacterias requieren condiciones específicas para su crecimiento tales como un pH ligeramente alcalino, y temperaturas mesofílicas o termofílicas según el diseño del reactor (Metcalf & Eddy, 1995). Adicionalmente, las características del sustrato alimenticio afectan directamente el desempeño de la digestión.

En el caso de lodos de PTAR, estos poseen una baja relación C/N que produce una baja producción de biogás. Además, son propensos a contaminarse con sustancias inhibitoras en la digestión. Entre los diferentes inhibidores que pueden encontrarse están: detergentes, antibióticos, pesticidas, metales pesados y plásticos (Anguisaca & Chinchin, 2021) (Lorenzo & Obaya, 2005).

No obstante, el efecto de inhibición de estas sustancias depende fuertemente de su concentración, por lo que solo la presencia de dichas sustancias en concentraciones elevadas es capaz de inhibir la actividad bacteriana.

1.4.5. Codigestión

La codigestión anaeróbica implica la adición de un cosustrato al reactor, el cual busca mejorar las características del sistema para favorecer la digestión de los lodos. En concreto, el cosustrato puede ser empleado para mejorar las proporciones de nutrientes en el lodo, beneficiando la biodegradabilidad de los mismos. Además, reduce la concentración de inhibidores, favorece la producción de metano e incrementa la carga de materia orgánica biodegradable (Arhoun, 2017) (Julio, Peláez, & Molina, 2016).

En el caso de lodos de tratamiento de aguas residuales domésticas, se busca que el cosustrato sea rico en carbono para mejorar la proporción C/N en la digestión y así evitar una acumulación de amoníaco que pueda inhibir la metanización de la materia orgánica (Arhoun, 2017).

Entre los diferentes cosustratos que se han empleado en procesos de codigestión, se han empleado los siguientes: grasas y aceites (Mata, y otros, 2014); estiércol de animales (Arhoun, 2017); residuos de comida (Anguisaca & Chinchin, 2021); desperdicios de pescado y césped (Cardona, Levrard, Guenne, & Chapleur, 2019).

Por otro lado, el trabajo de (Anguisaca & Chinchin, 2021) reveló que, para los lodos de tratamiento de aguas residuales, el uso de residuos de comida logró aumentar en mayor medida la tasa de biodegradabilidad de los lodos en comparación al uso de estiércol. Así mismos, se ha comprobado que para una proporción de 75% lodo 25% residuos de comida con respecto a los mg de DQO, no hay efectos de inhibición por parte del cosustrato a la digestión de

los lodos de aguas residuales domésticas (Anguisaca & Chinchin, 2021). No obstante, el uso de residuos de comida presenta ciertos desafíos, como la variabilidad de su composición según su origen que deben resolverse para su implementación (Julio, Peláez, & Molina, 2016).

1.4.6. Biogás

El biogás está compuesto mayoritariamente por metano y dióxido de carbono. Las composiciones respectivas de estos gases dependen del tipo de residuo orgánico utilizado y de su tasa de biodegradabilidad. En la tabla 1.1, se reflejan los componentes del biogás de acuerdo con el sustrato que se utiliza en procesos de digestión anaeróbica.

Componente	Residuos agrícolas	Lodos de depuradora	Residuo de industria	Gas de vertedero
CH ₄	50 a 80%	50 a 80%	50 a 70%	45 a 65 %
CO ₂	30 a 50%	20 a 50%	30 a 50%	34 a 55 %
H ₂	0.2%	0.5%	0.2%	0.2%
H ₂ S	10 a 700 ppm	0 a 1%	0 a 8%	0.5 – 100 ppm
N ₂	0 a 1%	0 a 3%	0 a 1%	0 a 20 %

Tabla 1.1. Componentes del biogás en función del sustrato

Fuente: (Arhoun, 2017)

Para el caso de estudio, el metano es el componente de mayor interés por sus propiedades energéticas. De esta manera, el uso de cosustratos alimenticios en procesos de digestión está asociado con procesos rentables, ya que la generación de biogás es el puente de transición hacia la obtención de energía más sustentable.

Esta valoración del biogás implica ventajas ambientales y económicas gracias a sus principales opciones de conversión y uso tales como: producción de calor y electricidad, combustible comprimido y como material en procesos de síntesis de alcoholes.

En la tabla 1.2, se detallan las características generales que posee el biogás.

Composición	50 a 70% CH ₄
	50 a 70% CO ₂
	Trazas de otros gases
Contenido energético	6 a 6.5 kW h m ⁻³
Equivalente de combustible	0.60 a 0.65 L petróleo / m ⁻³ biogás
Límite de explosión	6 a 12% del biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 a 750°C
Presión crítica	74 a 88 atm
Temperatura crítica	-82.5°C
Densidad normal	1.2 kg m ⁻³
Olor	Huevo podrido
Masa molar	16.043 kg kmol ⁻¹

Tabla 1.2. Características del biogás
Fuente: (Deublein & Steinhauser, 2010)

1.4.7. Normativa Ecuatoriana e Internacional

La norma que aplica al tratamiento de lodos en digestión que provienen de aguas residuales domésticas es la NTE-INEN-ISO 11734. Esta normativa es una traducción de la norma internacional ISO 11734:1995, cuyo objetivo es evaluar la tasa de biodegradación de la materia orgánica por acción de microorganismos anaerobios. (INEN, 2014)

En el acuerdo ministerial 097-A, en el Anexo 1 del libro VI. Normas de calidad ambiental y de descarga de efluentes, se mencionan los límites de descarga máximos permisibles a un cuerpo de agua

dulce. (Ministerio del ambiente, 2017). Los parámetros de mayor interés para el caso de estudio son los siguientes: DBO₅, DQO, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, sólidos totales y temperatura.

Capítulo 2

2. METODOLOGÍA

2.1. Diseño experimental

En el presente trabajo se amplía la metodología presentada por Anguisaca & Chinchin, (2021), tomando como base la Norma Internacional Estándar ISO 11734 y a Cardona et al. (2019), enfocado en el montaje de los reactores anaeróbicos y su monitoreo. Además, se adiciona al estudio la cuantificación del metano generado basándose en lo expuesto por Rosales & Villón (2020) y Loosdrecht, et al. (2016), aplicando un método volumétrico por columnas de desplazamiento.

Dentro de los ensayos, se realizaron seis tratamientos por triplicado dando un total de 18 reactores anaeróbicos que fueron incubados durante 46 días. Los reactores están estructurados por una botella de vidrio de 1L de capacidad, en las que se introdujo una mezcla de lodo, cosustrato e inóculo, cuya proporción viene determinada por el tipo de tratamiento empleado como se detalla en la tabla 2.1. Estos fueron llenados con una solución de medio de ensayo hasta completar 500 mL, dejando el volumen restante para el biogás generado en el proceso de digestión. Además, se verificó el pH de los reactores y se bombeó una corriente de nitrógeno para eliminar el oxígeno presente en la botella. Finalmente, los reactores fueron cerrados con un tapón de caucho y se usó cuerdas de seguridad para mantenerlos bien sellados.

Número de tratamiento	Tratamiento	Inóculo lavado (g)	Lodo crudo (g)	Residuos de comida (g)
1	Blanco	15.0	0.0	0.0
2	Lodo + Inóculo	15.0	287.7	0.0
3	RC + Inóculo	15.0	0.0	105.9
4	70% Lodo + RC + Inóculo	15.0	201.4	31.8
5	75% Lodo + RC + Inóculo	15.0	215.8	26.5
6	80% Lodo + RC + Inóculo	15.0	230.2	21.2

Tabla 2.1. Contenido de los reactores según el tratamiento

Elaborado por: Errazuriz & Limones, (2022)

El monitoreo de los reactores se realizó cada tres o cuatro días durante las dos primeras semanas. En este periodo, se midió la presión manométrica dentro de los reactores y se liberó la presión de los mismos por seguridad. Después de las dos semanas de incubación, el monitoreo pasó a ser semanal, adicionando la medición de la fracción de metano presente en el biogás producido en cada reactor anaeróbico.

2.2. Lodos de PTAR

Las muestras de lodos fueron tomadas de una PTAR de la ciudadela Río Grande, ubicada en vía Samborondón km 1. Se realizaron dos muestreos, el primero para la preparación de los inóculos y el segundo para la caracterización de los lodos más el montaje de los reactores. Las muestras se mantuvieron a temperatura ambiente hasta llegar al laboratorio para su almacenamiento y su posterior uso. Al momento de preparar los reactores, se retiró del lodo cualquier material extraño que puede estar presente (piedras, hojas y plásticos) de forma manual.



Figura 2.1. Toma de muestra de la PTAR

Fuente: Errazuriz & Limones, (2022)

2.3. Preparación de inóculos

Tomando como referencia la norma ISO 11734 para la preparación de los inóculos, la muestra fue introducida en recipientes de 500 mL. Estos fueron llenados de tal forma que, la cantidad de muestra en el frasco esté 1 cm por debajo del borde superior del recipiente. Una vez cerrados los envases, se los almacenó en una incubadora a 35°C durante un periodo de cinco días. Posteriormente, se realizaron lavados a través del uso de un medio de ensayo hasta que la concentración de Carbono Inorgánico (CI) en el sobrenadante este en un rango de 1 a 3 mg/L.

El lavado fue realizado con ayuda de una centrifugadora, la cual trabajó a 30 RPM por 5 minutos. Se realizaron entre cinco a seis lavados hasta alcanzar la concentración de CI deseada. La medición de CI se realizó por medio un analizador TOC (SHIMADZU, TOC-VCSN, Kioto, Japón), donde se tomó como CI la diferencia entre carbono total y carbono orgánico no purgable (NPOC). Finalmente, el inóculo fue almacenado nuevamente en la incubadora a 35°C hasta su posterior uso en el montaje de los reactores anaeróbicos.



Figura 2.2. Lavado de inóculos
Fuente: Errazuriz & Limones, (2022)

2.4. Preparación de cosustratos

Se seleccionó como cosustrato a los residuos de comida provenientes de restaurantes, debido a su alto aporte en carbono y su fácil accesibilidad. Además, se tienen precedentes de su efectividad en promover la biodegradabilidad de los lodos en las PTAR como demostraron Anguisaca & Chinchin, (2021). Los restos de comida fueron recolectados de un restaurante ubicado en Samanes 2, en la ciudad de Guayaquil. El cosustrato se homogenizó en una licuadora doméstica (Osterizer, 4655, México), retirando previamente materia que no puede ser triturada, y posteriormente se refrigeró durante dos días antes de su uso como recomienda Cardona et al, (2021).

2.5. Caracterización de las muestras

Con el fin de calcular las cantidades necesarias de lodos, cosustratos e inóculos para cada tratamiento, las muestras fueron secadas y lavadas (en el caso de los inóculos) para la utilización de métodos analíticos que permitieron la caracterización de parámetros fisicoquímicos de las muestras utilizadas.

2.5.1. Humedad

Se tomaron muestras por triplicado de lodos, cosustrato e inóculo para su pesado inicial. Después, las muestras se llevaron al horno (MEMMERT, SNB-400, Büchenbach, Alemania) por 24 horas a 50°C para remover su contenido de agua y luego se colocaron en un desecador por unos 30 minutos, donde las muestras fueron enfriadas. Posteriormente, se procedió al pesaje de las muestras y al cálculo de su porcentaje de humedad con la ecuación 1.

Ecuación 1: Porcentaje de humedad

$$\% \text{ humedad} = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100$$

m_1 = masa del soporte

m_2 = masa del soporte y muestra húmeda

m_3 = masa del soporte y muestra seca



Figura 2.3. Secado de muestras

Fuente: Errazuriz & Limones, (2022)

2.5.2. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Una vez determinada la humedad en el lodo, cosustrato e inóculo, se destina una porción de las muestras secadas para la determinación de DQO. Se utilizó el kit de Hach (8000 TNTplus HR)

junto con el espectrofotómetro Hach DR 3900 Iowa USA para las mediciones de DQO.

En primer lugar, las muestras secas fueron trituradas en mortero para su homogenización. Luego se pesaron entre 1 a 8 mg de muestra y fueron colocados en los viales del kit. Además, se realizó un triplicado de los lodos, cosustratos e inóculos para validar los resultados obtenidos. Una vez pesados los viales con la muestra, se agregaron 2 mL de agua tipo 1 (agua desionizada) y los viales se llevaron a un digestor por 2 horas. Luego de este procedimiento, se dejó enfriar durante 1 hora los viales. Finalmente, se midió el DQO en el espectrofotómetro y se registraron los datos.



Figura 2.4. Homogenización de lodos

Fuente: Errazuriz & Limones, (2022)



Figura 2.5. Determinación de DQO
Fuente: Errazuriz & Limones, (2022)

2.5.2.1. Caracterización externa

Para la determinación de los parámetros químicos de los lodos se envió una muestra del lodo crudo usado en los reactores a un laboratorio externo para la determinación de %C, %N y tensoactivos. De esta forma, se determina la relación C/N del lodo trabajado para analizar el grado de biodegradación de los lodos del estudio.

2.6. Medio de ensayo

La preparación del medio de ensayo fue tomada de la norma ISO 11734, en la cual se tomó agua tipo I de un purificador. Una vez tomada el agua tipo I, se hizo pasar una corriente de N_2 para desoxigenarla y se la almacenó en un recipiente de plástico. Posteriormente, los reactivos previamente pesados se añadieron al agua tipo I desoxigenada y se mezclaron hasta tener una solución homogénea.

El cloruro de hierro (II) tetrahidratado $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ y el sulfuro de sodio nonahidratado $Na_2S \cdot 9H_2O$ fueron colocados al final para evitar que estos se oxiden. Finalmente, se pasó nuevamente una corriente de N_2 para asegurar una concentración de O_2 disuelto menor a 2 mg/L. El medio de ensayo preparado actúa como solución tampón reguladora de pH y tiene

los nutrientes necesarios para promover el crecimiento bacteriano en los reactores anaeróbicos.

2.7. Montaje de reactores

Una vez determinados la humedad y el DQO de los lodos, cosustratos e inóculos, se procedió a calcular los pesos requeridos en los reactores para los diferentes tratamientos. Se utilizó una hoja de cálculo en Excel donde se registraron las cantidades necesarias de lodos, cosustratos e inóculos en base seca y posteriormente, se transformaron a base húmeda gracias al porcentaje de humedad previamente medido.

2.7.1. Blanco

El tratamiento de blanco consiste únicamente de 15 g de inóculo lavado húmedo. Este tratamiento sirve para realizar la determinar la concentración de carbono inorgánico neto en el resto de los tratamientos.

2.7.2. Monodigestión

Estos tratamientos se enfocan en la digestión por separado de los lodos y los residuos de comida. En ellos, la relación entre sustrato/inóculo está dada por Cardona et al, (2019) que establece 12 g DQO/ 1.2 g DQO.

2.7.3. Codigestión

En los tratamientos de codigestión se mezclaron los lodos, inóculos y residuos de comida (cosustrato); respetando la proporción de (cosustrato + lodo) /inóculo de 12 g DQO/ 1.2 g DQO. Se realizaron 3 diferentes tratamientos en los que se varió la proporción de lodo y cosustrato con respecto a los gramos de DQO aportados al sistema. Estos tratamientos fueron: 70% lodo - 30% cosustrato, 75% lodo - 25% cosustrato y 80% lodo - 20% cosustrato. Cabe recalcar que los porcentajes están de acuerdo con el aporte de

gramos de DQO al sistema, mas no al porcentaje másico de la mezcla.



Figura 2.6. Montaje de reactores anaeróbicos

Fuente: Errazuriz & Limones, (2022)

Una vez pesado cada reactor, se llenó con solución de medio de ensayo hasta completar 500 mL en la fase de reacción. Luego, se pasó una corriente de nitrógeno durante 10 minutos en las botellas para eliminar el oxígeno en el tope de los recipientes y se midió el oxígeno disuelto en los reactores. Después, fueron incubados a 35 °C durante 2 días para observar si ocurre algún cambio de coloración a rosa que revele la infiltración de oxígeno en los reactores.



Figura 2.7. Incubación de reactores anaeróbicos

Fuente: Errazuriz & Limones, (2022)

2.8. Mediciones de biogás

Una vez montado todos los reactores, se realizó un monitoreo constante del biogás producido en los siguientes parámetros.

2.8.1. Presión

Durante las dos primeras semanas, las mediciones de presión se realizaron cada tres a cuatro días. En estas mediciones, las botellas se sacaron de la incubadora y se agitaron antes de insertar el manómetro. Luego se registra la presión y después se deja escapar el biogás en una campana de extracción para evitar que la presión se acumule por encima de los 2 barg. Pasada la segunda semana de incubación, las mediciones de presión se realizaron semanalmente.



Figura 2.8. Medición de presión en los reactores

Fuente: Errazuriz & Limones, (2022)

2.8.2. Fracción de metano

2.8.2.1. Medición por desplazamiento volumétrico

Después de la segunda semana de incubación, se empezó a medir la fracción de metano en el biogás. Para ello, se tomó una muestra de 60 mL del biogás con una jeringa conectada a una válvula de tres vías. Se insertó la aguja de la jeringa al tapón de la botella y se abrió paso a la válvula, permitiendo que el gas fluya a la jeringa hasta completar los 60 mL, presionando contra el émbolo. Luego se retiró la aguja del tapón y se abrió la válvula ligeramente para igualar la presión de la jeringa con la presión atmosférica (Rosales & Villón, 2020). Después, se conecta la jeringa a una botella invertida llena de una solución 1M de NaOH y se inyecta lentamente por 2 minutos el biogás. El volumen de agua desplazado escapa por una conexión secundaria y se recolecta en una probeta. La composición de metano en el biogás se la determina con la ecuación 2.

Ecuación 2: Fracción de metano

$$y_{Metano} = \frac{V_{jeringa} - V_{desp}}{V_{jeringa}}$$

Donde,

Y_{metano} = Fracción de metano en el biogás

V_{jeringa} = Volumen inicial del biogás en la jeringa (mL)

V_{desp} = Volumen desplazado por el biogás inyectado (mL)



Figura 2.9. Sistema de medición de metano

Fuente: Errazuriz & Limones, (2022)

2.8.2.2. Validación:

Con el fin de corroborar los resultados que se obtienen en la determinación de la fracción de metano en el biogás, el último día de medición se realizaron dos repeticiones por cada reactor para tener un total de seis mediciones por cada tratamiento. La validación se hizo al final de la experimentación para minimizar la presencia de N_2 que fue usado para remover el oxígeno de los reactores.

2.8.3. Carbono gaseoso en el biogás

Tras realizar las mediciones de presión en los reactores y de la temperatura ambiental, se aplicó la ecuación tres para cuantificar la cantidad de biogás producido en mg de carbono, donde 1200000 es un factor de conversión a mg de C.

Ecuación 3: Masa de carbono en el biogás

$$m_g = \frac{1200000\Delta pV_h}{RT}$$

Donde,

m_g = Masa de carbono gaseoso en el espacio de cabeza (mg)

Δp = Presión acumulada en el reactor (bar)

V_h = Volumen del espacio de cabeza (L)

T = Temperatura del reactor (K)

R = Constante de los gases ideales (J/mol K)

2.8.4. Carbono inorgánico disuelto

Al pasar 46 días de incubación de los reactores, se abrió uno de los triplicados de cada tratamiento para este análisis. Se tomo una alícuota de 50 mL del sobrenadante y se filtró antes de llevar al analizador TOC para medir el CI, considerando que el CI es la diferencia entre el carbono total (TC) y el carbono orgánico no purgable (NPOC, por sus siglas en ingles). Con ello, se calculó la masa de carbono disuelto en el medio de ensayo con la siguiente ecuación:

Ecuación 4: Masa de carbono disuelto en el agua

$$m_l = C_{CI,neto}V_L$$

Donde:

m_l = Masa de carbono disuelto (mg)

V_L = Volumen del líquido (L)

$C_{CI, neto}$ = Concentración de carbono inorgánico neto (mg/L)

Ecuación 5: Concentración de carbono inorgánico neto

$$C_{CI,neto} = C_{CI,i} - C_{CI,B}$$

Donde,

$C_{CI, i}$ = Es la concentración de carbono inorgánico en el reactor

$C_{CI, B}$ = Es la concentración de carbono inorgánico en el blanco

2.8.5. Carbono total producido en el biogás y tasa de biodegradabilidad

El carbono total producido es la suma del carbono presente en el biogás y el carbono que está disuelto en la fase líquida, esto se puede observar en la ecuación 6.

Ecuación 6: Masa de carbono total producido en el biogás

$$m_T = m_g + m_l$$

La tasa de biodegradabilidad se define como el porcentaje de masa de carbono total transformado en biogás con respecto a la cantidad de carbono presente en la materia orgánica inicialmente en el reactor. Esto se representa en la ecuación 7.

Ecuación 7: Tasa de biodegradación

$$D_T = \frac{m_T}{m_B} \times 100$$

Donde:

D_T = Tasa de biodegradabilidad

m_T = Masa de carbono total producido en el biogás (mg)

m_B = Masa de carbono en la materia orgánica en el reactor (mg)

Finalmente, la estimación de la materia orgánica en los reactores se puede obtener a partir del DQO de las muestras con la siguiente ecuación de Dubber & Gray, (2010):

Ecuación 8: Conversión de DQO a COT

$$DQO = 49.2 + 3.00 \times COT$$

2.9. Reactivos

Los reactivos del presente trabajo fueron utilizados para la preparación del medio de ensayo. Cada uno de ellos fueron sugeridos por la norma ISO 11734, los cuales se detallan a continuación:

- Dihidrógeno fosfato de potasio anhidro (KH_2PO_4)
- Monohidrógeno fosfato de sodio dodecahidrato ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)
- Cloruro de magnesio hexahidrato ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)
- Cloruro de amonio de hierro (II) tetrahidrato ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)
- Cloruro de Calcio dihidrato ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
- Sulfuro de sodio nonahidrato ($\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)
- Cloruro de amonio (NH_4Cl)
- Resazurina ($\text{C}_{12}\text{H}_7\text{NO}_4$)

Para el sistema de medición de metano fue necesaria para la preparación de una solución básica 1N de hidróxido de sodio (NaOH). Para ello, se inyectó 60 mL de biogás durante 2 minutos, dando el tiempo de contacto suficiente para una buena transferencia de masa. Con esto, como resultado de una reacción de neutralización se absorbió CO_2 y el H_2S de la muestra, quedando metano (Rosales & Villón, 2020).

Capítulo 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. Caracterización de lodos

La caracterización de lodos fue realizada en función de identificar los parámetros que mayoritariamente influyen en la obtención de resultados del estudio. En la tabla 3.1, se representan los resultados obtenidos de la caracterización de los lodos de la PTAR. Se muestra que la relación C/N es de 14.59. Dicha razón fue más alta a la reportada por Anguisaca & Chinchin (2021), que trabajaron con lodos de una PTAR con condiciones similares, pero con un mayor grado de acumulación de los lodos, lo que puede explicar dicha diferencia. No obstante, una relación óptima para la digestión anaeróbica oscila en un rango de entre 20 a 30 (López, 2014).

Otro factor importante es la cantidad de tensoactivos presentes en el lodo, ya que influyen directamente sobre la biodegradación del sistema, provocando problemas de inhibición en el proceso. Según Agra-Cadarso, (2015), considerando a los detergentes como compuestos tensoactivos con mayor potencial de inhibición a concentraciones superiores a 20 mg/L, el valor obtenido en la caracterización de lodos es de 2.94 mg/L. Esto permite inferir que, al ser una concentración muy baja de tensoactivos, el proceso de digestión anaeróbica no es afectado por inhibición.

% Carbono	15.03
% Nitrógeno	1.03
Relación C/N	14.59
Tensoactivos (mg/kg)	2.80
Tensoactivos (mg/L)	2.94
DQO (mg/g lodo seco)	457.43

Tabla 3.1. Caracterización de lodos de la PTAR

Elaborado por: Errazuriz & Limones, (2022)

3.2. Presión

En este paso, a cada uno de los 18 reactores montados, divididos en 6 tratamientos por triplicado durante 46 días, se midió la presión manométrica en cada uno de ellos. Los resultados obtenidos fueron representados en las gráficas 10 y 11 respectivamente, donde se muestran curvas de Presión vs Tiempo de los diferentes tratamientos en los biorreactores.

En la figura 3.1, se observa un comportamiento lineal de la presión en el tiempo. Este tratamiento corresponde al blanco (tratamiento #1), el cual consta únicamente de inóculo lavado. El resultado de este comportamiento es el esperado, ya que este biorreactor no contiene materia orgánica que pueda ser biodegradada, ocasionando que no exista producción de biogás en el reactor. Por esta razón, las mediciones de presión son nulas.

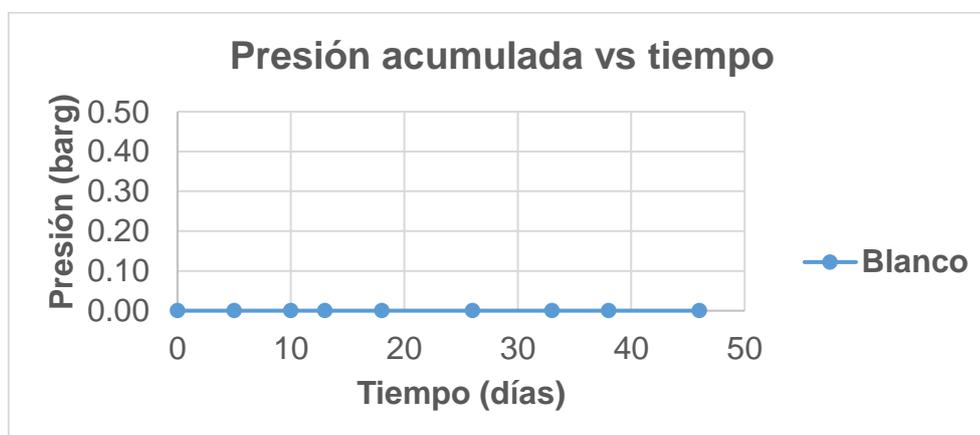


Figura 3.1. Comportamiento Presión vs Tiempo del tratamiento #1
Elaborado por: Errazuriz & Limones, (2022)

Por otro lado, en la figura 3.2 se presenta una comparativa de los comportamientos de la presión en el tiempo para los distintos tratamientos en cada uno de los reactores. El tratamiento #2 visto en la tabla 2.1, fue el que presentó la menor generación de biogás, lo cual refleja la necesidad

de potenciar la digestión anaeróbica con la adición de un cosustrato alimenticio.

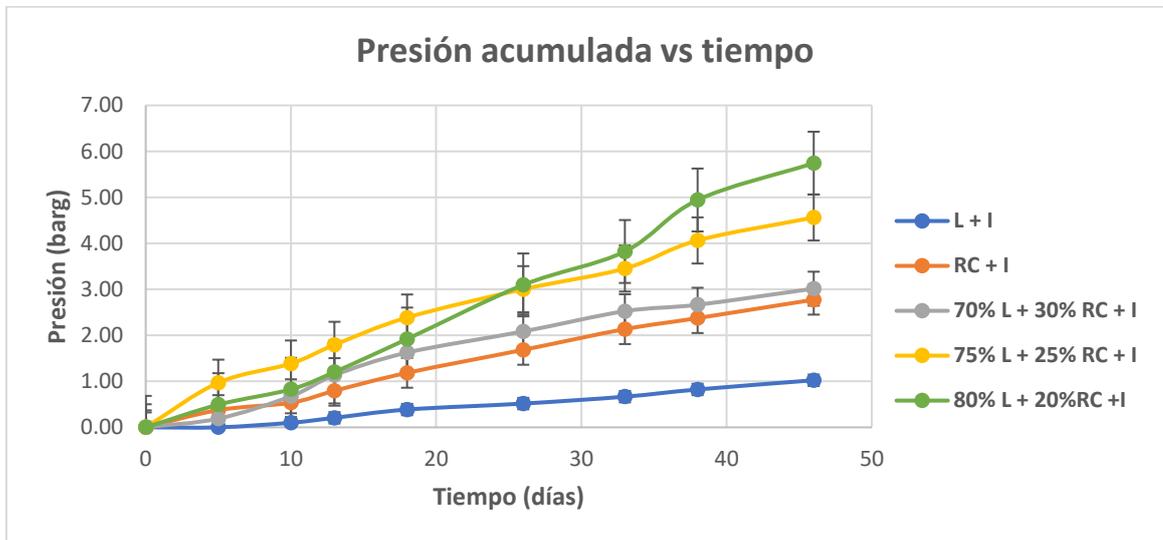


Figura 3.2. Comportamiento Presión vs Tiempo de los tratamientos 2 a 6

Elaborado por: Errazuriz & Limones, (2022)

Los tratamientos en los cuales se utilizó el cosustrato alimenticio, hubo un aumento de presión, lo cual evidenció mayor generación de biogás. Además, se observó que, a mayor concentración de cosustrato utilizado, la producción de biogás decrece. Con esto mencionado, el tratamiento que obtuvo la mayor generación de biogás fue el tratamiento #6. Sin embargo, es de destacar que en un inicio el tratamiento 6 tuvo una menor generación de biogás que el tratamiento 5 hasta el día 26. Esto implica que, en el corto plazo la digestión de los lodos se ve reducida al limitar la cantidad de cosustrato, pero a largo plazo favorece la producción de biogás.

Adicionalmente, gracias a los tratamientos #2 y #3 se determinó la presión acumulada en cada monodigestión durante los 46 días de trabajo. Por lo tanto, la presión mínima esperada en los reactores de codigestión estaría representada por la media ponderada de las presiones acumuladas en las monodigestiones según su porcentaje de gDQO de cada sustrato (lodo y residuos de comida). De esta manera, al medir la presión en los codigestores, se pudo analizar el porcentaje en el que aumentó la presión

del sistema por la utilización del cosustrato alimenticio. En la tabla 3.2 y en la figura 3.3, se muestran los resultados de las mediciones mencionadas, donde el tratamiento #6 fue el que presentó un mayor aumento con respecto a la presión mínima esperada, indicando que existe una mayor sinergia entre el lodo y el cosustrato en dicha proporción.

Tratamiento	Presión mínima esperada (bar)	Presión medida (bar)	Aumento Presión %
70% Lodo + RC + Inóculo	1.42	2.80	97
75% Lodo + RC + Inóculo	1.34	4.66	349
80% Lodo + RC + Inóculo	1.25	5.94	374

Tabla 3.2. Presión de los tratamientos de codigestión
Elaborado por: Errazuriz & Limones, (2022)

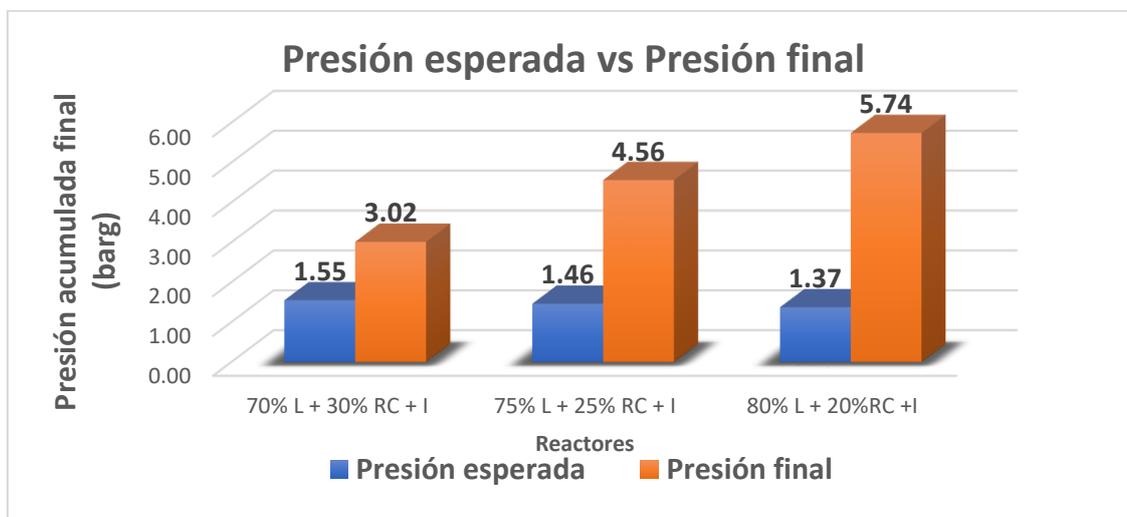


Figura 3.3. Comparativa de la presión esperada vs la presión final obtenida en la codigestión

Elaborado por: Errazuriz & Limones, (2022)

3.3. Producción de metano en el biogás

En la figura 3.4, se puede observar que la producción de metano en función del tiempo se ve favorecida por el uso del cosustrato alimenticio con menor proporción de RC con respecto al lodo, siendo este el

tratamiento #6. Por lo tanto, se permite inferir que, a concentraciones bajas de cosustrato alimenticio, se beneficia la generación de metano en el biogás. Es importante mencionar que la recolección de datos se hizo a partir del día 18, puesto que se dio el tiempo suficiente para que el biogás dentro del reactor esté compuesto mayoritariamente por metano y dióxido de carbono, ya que inicialmente los reactores fueron purgados con N_2 para eliminar el oxígeno presente en los mismos, lo cual puede producir interferencia en el método volumétrico usado para la medición de la fracción del gas. Finalmente, conociendo la fracción de metano y la presión total del sistema, se estima el contenido total de metano en el reactor. El resultado se expresa en $mgC/gDQO$ para que pueda compararse la producción de metano con tratamientos que no tengan la misma cantidad de materia orgánica inicial.

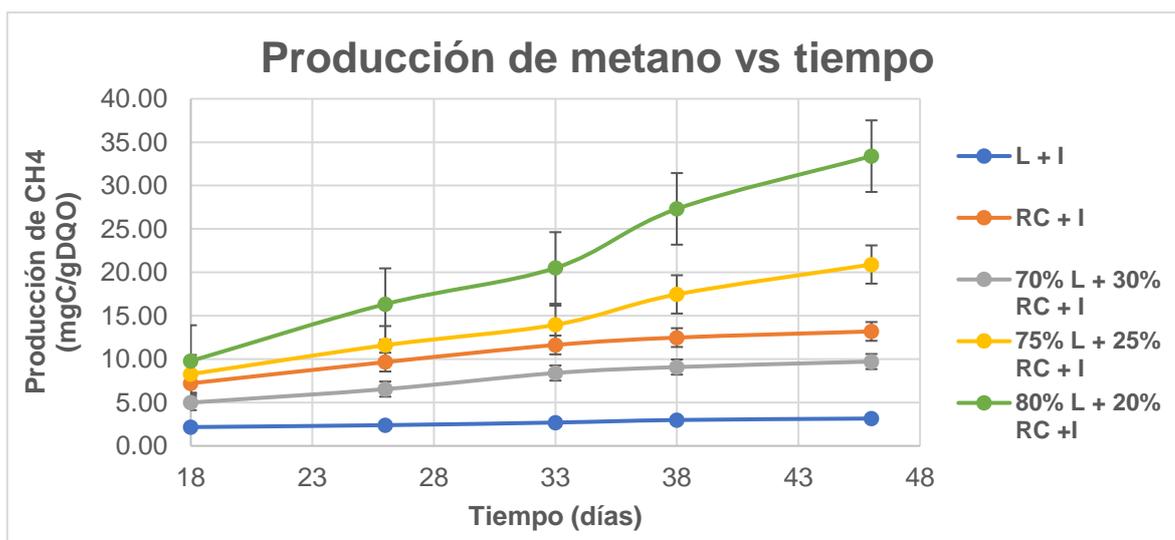


Figura 3.4. Producción de metano en el tiempo en los diferentes tratamientos.

Elaborado por: Errazuriz & Limones, (2022)

En la tabla 3.3, se observa la fracción promedio de metano obtenida a través del método volumétrico de desplazamiento a partir del día 18 hasta el día 46 en los distintos tratamientos empleados. Los resultados muestran que el tratamiento #6 es el que tiene la mayor fracción de metano, es decir, la adición del cosustrato alimenticio en menores concentraciones también favorece a la generación de biogás con mayor composición de metano. Además, se observa que la tendencia de la

fracción de metano en el biogás disminuye al tener una mayor concentración de cosustrato alimenticio con respecto al lodo, lo cual deriva a que no es favorable tener una concentración alta de RC para generar biogás con una fracción considerable de metano, ya que se desfavorece el proceso de metanogénesis en la digestión anaeróbica.

Tratamiento	Fracción de metano (%)
Lodo + Inóculo	18
RC + Inóculo	42
70% Lodo + RC + Inóculo	41
75% Lodo + RC + Inóculo	53
80% Lodo + RC + Inóculo	57

Tabla 3.3. Fracción de metano promedio obtenida por tratamiento

Elaborado por: Errazuriz & Limones, (2022)

Finalmente, la tabla 3.4 muestra los resultados de la validación de las mediciones de la fracción de metano. En la tabla se muestra la media, desviación estándar y el error de la media para cada uno de los tratamientos, además del error porcentual de cada una de las mediciones. Los resultados muestran que el error de medición oscila entre el 3 y 1% que pueden ser atribuidos al error de los instrumentos y error humano, pero que aun así no significa una gran desviación de los datos.

Tratamiento	Media (mL)	Desviación estándar (mL)	Error de la media (mL)	Error Porcentual (%)
Lodo + Inóculo	10.8	0.75	0.31	2.8
RC + Inóculo	18.7	0.82	0.33	1.8
70% Lodo + RC + Inóculo	29.8	0.98	0.40	1.3
75% Lodo + RC + Inóculo	31.7	0.52	0.21	0.7
80% Lodo + RC + Inóculo	35.3	0.82	0.33	0.9

Tabla 3.4. Validación de los resultados de la fracción de metano

Elaborado por: Errazuriz & Limones

3.4. Carbono inorgánico

En este punto, pasado los 46 días de experimentación, se abrió uno de los triplicados de cada tratamiento para la medición del carbono inorgánico. Con esto, se procedió a determinar la masa de carbono disuelta en la fase líquida en cada uno de los biorreactores, es decir, se obtuvo la masa de carbono presente en el biogás generado que se solubilizó en la fase líquida de cada tratamiento.

Los resultados obtenidos se representan en la tabla 3.5. De ellos, se aprecia como la concentración de CI es mayor en los tratamientos de codigestión que en los tratamientos de monodigestión, principalmente por la mayor producción de metano.

Tratamientos	TC (mg/L)	NPOC (mg/L)	C _{Cl} (mg/L)	C _{Cl, neto} (mg/L)
Blanco	200.5	141.0	59.5	0.0
Lodo + inóculo	471.3	100.8	370.5	311.0
RC + Inóculo	657.0	465.9	191.1	131.6
70%Lodo + 30%RC + Inóculo	2739.0	2298.0	441.0	381.5
75%Lodo + 25%RC + Inóculo	1987.0	1522.0	465.0	405.5
80%Lodo + 20%RC + Inóculo	2243.0	1751.8	491.2	431.7

Tabla 3.5. Resultados del carbono inorgánico disuelto

Elaborado por: Errazuriz & Limones

Una vez cuantificada la cantidad de carbono presente en la fase de gas y disuelto en la fase líquida, se procedió a estimar la cantidad total de carbono en el biogás. La tabla 3.6 muestra estos resultados donde se aprecia como la mayor parte del carbono generado se encuentra forma de gas, no obstante, una parte significativa del biogás se encuentra disuelto en la fase líquida, por lo que su medición es importante para una correcta estimación del total del biogás producido.

Tratamientos	m _g (mg)	m _l (mg)	m _T (mg)
Lodo + Inóculo	239.8	155.5	395.3
RC + Inóculo	650.2	65.8	716.0
70% Lodo + 30% RC + Inóculo	706.4	190.75	897.2
75% Lodo + 25% RC + Inóculo	1069.2	202.75	1272.0
80% Lodo + 20%RC +Inóculo	1345.7	215.85	1561.6

Tabla 3.6. Masa de carbono total en el biogás

Elaborado por: Errazuriz & Limones

3.5. Tasa de biodegradación

El fin de obtener la tasa de biodegradación de cada tratamiento es para verificar si la adición de un cosustrato alimenticio potencia la digestión anaeróbica. En la figura 3.5, se puede observar una comparativa de los porcentajes de las tasas de materia biodegradada en cada reactor durante un periodo de 46 días. Evidentemente, se observa que el uso de RC en los tratamientos beneficia la biodegradación de lodos, siendo el tratamiento #6 el que obtuvo la mayor tasa de biodegradación al final de la experimentación con una menor concentración de cosustrato alimenticio.

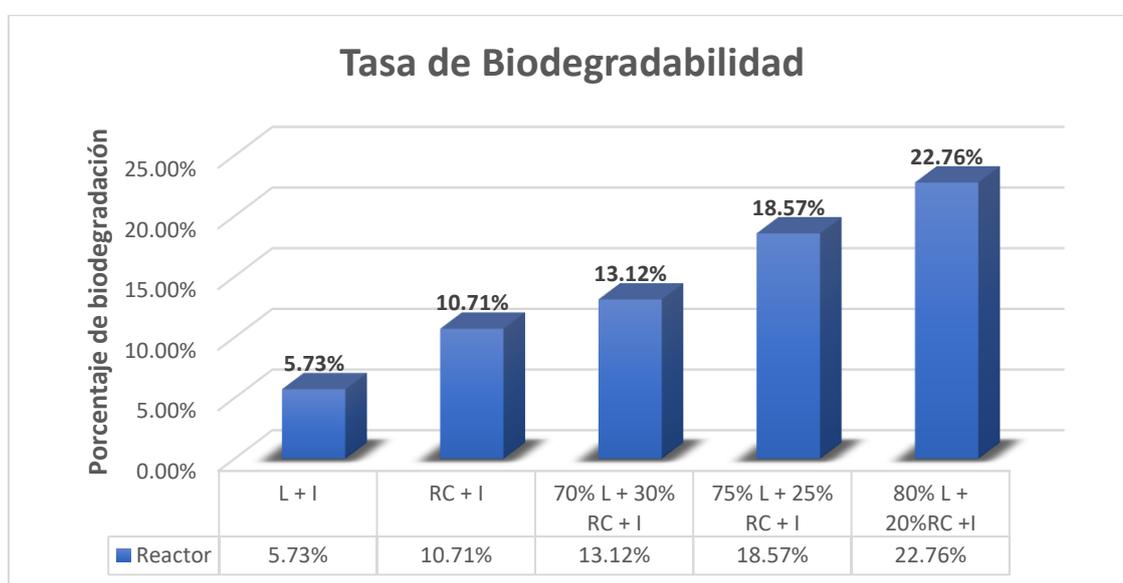


Figura 3.5. Tasa de biodegradación en los diferentes tratamientos a los 46 días de experimentación.

Elaborado por: Errazuriz & Limones, (2022)

Además, en la tabla 3.7 se representan los porcentajes en los que las tasas de biodegradación aumentaron gracias a la adición del cosustrato alimenticio en cada tratamiento. Se logra apreciar que el uso de cosustrato aumenta en gran medida la biodegradabilidad de los lodos en comparación con la monodigestión del lodo.

Tratamientos	Aumento Biodegradabilidad (%)
70% Lodo + RC + Inóculo	129
75% Lodo + RC + Inóculo	224
80% Lodo + RC + Inóculo	298

Tabla 3.7. Aumento de la tasa de biodegradación por uso del cosustrato alimenticio en cada tratamiento

Elaborado por: Errazuriz & Limones, (2022)

3.6 Escalamiento de los resultados a una PTAR y Biogás generado

En la tabla 3.8, se puede observar la cantidad de cosustrato alimenticio necesaria para tratar 1 tonelada de lodo de una PTAR. Un dato relevante es que para el tratamiento #6, se requiere de 92 kg de RC para tratar 1000 kg de lodo, siendo este tratamiento el que utiliza la menor concentración de cosustrato alimenticio adicionado. Además, también se observa una tendencia en la cual el biogás generado aumenta en función de una menor cantidad de RC requerida, tanto para el periodo de la experimentación de 46 días como para un periodo anual de tiempo.

Tratamientos	Masa de RC requerida (kg)	Biogás (tonC/ 46 días)	Biogás anual (tonC/año)
Lodo + Inóculo	0.0	0.13	1.89
70% Lodo + RC + Inóculo	157.8	0.43	6.25
75% Lodo + RC + Inóculo	122.7	0.60	8.80
80% Lodo + RC + Inóculo	92.0	0.70	10.15

Tabla 3.8. Masa de cosustrato alimenticio requerida para biodegradación y biogás generado por tratamiento.

Elaborado por: Errazuriz & Limones, (2022)

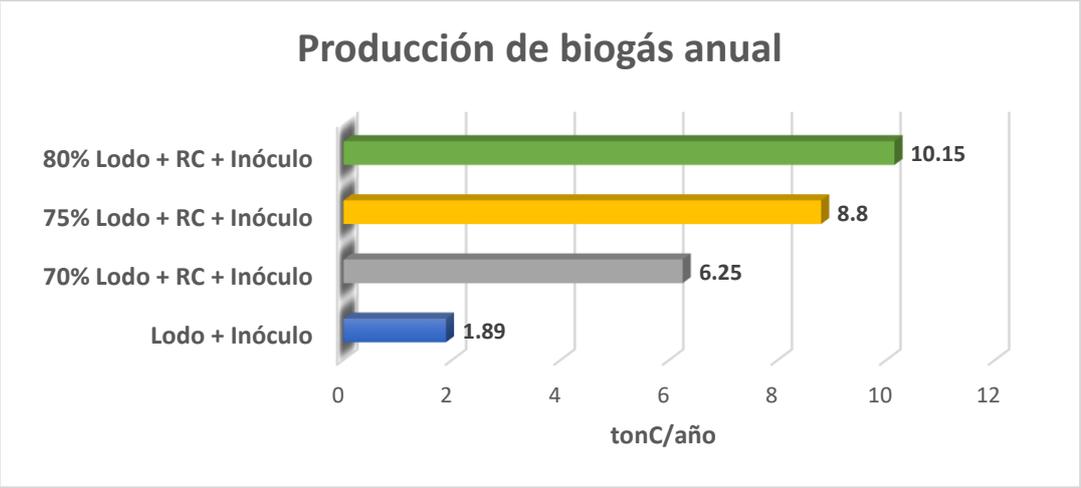


Figura 3.6. Producción anual de biogás a partir de 1 tonelada de lodo

Elaborado por: Errazuriz & Limones

Capítulo 4

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1. Conclusiones

- El estudio demostró que el uso de residuos de comida como cosustrato en procesos de digestión anaeróbica de lodos provenientes de una PTAR favorece la biodegradación de los mismos. Los tratamientos de codigestión mostraron generar la mayor cantidad de biogás e incrementar la presencia de metano en los reactores, en comparación con el tratamiento de monodigestión de lodos.
- La caracterización de los lodos provenientes de la PTAR indicó que la relación de C/N fue de 14.6, la cual es inferior a la relación recomendable para una óptima degradación de los lodos. Además, se encontró que la presencia de tensoactivos en los lodos es lo suficientemente baja como para no producir inhibición en la digestión.
- De los tratamientos de codigestión, el más destacable fue el compuesto por 80% lodo y 20% residuos de comida, el cual produjo la mayor cantidad de biogás y de metano al final de la experimentación. Este tratamiento logró generar 1561 mg C de biogás y 32.0 mgC/gDQO de metano en un periodo de 46 días. Además, mejoró la tasa de biodegradación de los lodos en un 298% en comparación con la monodigestión de los mismos.
- La cuantificación del metano producido en el biogás se logró gracias al método volumétrico por columnas de desplazamiento, el cual ayudó a determinar la fracción molar de metano. Los resultados mostraron que el biogás generado en los tratamientos de 75% lodo + 25% RC y 80% lodo + 20% RC, contenían entre un

50% a 60% de metano, lo que corresponde a una buena degradación de la materia orgánica en metano según se reporta en la literatura. Para los tratamientos de 70% lodo + 30% RC y sólo RC, la fracción de metano oscila entre el 40% y 50%. Mientras que, la monodigestión de los lodos apenas logró generar un 20% de metano. Esto indica que el uso de cosustratos no solo promueve la generación del biogás, sino que también favorece los procesos de metanogénesis para una mayor degradación de la materia orgánica.

- Se logró validar la metodología empleada en la medición de la fracción de metano, obteniendo un porcentaje de error en las mediciones que oscila entre el 3 y el 1%. Esta metodología no involucra el uso de un cromatógrafo de gases, lo cual permite que laboratorios que no cuenten con este equipo, puedan emplear el método volumétrico para las mediciones de metano en biogás.
- En base a una tonelada de lodo crudo, se estima que anualmente la producción de biogás en la monodigestión de los lodos es de 1.89 toneladas de carbono. Sin embargo, con la adición 92kg de RC, el biogás generado llega a ser 5 veces mayor, lo cual evidencia una mayor cantidad de biogás que puede ser aprovechada como fuente energía y una mejor biodegradación de la materia orgánica.

4.2. Recomendaciones

- Se recomienda ampliar el estudio con al menos 3 muestras de lodos tomadas en diferentes periodos de tiempo para reducir la variabilidad de los resultados producto de la aleatoriedad de la composición de los lodos en función del tiempo.
- Se recomienda utilizar el método de cromatografía de gases para la determinación de la fracción de metano en el biogás generado. De esta manera, se obtendría una mejor caracterización del biogás

y un mayor control de los gases producidos no deseados en la experimentación, tales como CO₂ Y H₂S.

- Aumentar a mínimo 100 días el proceso de digestión en los diferentes tratamientos para tener una visión más amplia la producción de biogás a lo largo del tiempo.
- Realizar más tratamientos con concentraciones de cosustrato menores al 20% ya que los resultados muestran que, a menores proporciones añadidas de residuos de comida, se produce mayor biogás con mayor concentración de metano. Esto ayudaría a encontrar la proporción óptima de lodo y cosustrato.
- Se recomienda extender el estudio a la caracterización de los residuos de comida, determinando su contenido de carbohidratos y proteínas además de su relación de C/N para identificar qué característica del cosustrato es la más óptima.
- Diseñar un estudio cinético de la dinámica del proceso de digestión en los lodos para tener puntos críticos de control sobre la producción de biogás y su composición. De esta manera, se lograría mantener el sistema estable ante perturbaciones.
- Adicionar al estudio análisis microbiológicos para verificar qué procesos predominan en la digestión anaeróbica. Con esto, se identificaría si los tratamientos empleados en los biorreactores favorecen la producción de biogás con altas concentraciones de metano.
- Se recomienda adicionar pruebas de potencial bioquímico de metano (PBM) con el fin de estimar el máximo rendimiento de la conversión de la materia orgánica en metano y compararlo con el resto de los tratamientos.

- Se sugiere analizar el uso de sensores de gases controlados por arduinos para el monitoreo de la concentración de metano en el biogás. Esto permitiría llevar un control más frecuente de la fracción de metano que existe en el tope de los reactores, además de evitar la necesidad de sacar una muestra del biogás para las mediciones respectivas.

Bibliografía

- Agra-Cadarso, M. J. (2015). *Interacciones entre productos tensoactivos y algunos microorganismos de lodo de río*. Madrid.
- Álvarez, J., Otero, L., & Lema, J. M. (2010). A methodology for optimising feed composition for anaerobic co-digestion of agro-industrial wastes. *Bioresource Technology*, 1.
- Anguisaca, M., & Chinchin, A. (2021). EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO ANAERÓBICO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS Y SU IMPACTO EN LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO A PARTIR DE ENSAYOS BIOLÓGICOS. Guayaquil, Ecuador: ESPOL.
- Arhoun, B. (2017). DIGESTIÓN Y CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS AGRÍCOLAS, GANADEROS Y LODOS DE DEPURADORA. 25-38. Málaga, España: Universidad de Málaga.
- Cardona, L., Levrard, C., Guenne, A., & Chapleur, O. (2019). Co-digestion of wastewater sludge: Choosing the optimal blend. *Waste Management*, 87, 772-781.
- De Baere, M. Devocht, P. Van Assche, & W. Verstraete. (1983). Influence of high influence of high NaCl and NH₄Cl salt levels on methanogenic associations. *Water Res*, 2-3.
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2010). *Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Dubber, D., & Gray, G. (2010). Replacement of chemical oxygen demand (COD) with total organic carbon (TOC) for monitoring wastewater treatment performance to minimize disposal of toxic analytical waste. *Journal of Environmental Science and Health*. doi:10.1080/10934529.2010.506116
- Eddy, M. &. (1996). *Ingeniería de aguas residuales* (Vol. I). McGraw-Hill.
- Fernández, J., Pérez, M., & Romero, L. (2008). Effect of substrate concentration on dry mesophilic anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). *BIORESOURCE TECHNOLOGY*, 1.
- INEN. (2014). *Normalizacion.gob*. Obtenido de https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_iso_11734.pdf

- Julio, I., Peláez, C., & Molina, F. (2016). Evaluación de la co-digestión anaerobia de lodos de aguas residuales municipales con residuos de alimentos. *Revista ION*, 63-70.
- Liu, C.-f., Xing-zhong Yuan, Guang-ming Zeng, Wen-wei Li, & Jing Li. (2007). Prediction of methane yield at optimum pH for anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *BIORESOURCE TECHNOLOGY*, 1.
- Loosdrecht, M., Halkjaer, P., Lopez-Vazquez, C., & Brdjanovic, D. (2016). *Experimental Methods in Wastewater Treatment*. IWA Publishing.
- López, R. (2014). *Utilización de biodigestores en el tratamiento de las aguas residuales domésticas, en la población del buijo histórico, Samborondón*. Guayas.
- Lorenzo, Y., & Obaya, M. C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar*, 35-48.
- Mata, J., Dosta, J., Romero, M. S., Fonoll, X., Peces, M., & Astals, S. (2014). A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010-2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 412-427.
- Metcalf, & Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización* (3 ed., Vol. III). México D.F.: McGraw-Hill.
- Ministerio del ambiente. (2017). Ley de Gestión Ambiental y del Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental. Obtenido de <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu112180.pdf>
- Rosales, M., & Villón, J. (2020). Desarrollo de una metodología para determinar la biodegradabilidad de películas de origen biológico y fósil, utilizando digestión anaerobia con alto contenido de sólidos aplicando la norma ASTM D5511-02. Guayaquil, Ecuador: ESPOL.
- Rumana, R. (2013). *Fundamentals of Wastewater Treatment and Engineering*. Boca Ratón: CRC Press.
- Terán, C., & Christian Cando. (2016). *Instituto Nacional de Estadísticas y Censo*. Obtenido de https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios_2016/Documento%20tecnico%20APA%202016.pdf

Apéndice

Apéndice 1

Resultados de la caracterización de los lodos por el laboratorio GQM

Aquí se muestran los resultados de la caracterización de los lodos de la PTAR realizado por el laboratorio GQM.



INFORME DE ENSAYOS

N° 86132-1



8613212012021000000 Ilima

LIMONES OBANDO ERICK MISAEI
Representante Legal: ---
Dirección: Samanes 6, Tel. 0962879878
Atención : Ing. Erick Limones

Guayaquil, 2021-12-10

DATOS DE LA MUESTRA

Punto e Identificación de la Muestra: Lodo de la planta de tratamiento de ciudadela Río Grande
Fecha/Hora Lugar de Toma de Muestra: 2021/12/01 / 09:50 / Vía a Samborondón
Fecha/Hora Recepción Muestras: 2021/12/01 / 12:11
Matriz de la muestra: Lodos

FISICOQUIMICOS

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES	U K=2	MÉTODO	ANALIZADO POR
Carbono (1)	15,03	%	---	5310 B	2021/12/09 SP

INORGANICOS NO METALES

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES	U K=2	MÉTODO	ANALIZADO POR
Nitrógeno (1)	10 258,03	mg/Kg	---	Interno	2021/12/07 DF

AGREGADOS ORGANICOS

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES	U K=2	MÉTODO	ANALIZADO POR
Tensoactivos-Detergentes (1)	2,800	mg/Kg	---	5540 C	2021/12/09 SP

SIMBOLOGÍA:

--- No. Aplica
<LD Menor al Límite Detectable
N.E. No efectuado
S.M. Standard Methods
U K=2 Incertidumbre Nivel de Confianza 95,45%

E.P.A. Environmental Protection Agency
P.E.E. Procedimiento específico de ensayo de GQM
G.R. Grados de Restricción
L.M.P. Límite Máximo Permisible
V.L.P. Valor Límite Permisible

V.M.R. Valor Máximo Referencial
C.C. Criterios de Calidad
V.M. Valor Máximo
V.M.P. Valor Máximo Permisible

NOMENCLATURA:

- (1) Parámetro NO INCLUIDO en el alcance de acreditación ISO 17025 por el SAE.
(2) Parámetro subcontratado NO ACREDITADO, competencia evaluada Cap. 5 Manual de Calidad de GQM
(3) Parámetro acreditado cuyo resultado está FUERA DEL ALCANCE de acreditación.
(4) Parámetro subcontratado ACREDITADO; ver alcance en www.acreditacion.gob.ec

Apéndice 2

Extracto de la norma ISO11734



Quito – Ecuador

**NORMA
TÉCNICA
ECUATORIANA**

NTE INEN-ISO 11734

Primera edición
2014-01

CALIDAD DEL AGUA. EVALUACIÓN DE LA BIODEGRADABILIDAD ANAEROBIA "FINAL" DE LOS COMPUESTOS ORGÁNICOS CON LODOS EN DIGESTIÓN. MÉTODO POR MEDIDA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGAS (ISO 11734:1995, IDT)

WATER QUALITY. EVALUATION OF THE "ULTIMATE" ANAEROBIC BIODEGRADABILITY OF ORGANIC COMPOUNDS IN DIGESTED SLUDGE. METHOD BY MEASUREMENT OF THE BIOGAS PRODUCTION (ISO 11734:1995, IDT)

Correspondencia:

Esta Norma Técnica Ecuatoriana es una traducción idéntica de la Norma Internacional ISO 11734:1995.

DESCRIPTORES: Agua, calidad, residuales, compuesto orgánico.
ICS: 13.060.40

20 Páginas

Prólogo nacional

Esta Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN-ISO 11734 es una traducción idéntica de la Norma Internacional ISO 11734:1995, "*Water quality. Evaluation of the "ultimate" anaerobic biodegradability of organic compounds in digested sludge. Method by measurement of the biogas production*", la fuente de la traducción es la norma adoptada por AENOR. El comité nacional responsable de esta Norma Técnica Ecuatoriana y de su adopción es el Comité Interno del INEN.

EXTRACTO

ADVERTENCIA – Los lodos procedentes de las aguas residuales pueden contener organismos potencialmente patógenos. Por tanto, es conveniente tomar las precauciones apropiadas en su manipulación. Los lodos en digestión producen gases inflamables que presentan riesgo de explosión e incendio. Es conveniente tomar precauciones en el transporte y almacenamiento de dichos lodos. Es conveniente manejar con precaución las sustancias químicas tóxicas y todas aquellas cuyas propiedades sean desconocidas. El medidor de presión y las microjeringas deben manejarse con precaución para evitar daños originados por las agujas. Las agujas contaminadas deben eliminarse de forma segura.

1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma internacional especifica un método general de selección para la evaluación de la biodegradabilidad de compuestos orgánicos a una concentración determinada por acción de microorganismos anaerobios. Las condiciones descritas en este ensayo no se corresponden necesariamente con las condiciones óptimas para que se produzca un valor máximo de biodegradación, ya que se utiliza un lodo diluido con una concentración relativamente alta de la sustancia química a ensayar. El ensayo permite una exposición del lodo a la sustancia química de hasta 60 d, período que es superior al tiempo normal de retención del lodo en los digestores anaerobios (de 25 d a 30 d), aunque los digestores de carácter industrial pueden tener tiempos de retención mayores.

El método es aplicable a los compuestos orgánicos, de contenido en carbono conocido y que sean:

- solubles en agua;
- poco solubles en agua, siempre que sea aplicable un método de dosificación exacta;
- sin efectos inhibidores frente a los microorganismos de ensayo a las concentraciones elegidas para el ensayo; los efectos inhibidores pueden determinarse mediante ensayos independientes o por un control suplementario de la inhibición.

Para sustancias volátiles, es necesario analizar caso a caso. Algunas pueden ensayarse si se manejan con cuidado, como por ejemplo evitando desprendimientos de gases.

2 NORMAS PARA CONSULTA

Las normas que a continuación se relacionan contienen disposiciones válidas para esta norma internacional. En el momento de la publicación las ediciones indicadas estaban en vigor. Toda norma está sujeta a revisión por lo que las partes que basen sus acuerdos en esta norma internacional deben estudiar la posibilidad de aplicar la edición más reciente de las normas indicadas a continuación. Los miembros de CEI y de ISO poseen el registro de las normas internacionales en vigor en cada momento.

ISO 10634:1995 – *Calidad del agua. Líneas directrices para la preparación y tratamiento de los compuestos orgánicos poco solubles en agua para la subsecuente evaluación de su biodegradabilidad en medio acuoso.*

ISO 11923¹⁾ – *Calidad del agua. Determinación de los sólidos en suspensión mediante filtración por filtro de fibra de vidrio.*

1) Pendiente de publicación

INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

Documento: NTE INEN-ISO 11734	TÍTULO: CALIDAD DEL AGUA. EVALUACIÓN DE LA BIODEGRADABILIDAD ANAEROBIA "FINAL" DE LOS COMPUESTOS ORGÁNICOS CON LODOS EN DIGESTIÓN. MÉTODO POR MEDIDA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGAS (ISO 11734:1995, IDT)	Código: ICS 13.060.40
--	--	---------------------------------

ORIGINAL: Fecha de iniciación del estudio: 2013-11-25	REVISIÓN: La Subsecretaría de la Calidad del Ministerio de Industrias y Productividad aprobó este proyecto de norma Oficialización con el Carácter de por Resolución No. publicado en el Registro Oficial No. Fecha de iniciación del estudio:
--	---

Fechas de consulta pública: 2013-11-27 al 2013-12-12

Comité Interno del INEN: Fecha de iniciación: 2013-12-13 Integrantes del Comité Interno:	Fecha de aprobación: 2013-12-13
---	--

NOMBRES:

Eco. Agustín Ortiz (Presidente)
Ing. José Luis Pérez
Ing. Paola Castillo
Ing. Tatiana Briones

Ing. Laura González
Ing. Bolívar Cano
Ing. Gonzalo Arteaga (Secretaría Técnica)

INSTITUCIÓN REPRESENTADA:

DIRECCION EJECUTIVA
COORDINACIÓN GENERAL TÉCNICO
DIRECCIÓN DE NORMALIZACIÓN
DIRECCIÓN DE VALIDACIÓN Y
CERTIFICACIÓN
DIRECCIÓN DE METROLOGÍA
DIRECCION DE REGLAMENTACIÓN
DIRECCIÓN DE NORMALIZACIÓN

Otros trámites: Compromiso Presidencial N° 20549 del 08 de junio del 2013, para el fortalecimiento de normas del Instituto Ecuatoriano de Normalización – INEN

La Subsecretaría de la Calidad del Ministerio de Industrias y Productividad aprobó este proyecto de norma

Oficializada como: Voluntaria Registro Oficial Suplemento No. 156 de 2014-01-07	Por Resolución No. 13527 de 2013-12-20
--	--