

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

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

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Nombre de la titulación
Ingeniero Químico

Presentado por:

Mónica Antonella Anguisaca Molina
Anthonela Salomé Chinchin Martínez

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

Este proyecto va dedicado principalmente a Dios, el Creador de todo lo que existe, el guiador de nuestra vida, aquel que nos encontró durante el peregrinaje de la vida universitaria y nos ha sostenido durante toda esta carrera. Él nos capacitó para llegar hasta aquí y proveyó todos los recursos, la fuerza, la esperanza y las personas precisas para que podamos culminar con éxito esta etapa. ¡Todo se lo debemos a Él!

Dedicamos también este proyecto a nuestros padres y hermanos que en innumerables ocasiones se sacrificaron de diversas maneras para que pudiéramos crecer y avanzar, sin lugar a duda sin su apoyo constante no pudiéramos estar hoy aquí.

Finalmente, a nuestros amigos y maestros quienes nos desafiaron a no rendirnos y a siempre trabajar con excelencia.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro más sincero agradecimiento a nuestra tutora, MSc. Francesca Escala por confiarnos este tema de proyecto, darnos un correcto seguimiento, y animarnos a perseverar; agradecemos de igual manera a nuestro cotutor, el PhD Luis Domínguez por su disposición a brindarnos su guía, sus valiosas ideas, por desafiarnos a ir más allá y a desarrollar un espíritu investigativo y experimental. Extendemos nuestra gratitud a la Ing. Andrea Rosado por el soporte que nos brindó durante todo el proceso de experimentación, su paciente y cautelosa supervisión fue fundamental para culminar con éxito este proyecto. Finalmente, agradecemos al Ing. Cristian Panta por su disposición a siempre colaborar con nosotras y darnos las facilidades para desarrollar este proyecto.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, me(nos) corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Mónica Antonella Anguisaca Molina* y *Anthonela Salomé Chinchin Martínez* 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"



**Mónica Antonella
Anguisaca Molina**



**Anthonela Salomé
Chinchin Martínez**

EVALUADORES

MSc. Nadia Flores

PROFESOR DE LA MATERIA



MSc. Francesca Escala

PROFESOR TUTOR

PhD. Luis Domínguez

PROFESOR COTUTOR

RESUMEN

En las plantas de tratamiento anaerobias la acumulación de lodos es un problema que afecta la eficiencia de los reactores. El uso de sustratos ricos en carbono permite mejorar el rendimiento de estos. El objetivo de este trabajo es evaluar la co-digestión anaerobia del lodo usando residuos de comida (RC) y excremento de cerdo (EC), durante 21 días para aumentar su tasa de biodegradación, además de medir el impacto del biogás como agente de efecto invernadero. Se construyeron 9 tipos de biorreactores anaerobios por triplicado, de entre ellos dos tipos de blanco, uno para determinar la tasa de biodegradación de los co-digestores y otro para el control de inhibición de los sustratos. La norma usada fue la ISO 11734 junto con la base estructural de Cardona et al. (2019) con una relación de gramos de lodo:sustrato de 75:25. Como resultado se encontró que los tratamientos con RC y EC lograron un incremento de 5.92% a 11.47% y 10.06% en la tasa de biodegradación del lodo, respectivamente. Con respecto al CH₄ y el CO₂, los principales componentes del biogás, se obtuvo que la PTAR es capaz de producir 13.90kg de gas al día, o bien 5 toneladas por año. Esto significa que a los 21 días del experimento no existe problemas de inhibición, y que el uso de RC potencializa la tasa de biodegradación de los lodos en un 85% bajo las condiciones estudiadas, siendo una posible solución a escala real, pero será necesario estudiar a profundidad el impacto del biogás.

Palabras Clave: co-digestión, biodegradación, lodos de digestión, digestión anaerobia, biogás

ABSTRACT

In anaerobic treatment plants, the accumulation of sludge is a problem that affects the efficiency of the reactors. The use of carbon-rich substrates improves their yield. The objective of this work is to evaluate the anaerobic co-digestion of the sludge using food residues (FW) and pig excrement (PE), for 21 days to increase its biodegradation rate, in addition to measuring the impact of biogas as an effect agent greenhouse. Nine types of anaerobic bioreactors were built in triplicate, including two types of blank, one to determine the biodegradation rate of the co-digesters and the other to control the inhibition of substrates. The standard used was ISO 11734 together with the structural basis of Cardona et al. (2019) with a ratio of grams of sludge:cosubstrate of 75:25. As a result, it was found that the FW and PE treatments achieved an increase of 5.92% to 11.47% and 10.06% in the biodegradation rate of the sludge, respectively. Regarding CH₄ and CO₂, the main components of biogas, it was found that the WWTP can produce 13.90kg of gas per day, or 5 tons per year. This means that at 21 days of the experiment there are no inhibition problems, and that the use of FW potentiates the biodegradation rate of the sludge by 85% under the conditions studied, being a possible solution on a real scale, but it will be necessary to study the impact of biogas.

KeyWords: *co-digestion, biodegradation, digestion sludge, anaerobic digestion, biogas*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Justificación del problema.....	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Marco teórico	4
1.4.1 Aguas Residuales	4
1.4.2 Aguas Residuales Domésticas.....	4
1.4.3 Métodos de tratamiento de agua.....	4
1.4.4 Digestión Anaerobia	5
1.4.5 Co-digestión Anaerobia.....	10
CAPÍTULO 2	13
2. METODOLOGÍA	13
2.1 Diseño Experimental.....	13
2.2 Lodo crudo.....	14

2.3	Sustratos.....	16
2.4	Inóculo.....	17
2.5	Medio de Ensayo.....	18
2.6	Reactivos.....	19
2.7	Sustancia de referencia.....	19
2.8	Métodos analíticos.....	20
2.8.1	Humedad.....	20
2.8.2	Demanda Química de Oxígeno.....	20
2.8.3	Carbono inorgánico.....	21
2.8.4	Carbono orgánico total.....	22
2.9	Desarrollo.....	22
2.9.1	Blanco.....	23
2.9.2	Co-digestores.....	23
2.9.3	Controles de inhibición.....	23
2.10	Mediciones.....	24
2.10.1	Gas.....	24
2.10.2	Carbono inorgánico final.....	24
2.10.3	Lodos.....	25
2.11	Carbono gaseoso total en el biogas.....	25
2.12	Tasa de biodegradación.....	25
CAPÍTULO 3.....	27	
3. RESULTADOS Y ANALISIS.....	27	
3.1	Caracterización del lodo de la PTAR.....	27
3.2	Presión.....	27
3.3	Carbono inorgánico.....	36
3.4	Masa total de carbono en el biogás.....	37

3.5	Tasa de biodegradación	38
3.6	Estimación de la cantidad de cosustratos requerida.....	41
3.7	Biogás producido	41
CAPÍTULO 4	43
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	43
	Conclusiones	43
	Recomendaciones	44
BIBLIOGRAFÍA	46
APÉNDICES	49

ABREVIATURAS

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

PTAR Planta de Tratamiento Anaerobia

RC Residuos de comida

EC Excremento de cerdo

SIMBOLOGÍA

mg	Miligramo
pH	Potencial de Hidrógeno
C/N	Relación de C/N
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de carbono
DQO	Demanda Química de Oxígeno
bar	Bares de presión
TOC	Carbono Orgánico Total
m _l	Masa de carbono en el líquido
m _h	Masa total de carbono en el biogás
m _v	Masa de carbono de la materia orgánica del biorreactor

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Etapas de la digestión anaerobia.....	6
Figura 2.1. Bioreactores anaerobios.....	14
Figura 2.2. Reactor anaeróbico de la PTAR.....	15
Figura 2.3. Recolección de lodos en la PTAR.....	15
Figura 2.4. Preparación de inóculo por centrifugación.....	17
Figura 2.5. Preparación del medio de ensayo.....	18
Figura 2.6. Desoxigenación del agua Tipo I.....	18
Figura 2.7. Determinación de humedad.....	20
Figura 2.8. Análisis de DQO.....	21
Figura 2.9. Analizador TOC.....	22
Figura 3.1. Curva P vs t del biorreactor 1.....	28
Figura 3.2. Curva P vs t del biorreactor 2.....	28
Figura 3.3. Curva P vs t del biorreactor 3.....	29
Figura 3.4. Curva P vs t del biorreactor 4.....	29
Figura 3.5. Curva P vs t del biorreactor 5.....	30
Figura 3.6. Curva P vs t del biorreactor 6.....	30
Figura 3.7. Curva P vs t de los biorreactores 1 – 6.....	31
Figura 3.8. Presión mínima esperada vs Presión obtenida en los co-digestores.....	33
Figura 3.9. Curva P vs t del biorreactor 7.....	34
Figura 3.10. Curva P vs t del biorreactor 8.....	34
Figura 3.11. Curva P vs t del biorreactor 9.....	35
Figura 3.12 Curva P vs t de los biorreactores 7 – 9.....	35
Figura 3.13 Masa de carbono en el biogás de cada reactor.....	38
Figura 3.14 Tasa de biodegradación de los biorreactores para control de inhibición.....	39
Figura 3.15 Tasa de biodegradación de los co-digestores.....	40
Figura 3.16 Toneladas de biogás producido.....	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Diseño de los 9 reactores (3 repeticiones por cada tratamiento)	14
Tabla 2.2. Parámetros de selección de sustratos.	16
Tabla 3.1 Caracterización del lodo de la PTAR.	27
Tabla 3.2. Presión de los co-digestores.	32
Tabla 3.3. Carbono Inorgánico de los co-digestores.....	36
Tabla 3.4 Masa de carbono en el espacio de cabeza y en el líquido del biorreactor.	37
Tabla 3.5 Masa de carbono orgánico total de los biorreactores.	38
Tabla 3.6 Tasa de biodegradación total de los biorreactores de inhibición.....	39
Tabla 3.7 Tasa de biodegradación total de los co-digestores.....	40
Tabla 3.8 Masa requerida de cosustratos para biodegradación.	41
Tabla 3.9 Toneladas de C en el biogas	41

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

Uno de los problemas más comunes en las plantas anaerobias de tratamiento de agua residual es la acumulación de lodos en el reactor debido a varios factores: disminución de la capacidad operativa por incremento poblacional de modo que recibe y debe tratar más caudal del permitido por diseño, la baja eficiencia de digestión de la materia orgánica debido a la baja relación C/N (Puig-Castellv´ et al., 2020), la presencia de compuestos que en concentraciones elevadas pueden causar inhibición del proceso de digestión anaerobia (Fernández Villagómez et al., 2002), la falta de conciencia ambiental de los moradores de la ciudadela puesto que envían al desagüe materiales que no deberían estar allí tales como: ropa, pañitos húmedos, toallas sanitarias, interiores, entre otros, los cuales no son biodegradables a este tipo de condiciones y, por último, la mala operación y falta de mantenimiento de la planta.

La planta anaerobia de tratamiento de agua residual ubicada en la parroquia La Puntilla actualmente presenta acumulación excesiva de lodos en su reactor de 3m de profundidad, los cuales llegan hasta el tope evitando de esa manera que haya un flujo adecuado. Esto provoca además estancamiento y que el proceso de tratamiento no se complete con normalidad, lo que finalmente se evidencia en la coloración oscura, y malos olores del efluente.

Esto es un problema en primer lugar para el operador de agua potable y saneamiento de Samborondón que está a cargo del mantenimiento de esta planta, debido a que la acumulación de los lodos les ha generado malestar que no ha podido resolverse por algunos años. En segundo lugar, es un problema para los habitantes de la ciudadela debido a que, si no se logra una solución adecuada, el exceso de lodos provocarán que existan reboses en el reactor desatando malos olores y contaminación que puede llegar a atraer vectores generadores de enfermedades. Además la producción de biogas resultado de la digestión anaerobia que se emite a la atmosfera puede significar un daño al medio ambiente, especialmente fomentando el efecto invernadero si las cantidades son lo

suficientemente significativas. Por último, es un problema para el cuerpo receptor donde se descarga el agua debido a que si no llegan a cumplirse las normativas regulatorias para el agua tratada se produce la contaminación de este.

El proyecto presenta restricciones de diseño pues se llevará a cabo en base a las características ya existentes de la planta, como son el tiempo de retención, caudal, forma y dimensiones del reactor; y restricciones económicas de parte del operador de agua potable y saneamiento de Samborondón, por lo cual se ha propuesto como solución el uso de co-sustratos (residuos orgánicos) que permitan llevar a cabo un adecuado proceso de co-digestión anaerobia, los cuales se encuentran cerca de la planta de tratamiento de agua residual doméstica, logrando que se reduzcan costos y tiempo de recolección y transporte.

Las variables de interés predominantes en este proyecto son el pH, la temperatura, la cantidad de carbono inorgánico (CI), la demanda química de oxígeno (DQO), la cantidad de carbono orgánico (CO), la relación carbono/nitrógeno (C/N) del lodo, y el porcentaje de humedad del lodo, del inóculo y de los co-sustratos, y la densidad del lodo, debido a que los resultados arrojados por cada uno de estos análisis permitirán conocer el estado de partida del experimento, saber si el proceso de co-digestión anaerobia se está llevando a cabo dentro de las condiciones requeridas, y determinar si existen variaciones drásticas que pudieran causar el pare de la experimentación.

1.2 Justificación del problema

La acumulación de lodos de las plantas de tratamiento anaerobio representa un serio problema que afecta directamente la eficiencia de la planta. Esto genera gastos en el mantenimiento y la necesidad de un retiro constante de estos lodos; además de producir olores y riesgos de salud. (Limón Macias, 2013)

A través de co-digestión anaeróbica es posible estabilizar la materia orgánica mediante la actividad de bacterias en contacto con el lodo en condiciones favorables para su crecimiento y reproducción (Vom Sperling & Chernicharo, 2005), haciendo uso de co-sustratos de diferente naturaleza y ricos en carbono que dependerán de la zona donde se localicen las plantas de tratamiento. En este caso, dada las características de la zona de Samborondón se plantea evaluar el uso de estiércol

de ganado que es una materia prima útil en el proceso microbiológico (Qingfang, Liyuan, Feng, Xiaofeng, & Tianfeng, 2021) y los residuos de poda y de comida (Chynoweth, Owens, & Legrand, 2001) como co-sustratos que permitan reducir el volumen de los lodos por biodegradación de la materia orgánica, lo cual podría mejorar la calidad del efluente de las plantas de tratamiento anaeróbicas a fin de contribuir con el cumplimiento de estándares ambientales.

El presente proyecto evaluará el potencial de digestión anaerobia de los lodos provenientes del sistema de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de la parroquia La Puntilla, realizando una co-digestión del lodo del reactor a nivel experimental, con dos tipos de sustratos a una proporción de 75:25 en mg de DQO buscando incrementar la producción de biogás que es el resultado de la digestión anaerobia (Limón Macias, 2013) y la reducción de lodos en la planta como resultado de un proceso más eficiente.

El proyecto podría determinar la cantidad de biogas total producida, además de mejorar la calidad del efluente de las plantas de tratamiento de aguas residuales bajo sistemas anaerobios que tengan condiciones similares presentes en las ciudades administradas por la empresa operadora de agua potable y saneamiento de Samborondón .

Se abre camino a la posibilidad de implementar la siguiente alternativa propuesta y su metodología en futuras investigaciones con similitud de condiciones.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar el sistema anaerobio de tratamiento de aguas residuales a partir de ensayos en biorreactores de co-digestión anaerobia para la medición de la tasa de biodegradación para la producción de biogás en un periodo de 21 días.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Caracterizar las muestras de lodo tomadas de la planta anaerobia de tratamiento de agua residual mediante ensayos de laboratorio.

2. Determinar la tasa de biodegradación de los lodos por medio de la cuantificación del contenido de carbono orgánico e inorgánico presente en el biogás producido dentro de los biorreactores de digestión anaerobia.
3. Plantear una propuesta de mejora al sistema actual de tratamiento de agua residual desde un enfoque biológico.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Aguas Residuales

Tipos de aguas cuyas propiedades físicas, químicas y/o biológicas han sido cambiadas debido a los usos que se les ha dado, como consecuencia la calidad de estas se ha visto afectada. En base a las fuentes de las sustancias que se han añadido al agua se encuentran (Riffat, 2013):

- Aguas residuales domésticas o municipales
- Aguas residuales industriales
- Aguas provenientes de infiltración y afluencia
- Aguas pluviales

1.4.2 Aguas Residuales Domésticas

Tipos de aguas provenientes de residencias, hospitales, restaurantes, escuelas, etc, de lugares donde se realizan las actividades diarias del ser humano (Ordoñez, 2017), que contiene desechos corporales, detergentes, productos químicos, microorganismos que pueden ser fuentes de diversas enfermedades. Debido a la gran parte del agua que termina convirtiéndose en agua residual su correcto tratamiento es de suma importancia. (Bani & Amoatey, 2011)

1.4.3 Métodos de tratamiento de agua

Dependiendo de la condición del agua a tratar, es decir de los contaminantes presentes, así como del nivel de remoción deseada se encuentran tres métodos, los cuales son (Economic and Social Commission for Western Asia, 2003):

- Físicos: flotación, trituración, sedimentación, filtración de medio granular, screening y ecualización de flujo.

- Químicos: adsorción, decoloración, precipitación química, desinfección y otros
- Biológicos: lodos activados, estabilización de estanques, filtros percoladores, digestión anaeróbica, laguna aireada y contactores biológicos rotativos.

1.4.4 Digestión Anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso de cultivo en suspensión para tratar el agua residual por vía anaerobia (en ausencia de oxígeno) (Muñoz Cruz, 2008). El proceso de digestión anaerobia se realiza en varias etapas. En la primera etapa, las bacterias hidrolíticas descomponen la materia orgánica compleja en fracciones mucho más pequeñas produciendo moléculas simples que son solubles en agua. En la segunda etapa, estas bacterias con la ayuda de las bacterias fermentativas (acidogénicas) transforman estas moléculas en productos intermediarios como: alcoholes, ácidos orgánicos de bajo peso molecular, ácidos grasos volátiles y ácido acético, hidrógeno molecular y dióxido de carbono. En la tercera etapa, las bacterias acetogénicas transforman los ácidos orgánicos y los alcoholes en ácido acético, hidrógeno molecular y dióxido de carbono. En la cuarta etapa, las arqueas metanogénicas (acetoclásticas e hidrogenotróficas) convertirán los últimos compuestos en metano y dióxido de carbono. Las primeras transforman el ácido acético en metano (responsables hasta un 70% de metano total obtenido) y dióxido de carbono, las segundas transforman el hidrógeno molecular junto al dióxido de carbono en metano (hasta un 30% de metano total obtenido). Existe, en ocasiones, una etapa en donde las bacterias sulfato-reductoras se encargarán de degradar las pequeñas cantidades de sulfato presentes en la materia orgánica, utilizando el hidrógeno molecular disponible para producir sulfuro de hidrógeno. Finalmente, se obtiene una mezcla gaseosa llamada biogás que contiene: metano (60 – 70%), dióxido de carbono (30 – 40%), y pequeñas cantidades de sulfuro de hidrógeno.

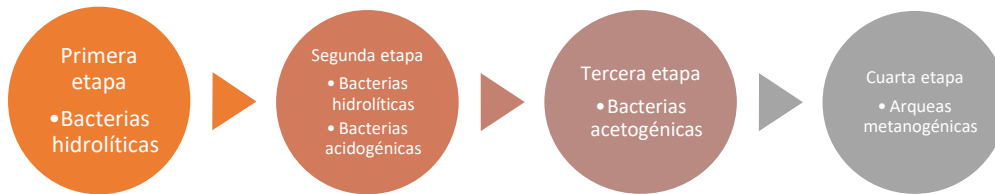


Figura 1.1. Etapas de la digestión anaerobia

Elaborado por: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

Se debe llevar un control del proceso debido a que si ocurre una variación drástica de pH las bacterias metanogénicas no realizarán su labor dando lugar a un fenómeno conocido como inhibición, que no solo sucede por variaciones de pH, sino también por cambios de temperatura, y por la presencia de sustancias tóxicas o inhibitorias (Acosta & Obaya Abreu, 2005).

1.4.4.1 Biogás

En la digestión anaerobia la materia orgánica es convertida en biogás, una mezcla gaseosa de metano, dióxido de carbono y otros compuestos en concentraciones pequeñas. En la *tabla 1.1* se muestra la composición estimada de cada uno de los componentes del biogás. Durante este proceso de digestión, más del 90% de la energía se transforma en metano (CH₄) dejando así solo un 10% de la energía total para ser usada por el crecimiento bacteriano (Varnero, 2011) Se ha demostrado que la producción de biogás a partir de excremento de ganado reduce las emisiones de efecto invernadero hasta un 50% cuando se le compara con la quema de combustibles fósiles, además de que facilita el manejo y la buena disposición de residuos orgánicos (Aguirre, Larson, & Reinemann, 2014).

Tabla 1.1 Composición del biogás

Componente	Fórmula	Porcentaje (%)
Metano	CH ₄	40 – 70
Dióxido de carbono	CO ₂	30 – 60
Hidrógeno	H ₂	0.1
Nitrógeno	N ₂	0.5
Monóxido de carbono	CO	0.1
Oxígeno	O ₂	0.1
Sulfuro de Hidrógeno	H ₂ S	0.1

Elaborado por: Blanco et al., 2011

Uno de los principales componentes del biogás es el metano, que en una composición mayor al 45% resulta inflamable (Varnero, 2011). Este es un compuesto que actualmente es aprovechado como fuente de energía renovable reemplazando la quema de residuos fósiles y generando ventajas económicas y ambientales. Puede ser recolectado y usado para aplicaciones de combustión directa, convertirlo a electricidad, o como combustible comprimido. La *tabla 1.2* presenta las principales propiedades de este biocombustible.

Tabla 1.2 Principales propiedades del metano

Contenido energético	6.0 - 6.5 kW-h/m ³
Equivalente de combustible	0.60 - 0.65 L petróleo/ m ³ biogás
Límite de explosión	6 – 12% de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 - 750°C (con la composición de CH ₄ mencionada)
Presión crítica	74 – 88 atm
Temperatura crítica	-82.5°C
Densidad normal	1.2 kg/ m ³
Olor	Huevo podrido
Masa molar	16.043 kg/kmol

Elaborado por: Deublein&Steinhauser, 2011

Si bien es cierto, la aplicación de la digestión anaerobia como tecnología para la producción de una fuente de energía renovable reduce la emisión de gases de efecto invernadero, esto no evita que el metano producido siga contribuyendo al calentamiento global del planeta. Se ha medido que este gas contribuye en un 20% al efecto invernadero proveniente de la actividad

humana. Como una medida del impacto del CH₄ como gas de efecto invernadero se le asigna un factor que indica su potencial de calentamiento global y se lo compara con el CO₂ que es el gas de referencia. En la *tabla 1.3* se muestra el potencial de calentamiento para diferentes gases. Para conocer el CO₂ equivalente de gases de efecto invernadero que produce el metano, se multiplica su potencial de calentamiento por su masa correspondiente (Varnero Teresa, 2011).

Tabla 1.3 Potencial de calentamiento global de diferentes gases terrestres

Gas	Potencial de calentamiento global
CO ₂	1
CH ₄	21
N ₂ O	310
SF ₄	23900
PFC	9200
HFC	11700

Elaborado por: CNE, 2006

1.4.4.2 Problemas comunes en el proceso de digestión anaerobia

1.4.4.2.1 Inhibición

Es el fenómeno en donde algunas sustancias producen un efecto tóxico en el proceso de digestión anaerobia lo que provoca una disminución en la actividad microbiológica para degradar la materia orgánica denotando una baja producción de biogás y un aumento de ácidos grasos volátiles, esto puede verse reflejado en una lectura de pH baja (menor a 7). La tasa de biodegradación natural de la materia orgánica se ve afectada por las sustancias inhibidoras, aunque este efecto depende directamente de la naturaleza y de la concentración de estas sustancias presentes en el proceso (Fernández Villagómez, et al., 2002). Dependiendo de la fuente de donde provengan las aguas residuales se tendrán diferentes sustancias potencialmente inhibitorias, en el caso de las aguas residuales domésticas están: el nitrógeno, amoníaco, sales minerales, desinfectantes (Ruiz López, 2014), los detergentes

(Parra Vega, 2019), los antibióticos, pesticidas (Acosta & Obaya Abreu, 2005), los vidrios y la mayoría de los plásticos (Muñoz Cruz, 2008). En estudios realizados en Cuba se encontró que al afluente de un agua residual industrial se agregó pequeñas trazas de níquel y cobalto, provenientes de un desecho industrial (que en grandes cantidades causarían inhibición) logrando que el reactor anaerobio tenga una eficiencia del 25 – 50% mayor, lo cual quiere decir que es mejor referirse a las concentraciones tóxicas para alguna sustancia o compuesto en particular, en vez de mencionar sustancias o compuestos inhibidores (Acosta & Obaya Abreu, 2005).

El agua residual doméstica contiene en su mayoría la presencia de detergentes proveniente de las aguas de lavado casero, el cual en cantidades elevadas es un potencial inhibidor. Los detergentes contienen entre sus principales ingredientes a los surfactantes o tensoactivos que son el principio activo de estos productos, además de agentes blanqueadores, perfumes, entre otros (Gonzalez Baena & Quijano Villegas, 2009). Estos productos pueden estar elaborados con base de alquilbenceno sulfatos de cadena ramificada (ABS) o con base de sulfonatos de alquilbenceno lineales (LAS), en cualquiera de los dos casos resulta difícil biodegradar debido a que los primeros tienen una cadena ramificada (que de por sí es compleja) además de que le ha sido añadido anillos de benceno a los átomos terciarios de carbono presentes en su estructura; y en el segundo caso, son biodegradables en condiciones aerobias pero presentan fuerte resistencia en condiciones de digestión anaerobia (Muñoz Cruz, 2008). De manera visual se puede conocer si se tiene una elevada concentración de detergente en el agua cuando existe la presencia de espuma en la superficie del reactor anaerobio (Gonzalez Baena & Quijano Villegas, 2009). Las concentraciones de surfactante

entre 22mg/L – 55 mg/L causan inhibición en el proceso de digestión anaerobia (Parra, R. (citado en Hassan&Nelson, 2012)).

1.4.4.2.2 Baja relación C/N

La baja relación carbono/nitrógeno es un serio problema en el tratamiento de aguas residuales por vía anaerobia puesto que conduce a bajas tasas de biodegradación de la materia orgánica provocando un bajo rendimiento de producción de biogás (Puig-Castellv', et al., 2020) que de forma visual se nota en la acumulación de lodos en el reactor anaerobio. Según (Vera, I.A (citado en Ruiz López, 2014) una relación C/N para lograr una óptima digestión se encuentra entre 20 - 30, aunque se ha notado que relaciones fuera del rango han generado resultados prometedores con una relación de 11: 14 debido a la adición de sustratos ricos en carbono, dando lugar a la llamada co-digestión anaerobia (Julio Guerrero et al., 2016).

1.4.5 Co-digestión Anaerobia

La co-digestión anaerobia no es otra cosa que el proceso de digestión anaerobia donde se adiciona co-sustratos ricos en carbono, los cuales se digieren simultáneamente junto al lodo del sedimentador, además de agregar un compuesto llamado inóculo. Esta es una buena opción a la hora de mejorar la eficiencia del digestor anaerobio pues al agregar la porción adecuada de material orgánico al lodo del reactor se aumenta la tasa de biodegradación de este, se incrementa la relación C/N, se alcanzan niveles favorables de alcalinidad, de humedad, entre otros (Julio Guerrero et al., 2016).

1.4.5.1 Inóculo

Es la comunidad de bacterias presentes en el lodo que se han adaptado al medio, mediante un proceso previo de digestión durante un tiempo de incubación a 35°C, a fin de usarlo en la co-

digestión anaerobia para incrementar la eficiencia de degradación de la materia orgánica presente.

1.4.5.2 Caracterización del lodo, co-sustratos e inóculo

Para la puesta en marcha del proceso de co-digestión anaerobia es necesario conocer las características más relevantes de los componentes del proceso, a fin de determinar las relaciones adecuadas entre ellos para una óptima digestión. Los parámetros necesarios para lograr dichas relaciones son: Demanda química de oxígeno (DQO), Carbono inorgánico (CI), Carbono orgánico (CO), y materia sólida total (MST).

1.4.5.3 Promotores/Estimuladores/Co-Sustratos

Son sustancias o compuestos que al ser agregados al lodo del agua residual elevan la tasa natural de degradación de la materia orgánica produciendo mayor cantidad de biogás. Entre los principales se tiene: enzimas, sales inorgánicas, urea, carbonato de calcio (Ruiz López, 2014), níquel, cobalto, molibdeno, selenio los cuales resultan estimulantes para las bacterias metanogénicas (Acosta & Obaya Abreu, 2005), lodos activados, restos de alimentos (Muñoz Cruz, 2008) y excremento de ganado (Sarabia Méndez, Laines Canepa, Sosa Olivier, & Escalante Espinoza, 2017). Cuando existe una buena relación C/N se obtiene una elevada tasa de digestión y por tanto una gran producción de biogás. (Puig-Castellv´, et al., 2020). He ahí que debe existir una relación óptima entre la materia orgánica a degradar y los principales nutrientes presentes en el proceso anaerobio. Como regla general se puede tomar la proporción de C: N: P aproximada a 100: 1.75: 0.25 en base a la demanda química de oxígeno (DQO). En ocasiones, este balance se puede obtener mezclando diferentes aguas residuales, o agregando de manera adecuada co-sustratos para enriquecer de carbono el sustrato original

(Acosta & Obaya Abreu, 2005). Según Francesc Puig-Castellv'. *et. al* (2020), una relación adecuada lodo/inóculo de 12g DQO/1.2g DQO permite una óptima digestión al agregar residuos de pescado y césped. Además, se ha encontrado diversas relaciones lodo/co-sustratos que aseguran el incremento de la tasa de biodegradación de los lodos, entre las cuales están 25/75 (lodo/residuos de pescado), 30:70 (lodo: residuos de alimentos con base en sólidos volátiles, SV).

En este proyecto se usarán los residuos de comida de una ciudadela ubicada en la parroquia La Puntilla y el excremento de ganado porcino proveniente de criadero de cerdos o granjas del sector Daule, pues al ser residuos orgánicos del sector permiten el aprovechamiento de recursos y la disminución de costos de recolección, compra y transporte de materia prima.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

En el presente capítulo se detalla los métodos y materiales usados para la preparación de la materia prima, el montaje experimental de la co-digestión en el laboratorio y las técnicas de análisis aplicadas a los lodos de PTAR, inóculo y co-sustratos. Además de los cálculos para la determinación de carbono del biogas producido en el periodo de incubación.

2.1 Diseño Experimental

La metodología aplicada fue de carácter teórico y experimental. Se planteó la construcción de bioreactores anaeróbicos por lote tomando como base la estructura experimental según Cardona et al. (2019) y la Norma Internacional Estandar ISO 11734, cuyo fin era obtener la tasa de biodegradación de los lodos de la PTAR. Dadas las limitaciones de la norma INEN que solo determinan la tasa de biodegradación de sustancias tales como compuestos orgánicos, fue necesario adaptar la metodología para lodos de plantas residuales junto con sustratos con una publicación internacional .

Los reactores por lote anaeróbicos fueron construidos en base al método propuesto en Cardona et al. (2019), con un total de 9 tratamientos que se realizaron por triplicado, dando así 27 reactores anaerobios donde fueron usadas botellas de vidrio de capacidad de 1L y que podían soportar una presión máxima de 2 bar. Las botellas se llenaron como se muestra en la Tabla 2.1 completando el espacio de trabajo de 500 mL con el medio de ensayo, posteriormente se reguló su pH y se hizo pasar una corriente de nitrógeno para remover el oxígeno en el espacio de cabeza y finalmente fueron sellados cada recipiente con el tapón de caucho de manera que el gas no se escape Foto 2.1., para mantener las condiciones anaeróbicas, se procedió a asegurar con un cabo y papel aluminio sobre el corcho.



Figura 2.1. Bioreactores anaerobios

Fuente: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

Tabla 2.1. Diseño de los 9 reactores (3 repeticiones por cada tratamiento)

n° reactor	Reactor	Inóculo lavado (g)	Lodo crudo (g)	Vol lodo crudo (ml)	RC húmedo (g)	EC húmedo (g)
1	Blanco (inóculo solo)	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	Lodo + Inóculo	20.0	369.7	351.8	0.0	0.0
3	RC + Inóculo	20.0	0.0	0.0	50.3	0.0
4	EC + Inóculo	20.0	0.0	0.0	0.0	62.0
5	Lodo + RC + Inóculo	20.0	277.3	263.8	12.6	0.0
6	Lodo + EC + Inóculo	20.0	277.3	263.8	0.0	15.5
7	Benzoato + Lodo + Inóculo	20.0	369.7	351.8	0.0	0.0
8	Benzoato + Lodo + RC + Inóculo	20.0	277.3	263.8	12.6	0.0
9	Benzoato + Lodo + EC + Inóculo	20.0	277.3	263.8	0.0	15.5

Elaborado por: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

2.2 Lodo crudo

Los lodos usados en el proceso experimental provinieron de la PTAR de una ciudadela en la parroquia satelital de La Puntilla, la misma que cuenta con dos reactores anaeróbicos paralelos de donde se obtuvieron las muestras. Los lodos

fueron recolectados en una caneca plástica de 20 litros, en donde se recolectó solo la mitad, es decir 10 litros, que se mantuvo a temperatura ambiente, siendo usada una fracción para preparar el inóculo, otra para determinar humedad, tensoactivos, %C, %N y otra fracción se usó en el ensamblaje de los reactores. A la vez se recolectó una muestra por separado en un recipiente de plástico que fue llevado en hielo para mantenerlo a una temperatura entre 1-5 °C (Lopez., et al, 2016) hasta el laboratorio para la prueba de DQO (André, Paus, & Ribeiro, 2017).



Figura 2.2. Reactor anaeróbico de la PTAR

Fuente: Anguisaca M, Chinchin A, 2021



Figura 2.3. Recolección de lodos en la PTAR

Fuente: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

2.3 Sustratos

Existe una amplia variedad de residuos que pueden servir como co-sustratos para mejorar la digestión anaeróbica como son los desechos de matadero, residuos de comida, pulpa de papel, desperdicios de grasa, césped de jardín, entre otros según se cita en Cardona et al. (2019).

Para el presente trabajo se escogieron dos sustratos para analizar el porcentaje de biodegradabilidad de los mismos junto con el tipo de lodo de la PTAR. Se consideraron algunos parámetros para seleccionar entre las distintas opciones en base a investigaciones previas (Muñoz Cruz, 2008, Sarabia Méndez et al., 2017), recursos disponibles en la zona en cantidades requeridas y factibilidad de recolección para el muestreo y experimento como se observa en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Parámetros de selección de sustratos.

Sustratos	Investigaciones previas	Disponibilidad cerca del área	Facilidades para el muestreo y experimento
Cascarilla de arroz	x		
Césped de jardín sin plaguicidas	x	x	
Residuos de comida	x	x	x
Estiercol de caballo	x	x	
Estiercol de cerdo	x		x
Residuos de pescado	x		

Elaborado por: **Anguisaca M, Chinchin A, 2021**

En base a los parámetros propuestos se determinó que los residuos de comida y el estiercol de cerdo eran las mejores opciones dada su factibilidad de recolección y los resultados positivos en otras investigaciones.

Los residuos de comida fueron recolectados de un restaurante en la ciudad de Guayaquil y el estiercol de cerdo fresco de un criadero de cerdos en el Cantón de la Troncal. Ambos a su vez fueron triturados y almacenados en refrigeración en envases de plástico descartable por 48 horas hasta tomar muestras de ambos para

su caracterización y luego de dos días nuevamente, para la experimentación según Cardona et al. (2019).

2.4 Inóculo.

El inóculo utilizado fue un lodo en digestión de la PTAR de la parroquia La Puntilla (Figura 2.3). Para preparar el inóculo se consideró como referencia la Norma ISO 11734 con algunos cambios, se tomó una fracción del lodo crudo para llenar tres botellas de Polipropileno (PP) de 500 cm³ hasta 1 cm del borde superior y que fueron cerradas herméticamente, sin ajustar de forma exagerada. Fueron transportadas las muestras al laboratorio a temperatura ambiente donde se liberó el gas antes de colocarlas en una incubadora (MEMMERT, INB-400, Büchenbach, Alemania) a 35°C ± 2°C durante 5 a 7 días. Después de este tiempo el lodo de digestión se lavó con el medio de ensayo para poder tener una concentración de Carbono Inorgánico (CI) hasta un valor inferior a 10 mg/L. Se realizó un conjunto de lavadas usando una centrifuga (HETTICH, Rotofiz 32 A, Kirchleugern, Alemania) que trabajo a 30 rpm por 5 minutos (Figura 2.4), donde las aguas después de cada lavado se analizaron y después se descartaron hasta conseguir el valor esperado, todo esto teniendo un mínimo contacto con el oxígeno, como se recomienda. Finalmente, el inóculo lavado se almacenó en la incubadora a 35°C ± 2°C hasta su análisis y uso en el experimento.

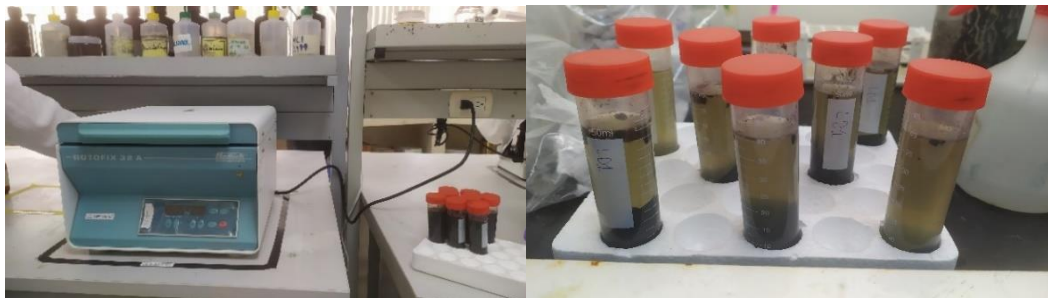


Figura 2.4. Preparación de inóculo por centrifugación.

Fuente: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

2.5 Medio de Ensayo

El medio de ensayo fue seguido según la Norma ISO 11734.



Figura 2.5. Preparación del medio de ensayo.

Fuente: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

Para la preparación del agua libre de oxígeno se tomó agua tipo I de un purificador (LABCONCO, 9015020, Kansas, USA) y se armó un sistema donde se colocó en envases cerrados y adaptados a una bomba al vacío (WELCH, 2534B-01) con una calentado/agitador que trabajo a 10 minutos y 60 rpm (Thermo Fisher Scientific Inc., P131325Q, Waltham, MA, USA) Figura 2.6, después de este tiempo el agua desoxigenada fue colocada en un balón volumétrico de 1000 ± 0.4 mL de capacidad para preparar el medio.



Figura 2.6. Desoxigenación del agua Tipo I.

Fuente: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

Los reactivos a excepción del sulfuro de sodio noahidratado (pesado antes de incluirlo al medio) fueron pesados en proporciones de entre 1 a 2 litros usando una balanza analítica (SARTORIUS, ENTRIS II, Gotinga, Alemania) para ser colocados en el balón volumétrico junto con el agua desoxigenada para mezclarlos y nuevamente colocado el medio de ensayo en los envases de autoclave de 1 L, luego se colocó el sodio noahidratado. Por último, se midió su pH y oxígeno disuelto (HACH, HQ40D, Iowa, USA) para ajustarlo aumentando un ácido o base y pasando nitrógeno para eliminar el oxígeno.

2.6 Reactivos

Dihidrógeno fosfato de potasio anhidro (KH_2PO_4) y monohidrógeno fosfato de sodio dodecahidrato ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) se adquirieron de MERCK (Darmstadt, Alemania). Cloruro de magnesio hexahidrato ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) y cloruro de amonio (NH_4Cl) se obtuvieron de J.T.Baker Inc. (Phillipsburg, New Jersey, USA). El cloruro de hierro (II) tetrahidrato ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) y la resazurina de Thermo Fisher Scientific (Fan Lan, New Jersey, USA). Cloruro de calcio dihidrato ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) de Panreac Química Saude. Sulfuro de sodio noahidrato ($\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) de Sigma-Aldrich (San Luis, Misuri, USA). Todos usados para preparar el medio de ensayo según la Norma ISO 11734, donde la resazurina fue el indicador de oxígeno al cambiar de color a rosado cuando no está en condiciones anaerobias el medio.

También fueron usados soluciones de ácido sulfúrico a 0,1 N e hidróxido de sodio 0,1 N con el fin de regular el pH en el medio de ensayo y los reactores anaerobios al prepararlos.

2.7 Sustancia de referencia

Se tomó el benzoato de sodio como opción propuesta por la Norma, fue preparado 1 L de esta sustancia como solución stock usando agua desoxigenada y aproximadamente 0,2 gramos de la sal para cumplir que la concentración sea 100 mg/L de carbono orgánico.

2.8 Métodos analíticos

Para la puesta en marcha de los reactores fueron medidos ciertos parámetros fisicoquímicos que se usaron para armar el dispositivo experimental.

2.8.1 Humedad

Para determinar la humedad del lodo, inóculo lavado, residuos de comida y estiércol de cerdo, se tomaron muestras por triplicado de cada sólido, que se pesaron y registraron sus valores. Después se secaron a $50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y 24 horas en un horno (MEMMERT, SNB-400, Büchenbach, Alemania) para retirar el agua, fueron pesados nuevamente y se calculó la humedad de los sólidos (2.1). Estas muestras a continuación fueron usadas para determinar el DQO.



Figura 2.7. Determinación de humedad.

Fuente: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

$$\% \text{ humedad (\%)} = \frac{(A - B) * 100}{A} \quad (2.1)$$

A = Masa de sólido húmedo

B = Masa de sólido seco

2.8.2 Demanda Química de Oxígeno

La demanda química de oxígeno para sólidos se determinó a muestras del inóculo seco, lodo seco, residuos de comida y estiércol de cerdo siguiendo la metodología señalada en André et al. (2017) con el kit de Hach (8000 TNTplus HR) para un rango de 20-1500 mg/L. Se lo realizó en primera

instancia con los soportes recomendados en la metodología usando una pipeta de polipropileno que fue cortada en pedazos más pequeños de aproximadamente 5 mm de largo pero debido a los valores tan altos provenientes del soporte y ya que su uso principal era la transferencia cuantitativamente de una masa tan baja André et al. (2017) se realizó nuevamente el análisis ya sin los soportes dentro de los tubos de ensayo, pero que si fueron usados para pesar las cantidades tan pequeñas en el DQO.

Para el análisis se tomaron las muestras de los sólidos secos por triplicado después de calcular la humedad estas fueron homogenizadas al ser trituradas. Fueron pesados los sólidos entre 1-3 mg aproximadamente tratando de tomar valores similares para cada tipo de sólido de manera que exista mayor precisión. Seguidamente se colocaron en los viales para DQO del kit y se siguió con los pasos propuestos para muestras de agua usando un reactor digital y el espectrofotómetro (HACH, DR 3900, Iowa, USA) del laboratorio de investigación de Ecosistemas Acuáticos de ESPOL.



Figura 2.8. Análisis de DQO

Fuente: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

2.8.3 Carbono inorgánico

Para determinar el carbono inorgánico en el inóculo se realizaron pruebas en un analizador de TOC (SHIMADZU, TOC-VCSN, Kioto, Japón) tomando una alícuota de aproximadamente 25 mL en tubos de ensayo de cada

lavada después de la centrifugación, esto sirvió como referencia para representar el valor de toda la muestra. El valor fue obtenido de la diferencia entre el carbono total y el carbono orgánico.



Figura 2.9. Analizador TOC

Fuente: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

2.8.4 Carbono orgánico total

Para la determinación del carbono total de las muestras sólidas como fueron lodo, residuos de comida y estiércol de ganado se realizó de manera indirecta en base a la fórmula de reemplazo genérica de DQO que relaciona la DQO y COT (Dubber & Gray, 2010).

$$DQO = 49.2 + 3.00 * COT \quad (2.2)$$

2.9 Desarrollo

A continuación, se detalla el procedimiento seguido para llenar los reactores de cada tratamiento, donde se siguió el método propuesto en Cardona et al. (2019) con una base de cálculo de la cantidad de inóculo constante en todos los reactores. Para registrar de manera más precisa los valores a tomar se usó la hoja de cálculo de Excel,

2.9.1 Blanco

Cada biorreactor se llenó con 20 gramos del inóculo húmedo que se obtiene al final de las lavadas y el medio de ensayo. (Reactor 1)

2.9.2 Co-digestores

Se prepararon 5 digestores por triplicado dando un total de 15 bioreactores de digestión con un volumen de trabajo de 500 mL cumpliendo así que el V_l (volumen del líquido) y V_h (Volumen del espacio de cabeza) sean iguales. Cada digestor fue inoculado con el lodo de digestión preparado.

- a) Para el primer tratamiento de co-digestión se alimentó con lodo crudo solamente. (Reactor 2)
- b) El segundo y tercer tratamiento sigue una relación de 12/1.2 de gDQO de co-sustrato/ gDQO del inóculo sin lodo, según Cardona et al. (2019). (Reactor 3 y 4)
- c) En el cuarto y quinto tratamiento cada digestor fue alimentado con una mezcla de lodo principal y un co-sustrato, ya sea excremento de cerdo o residuos de comida en una relación co-sustrato/inóculo de 12 gDQO/1,2 gDQO lo mismo que el anterior digestor, pero también con una relación entre el lodo principal y co-sustrato de 75 gDQO/25 gDQO. (Reactor 5 y 6)

2.9.3 Controles de inhibición

Se realizaron dos controles de inhibición del proceso de digestión, uno por cada sustrato usando la sustancia de referencia. A todas las botellas se les colocó 25 mL de la sustancia de referencia a fin de tener menos del 5% del volumen de la solución de reacción a la botella donde se realizó el proceso de digestión.

a) Blanco de control de inhibición (Reactor 7)

Se agregó el lodo principal crudo, la sustancia de referencia y luego se añadió el medio de ensayo hasta completar los 500ml de volumen de trabajo.

b) Control de inhibición para el lodo principal y co-sustratos (Reactor 8 y 9)

Se agregó el lodo principal, los co-sustratos ya sea residuos de comida o excremento de cerdo en proporciones iguales a los co-digestores y la sustancia de referencia.

Todos los reactores batch anaerobios se incubaron a $35\pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 1 h en la oscuridad para que alcancen el equilibrio, siendo después agitados y medidos sus presiones a fin de liberar el exceso de gas y dejar el manómetro en cero. También fue necesario esperar 24 horas para descartar los recipientes que tenga el color rosado por presencia de oxígeno, en este caso ningún biodigestor presento esta tonalidad en el volumen de trabajo.

2.10 Mediciones

2.10.1 Gas

Se agitó cada reactor antes de ser medida la presión del gas con un manómetro (WEKSLER, BY12YPJ4LW, Stratford, USA) con un rango de 0 a 2 bar se procuró hacerlo de manera rápida para que la temperatura no varíe demasiado. A la vez se dejó escapar el gas de las botellas con altas presiones por el rango de presión del manómetro. Las mediciones fueron hechas dos veces cada semana y al final de la prueba, siguiendo las precauciones mencionadas en la norma.

2.10.2 Carbono inorgánico final

En los tratamientos que fue posible se tomaron muestras del sobrenadante sin centrifugar y se realizó su análisis en el analizador TOC, obteniendo así 9 lecturas.

2.10.3 Lodos

Los parámetros como %C, %N y tensoactivos de los lodos fueron realizados en un laboratorio externo, debido a que no fue posible realizarlas en el laboratorio de ESPOL. (Apéndice A)

2.11 Carbono gaseoso total en el biogas

Los cálculos fueron realizados según la norma ISO 11734 para el espacio de cabeza (2.2) y para el líquido (2.3) cuya suma dio el carbono gaseoso total (2.5)

$$m_h = \frac{12000 \cdot 0.1 \cdot \Delta p \cdot v_h}{RT} \quad (2.3)$$

donde,

m_h = masa de carbono neto producido como gas en el espacio de cabeza (mg);
 Δp = media de la diferencia entre las presiones inicial y final en los recipientes de prueba menos la media correspondiente en los vasos en blanco (milibares);
 V_h = volumen de espacio de cabeza en el recipiente (L);
0.1 = conversión para ambos N/m² a milibares y m³ a litros.

$$m_l = \rho_{CI,neto} * V_l \quad (2.4)$$

Siendo:

m_l = masa de carbono, en miligramos, del líquido;
 $\rho_{CI,neto}$ = concentración de carbono inorgánico en los recipientes de ensayo menos la de los recipientes de control al final del ensayo (mg / L);
 V_l = volumen del líquido en el recipiente.

$$m_t = m_l + m_h \quad (2.5)$$

2.12 Tasa de biodegradación

La tasa de biodegradación total se calculó usando la ecuación:

$$D_t = \frac{m_t}{m_v} * 100 \quad (2.6)$$

Donde:

D_t = tasa de biodegradación total (%);

m_t = masa total de carbono en el biogás (mg);

m_v = masa de carbono de la materia orgánica del biorreactor (mg).

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANALISIS

3.1 Caracterización del lodo de la PTAR

Siendo el lodo uno de los componentes de mayor interés para el estudio de este proyecto, se realizó la caracterización de este a fin de conocer los parámetros que mayor impacto causarían en los resultados obtenidos. En la *tabla 3.1* se registran los resultados más significativos de esta caracterización; uno de los datos más relevantes es la relación C/N que para este caso de estudio dicha relación es de 2, un valor bastante pequeño según lo recomendado en la literatura por (Vera, I.A (citado en Ruiz López, 2014)), lo que finalmente se evidenció en una tasa de biodegradación muy baja. Por otro lado, la presencia de tensoactivos (el principal compuesto de los detergentes) en el lodo de la PTAR con un valor de 4.01 mg/L se encuentra muy por debajo de las concentraciones encontradas en la literatura que provocan la inhibición del proceso de digestión anaerobia.

Tabla 3.1 Caracterización del lodo de la PTAR.

Resultados análisis Lodo PTAR				
% Carbono	3.40	%	C/N	2.00
% Nitrógeno	1.70	%		
Tensoactivos	3.82	mg/kg	4.01	mg/L
DQO	456.7	mg/L		
Densidad	1.05	g/ml		
% Humedad	88.28	%		

Elaborado por: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

3.2 Presión

Como parte del procedimiento para determinar la tasa de biodegradación de cada biorreactor se procedió a medir la presión manométrica de cada uno de 27 reactores a través de los 21 días, en las *figuras 3.1 a 3.6* se muestran las curvas de P vs t (presión versus tiempo) para cada tratamiento, mientras que en la *figura 3.7* se

observa una gráfica comparativa de la presión del gas de todos los biorreactores en función del tiempo. En estas seis primeras gráficas se tuvo una sola curva para cada tratamiento, aunque se sembró por triplicado, esto debido a que biorreactores fueron descartados por posibles fugas, esto atribuyéndose a el uso de un tipo de corcho diferente en ciertos bioreactores y solo un reactor por tratamiento proveyó lecturas de presión coherentes en el manómetro.

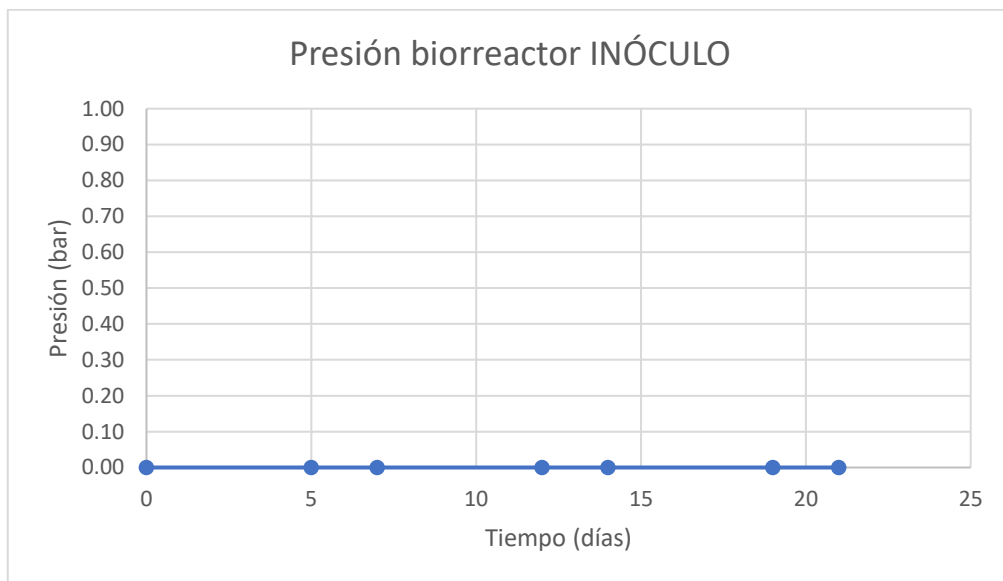


Figura 3.1. Curva P vs t del biorreactor 1

Elaborado por: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

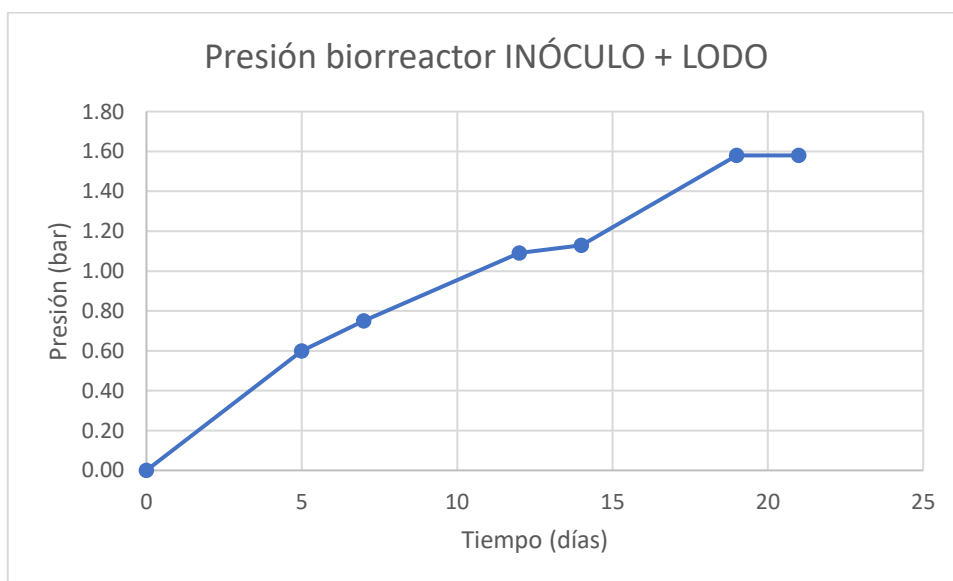


Figura 3.2. Curva P vs t del biorreactor 2.

Elaborado por: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

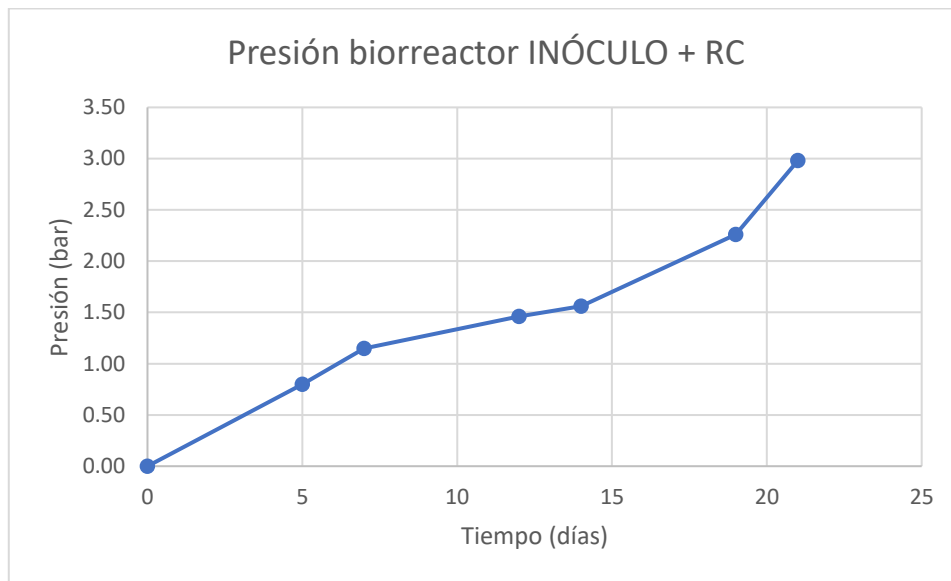


Figura 3.3. Curva P vs t del biorreactor 3

Elaborado por: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

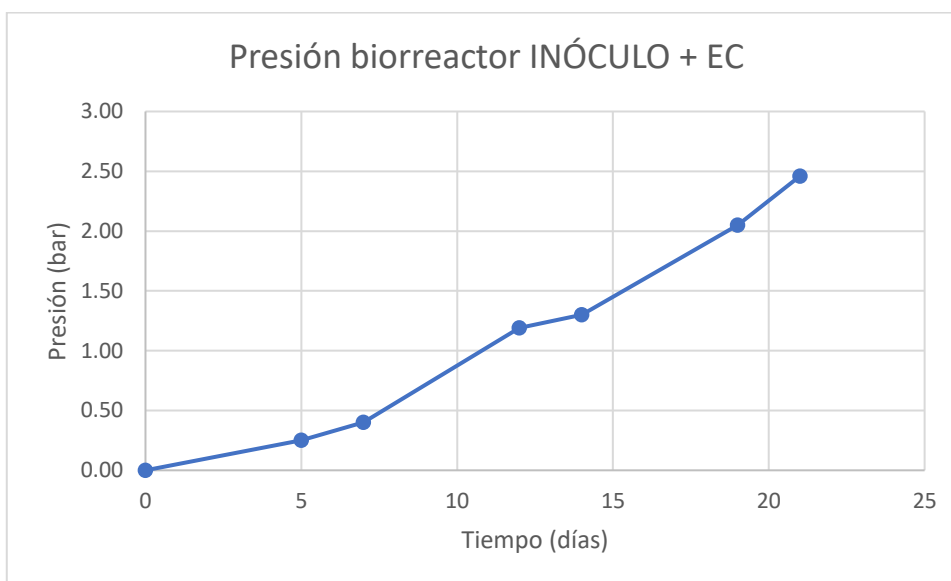


Figura 3.4. Curva P vs t del biorreactor 4

Elaborado por: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

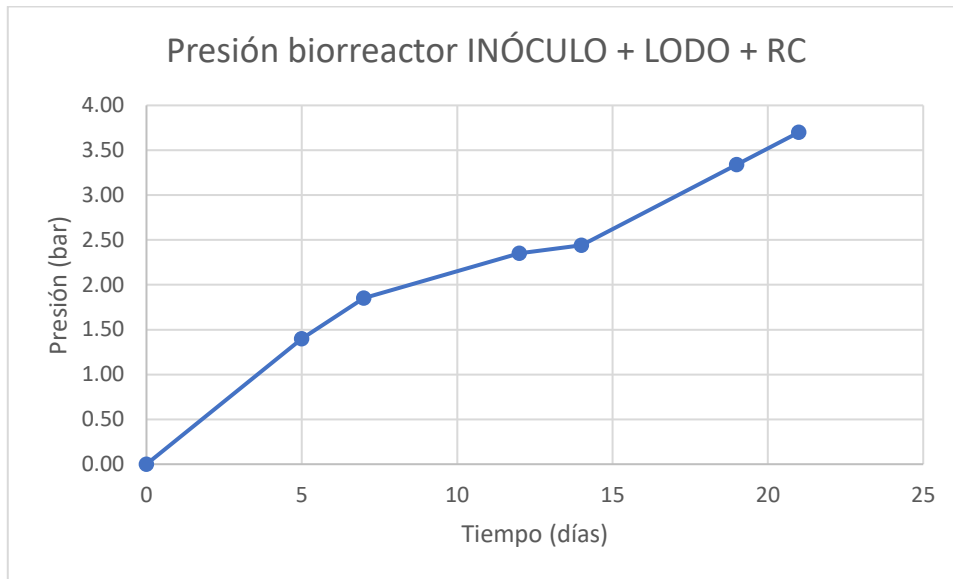


Figura 3.5. Curva P vs t del biorreactor 5.

Elaborado por: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

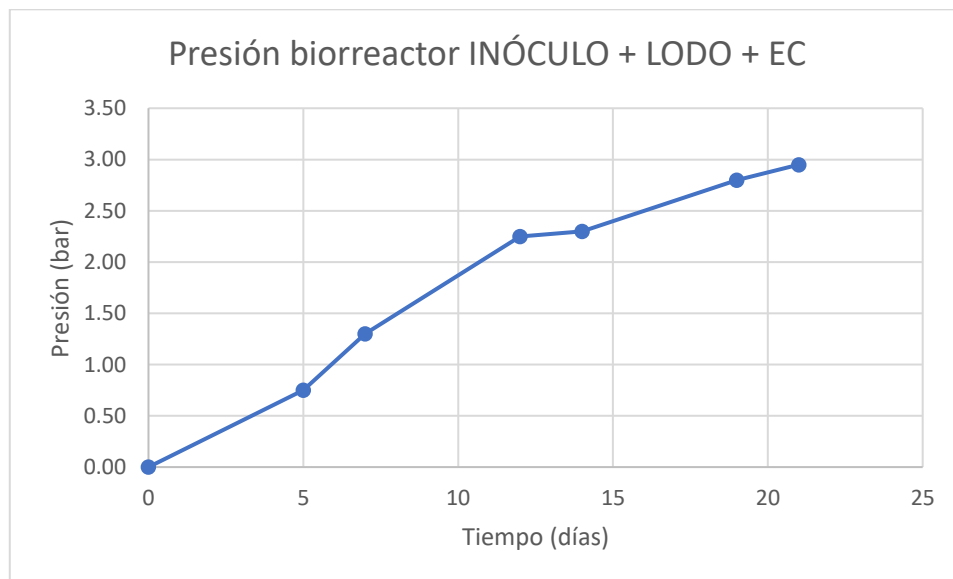


Figura 3.6. Curva P vs t del biorreactor 6.

Elaborado por: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

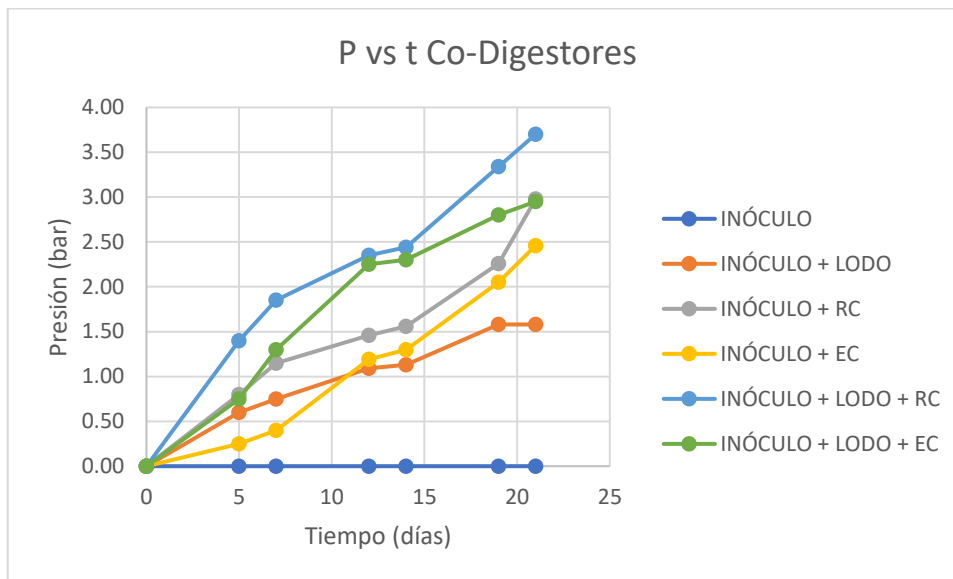


Figura 3.7. Curva P vs t de los biorreactores 1 – 6.

Elaborado por: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

Al observar la *figura 3.7* en donde se compilaron las gráficas de los tratamientos 1 al 6, se pudo notar claramente que:

- a. Todas las curvas presentaron una tendencia creciente lo cual indicó el continuo aumento de la presión en cada uno de los tratamientos, excepto en el biorreactor blanco cuyas lecturas fueron cero.
- b. En el biorreactor blanco, el inóculo por sí solo no fue capaz de producir biogás. Esto es de esperarse ya que el inóculo es el conjunto de bacterias que se habían adaptado a las condiciones mesófilicas para biodegradar la materia orgánica presente en el reactor, entonces al no existir materia orgánica que biodegradar en el biorreactor, no hubo producción de biogás.
- c. Los biorreactores que contenían residuos de comida (RC) produjeron una mayor cantidad de gas, que aquellos que contenían excremento de cerdo (EC).
- d. La producción de biogás que generó el lodo por sí solo quedó por debajo de todos los demás tratamientos. Permitiendo observar que el lodo por sí solo pudo generar biogás, pero en bajas cantidades cuando se le compara con los biorreactores que además del lodo contenían cosustratos. Esto se comprobó con la tasa de biodegradación de cada uno de los tratamientos.

Como se pudo apreciar en las *figuras 3.3 y 3.4* se sembraron biorreactores que solo contenían RC y EC (sin olvidar que todos contenían inóculo) para verificar si en realidad la adición de estos cosustratos promovía la biodegradación del lodo de la PTAR. En estas gráficas se visualizó la presión ejercida por el biogás producido por la biodegradación de los residuos de comida y el excremento de cerdo respectivamente. Al conocerse la presión ejercida por la biodegradación del lodo, de los RC y el EC a los 21 días del experimento (cada uno con una proporción inicial del 100%), pudo determinarse la presión mínima esperada en los biorreactores 5 y 6 haciendo uso de las proporciones usadas para cada componente de dichos co-digestores. Estos resultados se muestran en la *tabla 3.2* a continuación:

Tabla 3.2. Presión de los co-digestores.

	Presión (bar)		
Proporciones de lodo	100%	75%	25%
Blanco	0.00	0.00	0.00
Inóculo + Lodo	1.58	1.19	N/A
Inóculo + RC	2.98	N/A	0.75
Inóculo + EC	2.46	N/A	0.62
	Pmín esperada (bar)	Presión obtenida (bar)	Aumento en %
Inóculo + Lodo + RC	1.93	3.70	92%
Inóculo + Lodo + EC	1.80	2.95	64%

Elaborado por: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

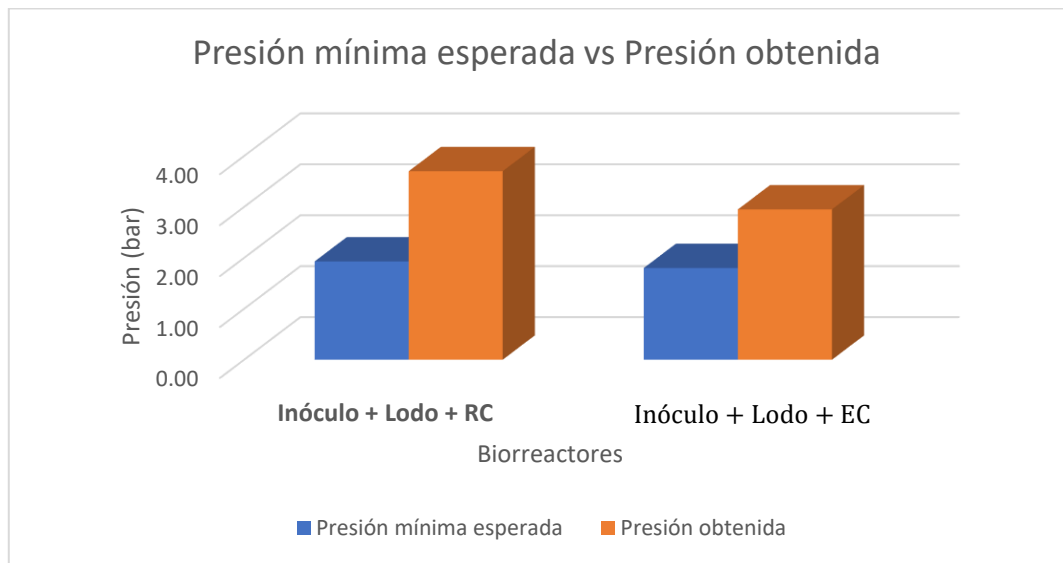


Figura 3.8. Presión mínima esperada vs Presión obtenida en los co-digestores.

Elaborado por: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

En términos de porcentaje, el uso de residuos de comida y excremento de cerdo incrementaron la presión del sistema anaerobio en un 92% y 64% respectivamente, con respecto a lo que genera el biorreactor que solo contiene el lodo de la PTAR. Todavía no era posible asegurar que estos cosustratos lograron incrementar de forma significativa la producción de biogás pues era necesario analizar los resultados de control de inhibición para comprobar que las medidas obtenidas del manómetro corresponden a una producción neta de biogás.

Se puso en marcha el control de inhibición con el objetivo de verificar si los cosustratos añadidos a los biorreactores provocaban el detenimiento del proceso de co-digestión anaerobia en algún punto del experimento. En las *figuras 3.9 a 3.11* se visualizan dos curvas para cada tipo de tratamiento debido a lo explicado en el caso de las seis primeras gráficas, solo que, a diferencia de los tratamientos anteriores, dos biorreactores de cada tratamiento de inhibición tuvieron el tapón que se ajusta adecuadamente lo que descartó posibles fugas del biogás. Como se pudo observar en los tres tratamientos de inhibición las dos réplicas de los biorreactores presentaron comportamientos similares, lo que

resultó en desviaciones estándar en las presiones acumuladas en el día 21 de 18% para el biorreactor 7, 9% para el biorreactor 8 y 6.5% para el biorreactor 9.

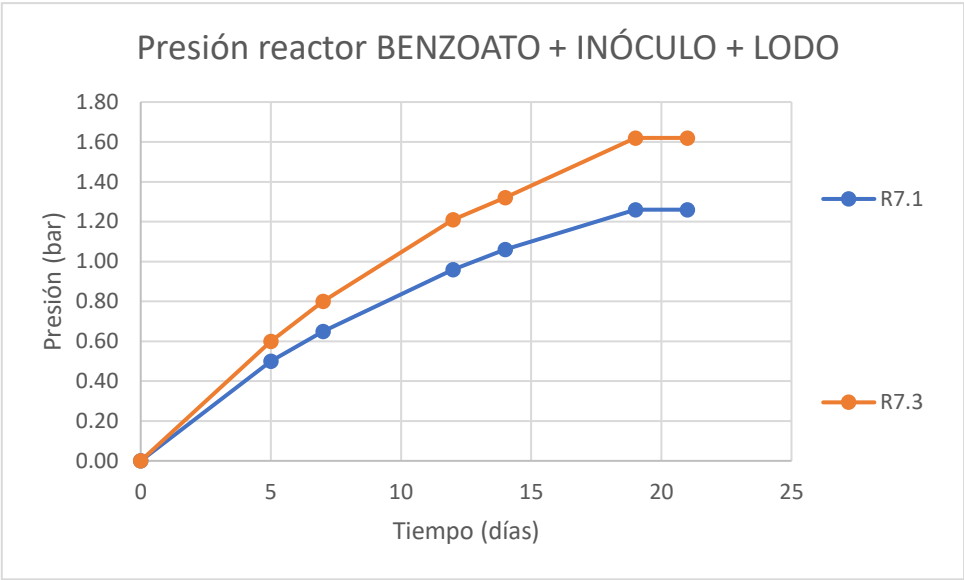


Figura 3.9. Curva P vs t del biorreactor 7.

Elaborado por: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

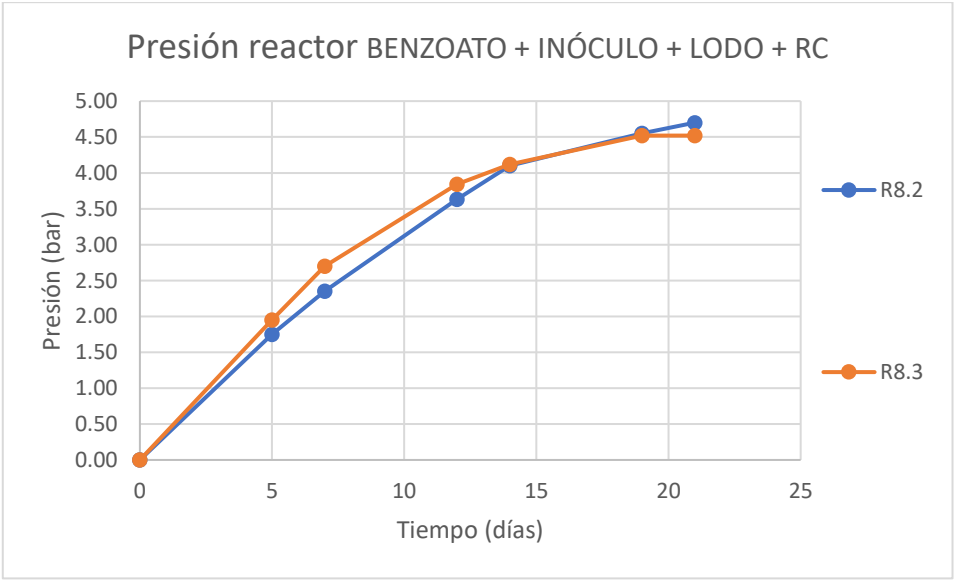


Figura 3.10. Curva P vs t del biorreactor 8.

Elaborado por: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

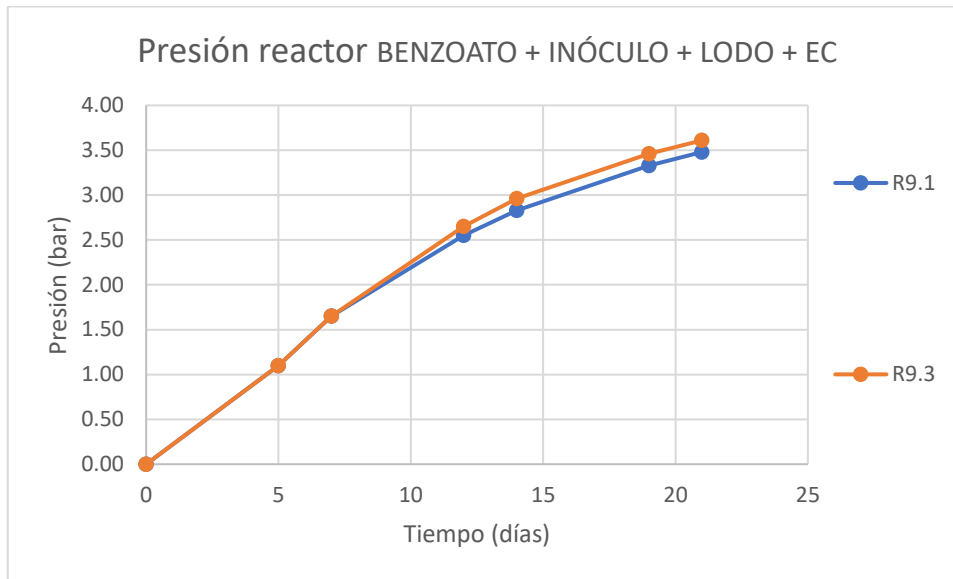


Figura 3.11. Curva P vs t del biorreactor 9.

Elaborado por: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

En la *figura 3.12* se muestra una compilación de las curvas de los biorreactores 7 al 9 a fin de observar su desarrollo a lo largo de los 21 días.

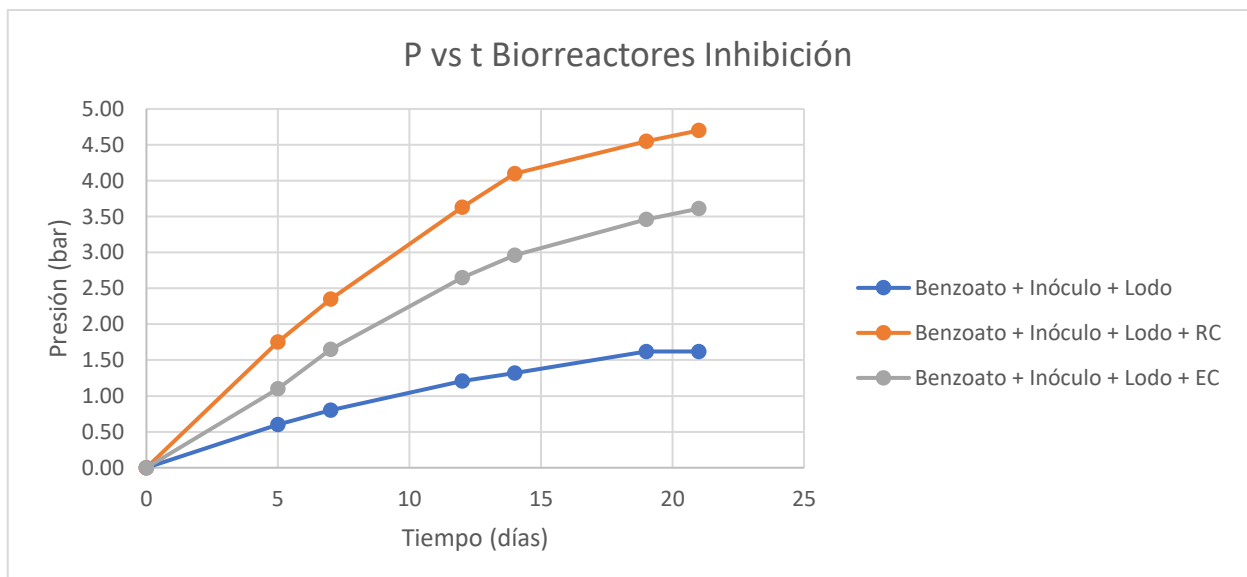


Figura 3.12 Curva P vs t de los biorreactores 7 – 9.

Elaborado por: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

Se pudo notar que los biorreactores para control de inhibición exhibieron un aumento creciente de presión, sobre todo en el tratamiento que contenía RC cuyo valor fue de 4.70 bar, aunque este evidente aumento de presión parecía una buena señal de que no existía inhibición durante el proceso, fue necesario comprobarlo con la tasa de biodegradación de cada biorreactor; pues el efecto de la inhibición en ocasiones no detiene la producción de gas, sino que reemplaza la producción de metano (el principal componente del biogás) por otros compuestos como: ácidos grasos volátiles, sulfuros, entre otros, que resulta imposible identificarlos solamente con la medida de presión del manómetro.

La medida de la presión de cada biorreactor fue un dato imprescindible en el camino a determinar la tasa de biodegradación de cada uno de ellos. Con estos valores fue posible calcular el carbono neto producido como gas en el espacio de cabeza, mh.

3.3 Carbono inorgánico

A los 21 días de montado el experimento se abrió una botella de cada tipo de tratamiento a fin de medir el carbono inorgánico (CI) de la parte líquida de cada uno de ellos y con eso calcular la masa de carbono en la parte líquida del biorreactor, ml. Los resultados obtenidos de la determinación de CI de cada tratamiento se detallan en la *tabla 3.3*.

Tabla 3.3. Carbono Inorgánico de los co-digestores.

	TC	NPOC	CI
	mg/L	mg/L	mg/L
R1: Blanco	94.48	30.40	64.08
R2: Inóculo + Lodo	428.60	53.63	374.97
R3: Inóculo + RC	5898.00	5694.00	204.00
R4: Inóculo + EC	2088.00	1609.00	479.00
R5: Inóculo + Lodo + RC	556.10	70.06	486.04
R6: Inóculo + Lodo + EC	619.20	196.20	423.00

R7: Benzoato + Inóculo + Lodo	459.70	64.41	395.29
R8: Benzoato + Inóculo + Lodo + RC	571.30	65.04	506.26
R9: Benzoato + Inóculo + Lodo + EC	607.30	139.40	467.90

Elaborado por: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

El valor ml representa la masa en mg de los compuestos de carbono presentes en el biogás que con el pasar del tiempo se han solubilizado en la parte líquida del co-digestor y que no se consideró en el valor de mh.

3.4 Masa total de carbono en el biogás

La suma de ml y mh permiten obtener el valor total del carbono presente en el biogás, mt. Este dato es imprescindible para determinar la tasa de biodegradación de cada tratamiento. Los resultados de mt se muestran en la *tabla 3.4* y en la *figura 3.13*:

Tabla 3.4 Masa de carbono en el espacio de cabeza y en el líquido del biorreactor.

	mh	ml	mt
	mg	mg	mg
R1: Blanco	0.00		
R2: Inóculo + Lodo	370.03	155.45	525.47
R3: Inóculo + RC	697.90	69.96	767.86
R4: Inóculo + EC	576.12	207.46	783.58
R5: Inóculo + Lodo + RC	866.52	210.98	1077.50
R6: Inóculo + Lodo + EC	690.88	179.46	870.34
R7: Benzoato + Inóculo + Lodo	337.24	197.65	534.89
R8: Benzoato + Inóculo + Lodo + RC	742.40	55.49	797.89
R9: Benzoato + Inóculo + Lodo + EC	492.98	36.31	529.29

Elaborado por: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

En la *figura 3.13* fue posible apreciar el incremento de carbono total en el biogás entre el reactor con el lodo y los co-digestores con los sustratos, siendo para los RC de 105,05% y para el EC de 65,63%.

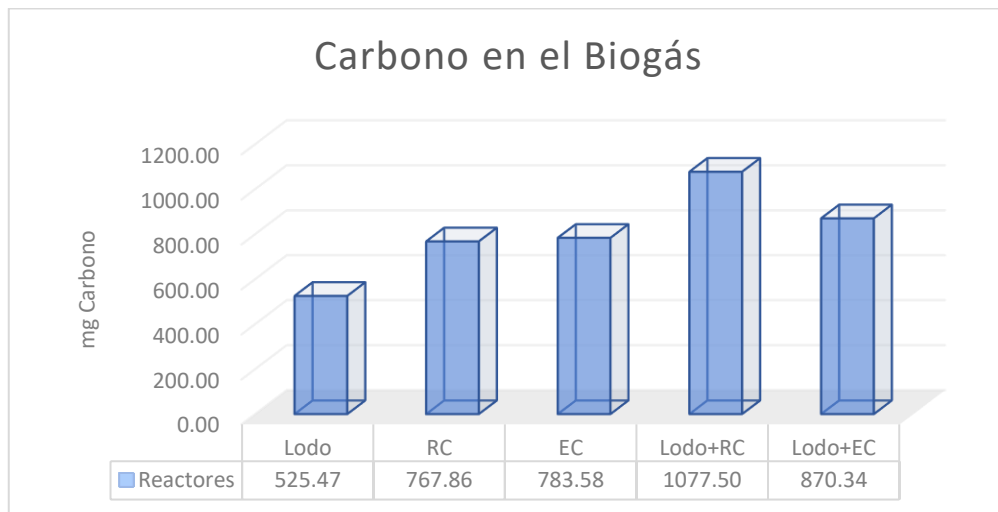


Figura 3.13 Masa de carbono en el biogás de cada reactor.

Elaborado por: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

3.5 Tasa de biodegradación

La tasa de biodegradación total indica la cantidad de materia orgánica que se biodegrada con el pasar del tiempo, y para calcular dicho valor se usó la fórmula (2.6). Los valores de m_v se calcularon a partir de la demanda química de oxígeno (DQO) de cada uno de los componentes de cada tratamiento (inóculo, lodo, RC y EC) y corresponden al carbono orgánico total (TOC) de cada uno de estos. Los resultados se presentan a continuación en la *tabla 3.5*:

Tabla 3.5 Masa de carbono orgánico total de los biorreactores.

	mv	
	mgDQO total	mgTOC
R2: Inóculo + Lodo	30048.61	8877.89
R3: Inóculo + RC	34813.89	10934.44
R4: Inóculo + EC	25794.41	7958.13
R5: Inóculo + Lodo + RC	31239.93	9392.03
R6: Inóculo + Lodo + EC	28985.06	8647.95
R7: Benzoato + Inóculo + Lodo	30048.61	8877.89
R8: Benzoato + Inóculo + Lodo + RC	31239.93	9392.03
R9: Benzoato + Inóculo + Lodo + EC	28985.06	8647.95

Elaborado por: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

Se realizó primero la determinación de la tasa de biodegradación de los biorreactores de control de inhibición para descartar aquellos en los que estuviese presente este fenómeno, de ser el caso. Al notar los resultados se pudo evidenciar que los residuos de comida y el excremento de cerdo no provocaron inhibición del proceso de co-digestión anaerobia. Si uno o los dos cosustratos hubieran causado inhibición esto se vería reflejado en una tasa de biodegradación menor, y como se observa en la *figura 3.14* y en la *tabla 3.6* los biorreactores 8 y 9 presentan una tasa de biodegradación mayor que la tasa de biodegradación del tratamiento 7 que contiene únicamente el lodo.

Tabla 3.6 Tasa de biodegradación total de los biorreactores de inhibición.

	Dt (%)
R7: Benzoato + Inóculo + Lodo	6.02
R8: Benzoato + Inóculo + Lodo + RC	8.50
R9: Benzoato + Inóculo + Lodo + EC	6.12

Elaborado por: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

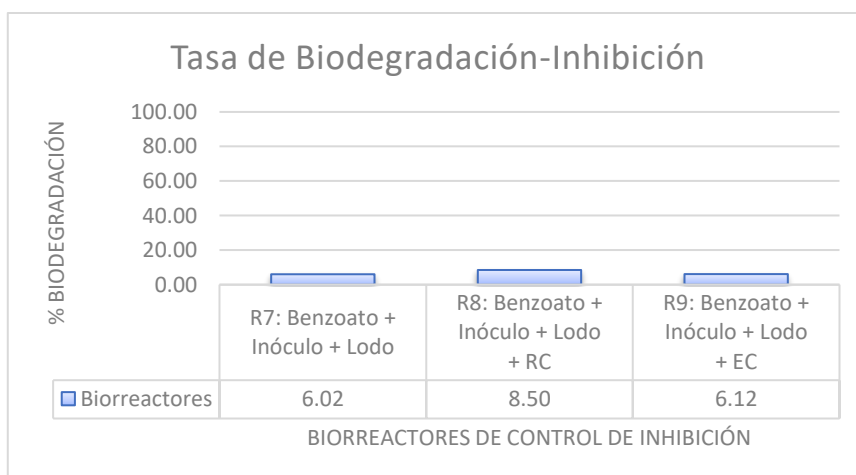


Figura 3.14 Tasa de biodegradación de los biorreactores para control de inhibición.

Elaborado por: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

Después que se comprobó la ausencia de inhibición durante el proceso de co-digestión anaerobia se procedió a determinar la tasa de biodegradación de los co-digestores. En la *figura 3.15* se muestra un gráfico de barras en donde compara la tasa de biodegradación del lodo solo, y la tasa de biodegradación de los

biorreactores con sustrato añadido. Es de principal interés para este proyecto esta comparación pues tiene la intención de comprobar que el uso de cosustratos potencializa la tasa de biodegradación de los lodos de la PTAR. Los cálculos determinaron que la adición de residuos de comida y excremento de cerdo incrementa la tasa de biodegradación del lodo de la PTAR en un 85% y 46% respectivamente. Es evidente que el uso de RC promueva una mayor cantidad de biodegradación pues su contenido de carbono es superior al de EC. Los resultados de la tasa de biodegradación de los co-digestores se presentan en la *tabla 3.7*:

Tabla 3.7 Tasa de biodegradación total de los co-digestores.

	Dt (%)
R2: Inóculo + Lodo	5.92
R3: Inóculo + RC	7.02
R4: Inóculo + EC	9.85
R5: Inóculo + Lodo + RC	11.47
R6: Inóculo + Lodo + EC	10.06

Elaborado por: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

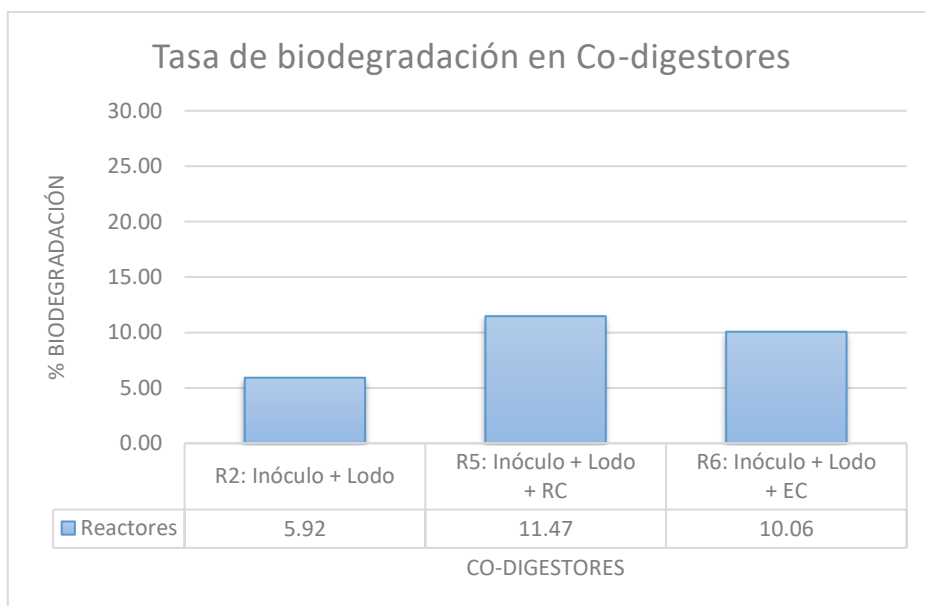


Figura 3.15 Tasa de biodegradación de los co-digestores.

Elaborado por: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

3.6 Estimación de la cantidad de cosustratos requerida

Con los cálculos realizados en la metodología planteada en el capítulo 2 junto con la tasa de biodegradación de cada tratamiento, se estimó la cantidad en kg que se requiere de residuos de comida y excremento de cerdo para someter a biodegradación una tonelada (1000kg) de lodo de la PTAR. Es de notar que el codigestor con RC al proveer una mayor tasa de biodegradación requiere una menor cantidad de cosustrato y es capaz de reducir una mayor cantidad de lodo. Los resultados se muestran en la *tabla 3.8*:

Tabla 3.8 Masa requerida de cosustratos para biodegradación.

Dt = 5.92%	Dt = 11.47%		Dt = 10.06%	
kg lodo crudo	kg lodo crudo	kg RC húmedo	kg lodo crudo	kg EC húmedo
1000.00	1000.00	45.40	1000.00	55.94
Kg lodo biodegradado		Kg lodo biodegradado		Kg lodo biodegradado
59.2		116.72		100.72

Elaborado por: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

3.7 Biogás producido

Como se puede observar *Tabla 3.9* la cantidad de biogás que se produce en la PTAR en forma de dióxido de carbono y metano al cabo de 21 días fue de aproximadamente 292 kg, es decir; 13.90kg al día o bien, 5 toneladas por año. Con el uso de sustratos esta cantidad al año se proyectó que sería más del doble en ambos casos, lo que significa una cantidad importante de biogás que se emite al medio ambiente considerando que estas cantidades representan a un solo reactor.

Tabla 3.9 Toneladas de C en el biogas

Reactor	tonC/21 días	ton C al año
Lodo	0.29	5.07
Lodo+RC	0.80	13.87
Lodo+EC	0.64	11.20

Elaborado por: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

Aunque las cantidades de biogás producido pudieran aportar significativamente al aumento del efecto invernadero, también se conoce que pueden ser fuente de energía a bajo costo que se utiliza para generar electricidad y alimentar calderas (Venegas, Raj, & Pinto , 2019) cuando las emisiones son controladas.

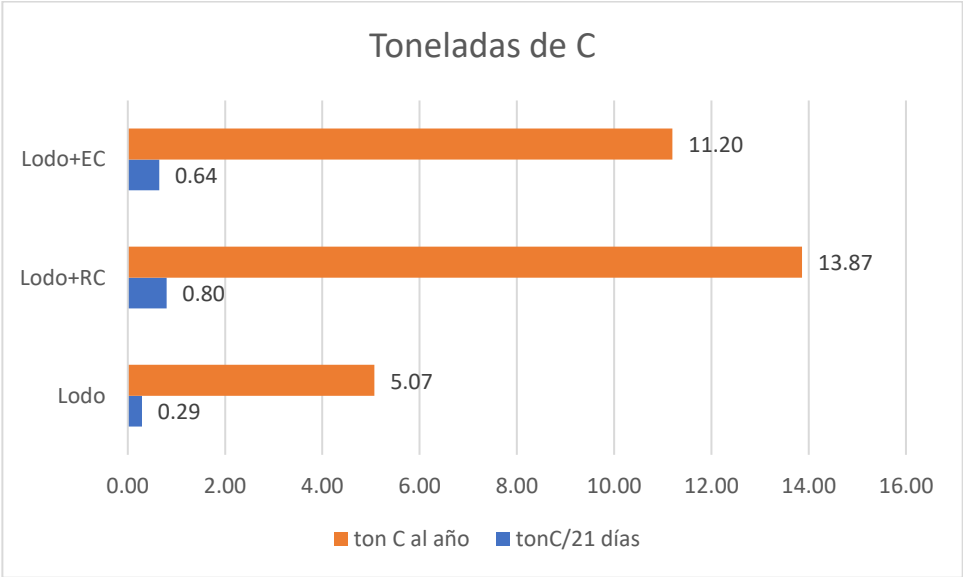


Figura 3.16 Toneladas de biogás producido

Elaborado por: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- En el presente trabajo fue posible desarrollar una metodología para determinar el porcentaje de biodegradación de lodos provenientes de una planta de tratamiento anaeróbica de aguas residuales ubicada en una ciudadela en la parroquia satelital de La Puntilla, mediante un proceso de co-digestión usando cosustratos sólidos a escala de laboratorio.
- Los lodos de la PTAR presentaron una baja relación de C/N lo que afecta a su porcentaje de biodegradación y se evidencia en un valor de 5,92% de la tasa calculada, lo que limita el crecimiento microbiano necesario para degradar la mayor cantidad de materia orgánica, afectando la estabilización de los lodos de las aguas residuales.
- Con el aumento de presión de los biorreactores se evidencia una mayor digestión de los lodos al agregar residuos de comida y excremento de cerdo debido al incremento entre la presión acumulada mínima esperada y la presión obtenida.
- Existe un considerable aumento de producción de biogás evidenciado en los mg de carbono gaseoso total obtenidos para los co-digestores y monodigestores.
- Se demostró que el uso de co-sustratos ricos en carbono incrementa la tasa de biodegradación del lodo de agua residual doméstica en un 85% cuando se agrega residuos de comida, y en un 46% al añadir excremento de cerdo.
- Los cosustratos utilizados en la experimentación no inhiben el proceso en el rango de 21 días, sino que, por el contrario, promueven la biodegradabilidad de la materia orgánica en los lodos de la PTAR produciendo mayor cantidad de biogás.
- Las variaciones de los valores de presión obtenidos entre cada biorreactor en los distintos tratamientos de inhibición son muy bajas, con desviaciones estándar de entre 6,5% y 18% lo que permite asegurar la fiabilidad de las

presiones estimadas y que existe poca dispersión entre los reactores dentro de cada tratamiento.

- Respecto a la caracterización del lodo, los residuos de comida, el excremento de cerdo y el inóculo usado en la experimentación se tiene un porcentaje de humedad del 88%, 60%, 64% y 73% respectivamente; y su valor de DQO de 456.7mg/L, 980.2mg/L, 874.0mg/L y 360.3mg/L respectivamente. Siendo los co-sustratos los que contienen una menor cantidad de humedad y requieren una mayor cantidad de oxígeno para biodegradarse. Se evidencia una relación inversamente proporcional entre la humedad y el DQO; ya que, si el material orgánico contiene menor cantidad de agua, existe mayor cantidad de materia que biodegradar.
- En base a los resultados encontrados en la fase experimental, la implementación de cosustratos tales como residuos de comida, mejoran la tasa de biodegradación de los lodos de la PTAR en un 85%, siendo una posible solución a escala real donde en condiciones anaeróbicas y a 35°C se espera que por cada tonelada (1000 kg) de lodo crudo de la PTAR se use 45.40 kg de residuos de comida para reducir 116.72 kg de lodo de la masa inicial.
- La PTAR es capaz de generar por sí sola 5 toneladas de biogás al año en forma de metano y dióxido de carbono, y con el uso de RC y EC esta producción se incrementa a 13 y 11 toneladas respectivamente. Indicando una generación considerable de gases que podrían ser aprovechados para la producción de energía limpia que podría utilizarse dentro de la ciudadela en la parroquia satelital de La Puntilla.

Recomendaciones

- Ante lo evidenciado a lo largo del proyecto, se considera que es necesario mejorar el sistema de filtrado antes de que el efluente llegue a los reactores anaeróbicos para de esta manera sea posible evitar la acumulación de desechos que son imposibles de biodegradar a este tipo de condiciones.
- Se considera importante el estudio del proceso a las condiciones reales de la PTAR tomando en cuenta la temperatura que es un factor de suma

importancia, el tiempo de retención hidráulica para determinar si en dichas condiciones es posible la mejora de biodigestión con los cosustratos.

- Adicional al estudio de la co-digestión de la planta en condiciones reales es necesario considerar si los sustratos añadidos requieren estrictamente un tratamiento previo a su implementación ya que en escala de laboratorio fue necesario el triturar y homogenizar los residuos de comida.
- Se recomienda considerar el estudio de otras relaciones de mgDQO entre el lodo y el sustrato para la determinación de una mejor tasa de biodegradación, así como otro tipo de cosustratos que no han sido considerados en el presente proyecto.
- Es recomendable que se plantee un análisis de costos donde se incluyan parámetros como el precio de transporte de los cosustratos hasta la PTAR (pues esto dependerá del sector donde se ubique la planta), la manipulación de estos (trituration, mezcla), la mano de obra y una proyección de la mejora en el tiempo de la eficiencia de la digestión de los lodos
- Con respecto al presente trabajo, aunque fue posible el planteamiento de una metodología detallada que determina la tasa de biodegradación de los lodos en co-digestión anaerobia, se recomienda implementar, de ser posible, ensayos microbiológicos, así como la medición de parámetros tales como pH, Cl, sólidos volátiles, etc, a lo largo del experimento para tener un conocimiento más completo de las variables que rigen el proceso dentro del reactor.
- Se sugiere hacer un estudio de los parámetros cinéticos involucrados en la co-digestión de aguas residuales y de diferentes cosustratos para el control y mejora de la producción de biogás en reactores anaeróbicos.
- Es recomendable realizar un estudio sobre la composición del biogás en la PTAR con la finalidad de determinar el porcentaje de metano, el cual da el poder calorífico y por tanto es la fuente de energía.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, Y., & Obaya Abreu, M. C. (2005). La Digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la caña de azúcar (ICIDCA)*, 37; 39.
- Aguirre, H., Larson, R., & Reinemann, D. (2014). From waste-to-worth: energy, emissions, and nutrient implications of manure processing pathways. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, :770–793.
- André, L., Pauss, A., & Ribeiro, T. (2017). A modified method for COD determination of solid waste, using. *Bioprocess Biosyst Eng*, 40, 473-478. doi:<https://doi.org/10.1007/s00449-016-1704-8>
- Bani, R., & Amoatey, P. (2011). *Wastewater Management*. Ghana: Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering Sciences, University of Ghana.
- Cardona, L., Levrard, C., Guenne, A., Chapleur, O., & Mazéas, L. (2019). Co-digestion of wastewater sludge: Choosing the optimal blend. *Waste Management*, 87, 772-781.
- Chynoweth, D., Owens, J., & Legrand, R. (2001). Renewable methane from anaerobic digestion of biomass. *Renew Energy*, 1-8.
- Dubber, D., & Gray, N. (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*, 1595-1600.
- Fernández Villagómez, G., Vázquez Borges, E., & Martínez Pereda, P. (2002). Inhibidores del proceso anaerobio: compuestos utilizados en porcicultura. *Ingeniería* 6-3, 67.
- Gonzalez Baena, A., & Quijano Villegas, J. (2009). Determinación de propiedades físico-químicas de un detergente líquido formulado con Metil Ester Sulfonado (MES) proveniente de aceite de palma africana como principio activo. Bogotá D.C.

- Julio Guerrero, I., Peláez Jaramillo, C., & Molina Pérez, F. (2016). Evaluación de la co-digestión anaerobia de lodos de aguas residuales municipales con residuos de alimentos. *rev.ion*, 63-70.
- Limón Macias, J. G. (08 de Julio de 2013). LOS LODOS DE LAS PLANTAS DE. Guadalajara, Jalisco, México.
- Lopez-Vazquez , C. M., Welles, L., Lotti, T., Ficara, E., Rene, E. R., H. van den Brand, T., . . . M. van Loosdrecht , M. C. (2016). *Experimental Methods in Wastewater Treatment*. IWA Publishing.
- Muñoz Cruz, A. (2008). Caracterización y tratamiento de aguas residuales. Estado de Hidalgo.
- Ordoñez, I. A. (2017). "EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE REDISEÑO DE LA PLANTA DE. Cuenca, Azuay, Ecuador.
- Parra Vega, D. (2019). Determinación de biodegradabilidad de detergentes comerciales mediante tratamientos biológicos. Quito.
- Puig-Castellv´, F., Cardona, L., Jouan-Rimbaud Bouveresse, D., Cordella, C. P., Mazéas, L., Rutledge, D. N., & Chapleur, O. (2020). Assessment of the microbial interplay during anaerobic co-digestion of wastewater sludge using common components analysis. *PLOS UNO*, 1.
- Qingfang, Z., Liyuan, Z., Feng, P., Xiaofeng, S., & Tianfeng, W. (2021). Comparison of anaerobic co-digestion of pig manure and sludge at different mixing ratios at thermophilic and mesophilic temperatures. *Bioresource Technology*, 1-2.
- Riffat, R. (2013). *Fundamentals of Wastewater treatment and Engineering*. Boca Raton, USA: IWA.
- Ruiz López, G. (2014). Utilización de biodigestores en el tratamiento de las aguas residuales domésticas, en la población del buijo histórico, Samborondón. Guayaquil.
- Sarabia Méndez, M., Laines Canepa, J., Sosa Olivier, J., & Escalante Espinoza, E. (2017). Producción de biogás mediante codigestión anaerobia de excretas de borrego y rumen adicionadas con lodos procedentes de una planta de aguas residuales. 109-116.
- Varnero, M. T. (2011). *Manual de Biogas*. Santiago: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

- Venegas, J., Raj, D., & Pinto, R. (2019). Biogás, la energía renovable para el desarrollo de granjas porcícolas en el estado de Chiapas. *Análisis Económico*, 169-187.
- Vom Sperling, M., & Chernicharo, C. (2005). Biological Wastewater Treatment in Warm. *IWA Publishing*, 1215-1216.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Caracterización del lodo por el laboratorio GQM

Parte de la caracterización del lodo de la PTAR se envió a realizar en el laboratorio del grupo químico Marcos, GQM. En la siguiente figura se presentan los resultados del análisis.

Resultados análisis GQM



ANGUISACA MOLINA MONICA ANTONELLA
Representante Legal: ---
Dirección: Tarquí / S/N, Tel. 0986932320
Atención : Ing. Monica Anguisaca

Guayaquil, 2021-08-25

DATOS DE LA MUESTRA

Punto e Identificación de la Muestra:	Lodo PTAR
Fecha/Hora Lugar de Toma de Muestra:	2021/08/11 / 10:15 / Samborondón - Urbanización
Fecha/Hora Recepción Muestras:	2021/08/11 / 12:50
Matriz de la muestra:	Lodos

FISICOQUIMICOS

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES	U K=2	MÉTODO	ANALIZADO POR
Carbono (1)	3,40	%	---	5310 B	2021/08/24 FM

INORGANICOS NO METALES

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES	U K=2	MÉTODO	ANALIZADO POR
Nitrógeno (1)	1,70	%	---	Interno	2021/08/24 FM

AGREGADOS ORGANICOS

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES	U K=2	MÉTODO	ANALIZADO POR
Tensoactivos-Detergentes (1)	3,820	mg/Kg	---	5540 C	2021/08/18 SP

SIMBOLOGÍA:

--- No. Aplica

<LD Menor al Limite 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 Permissible

V.L.P. Valor Límite Permissible

V.M.R. Valor Máximo Referencial

C.C. Criterios de Calidad

V.M. Valor Máximo

V.M.P. Valor Máximo Permissible

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

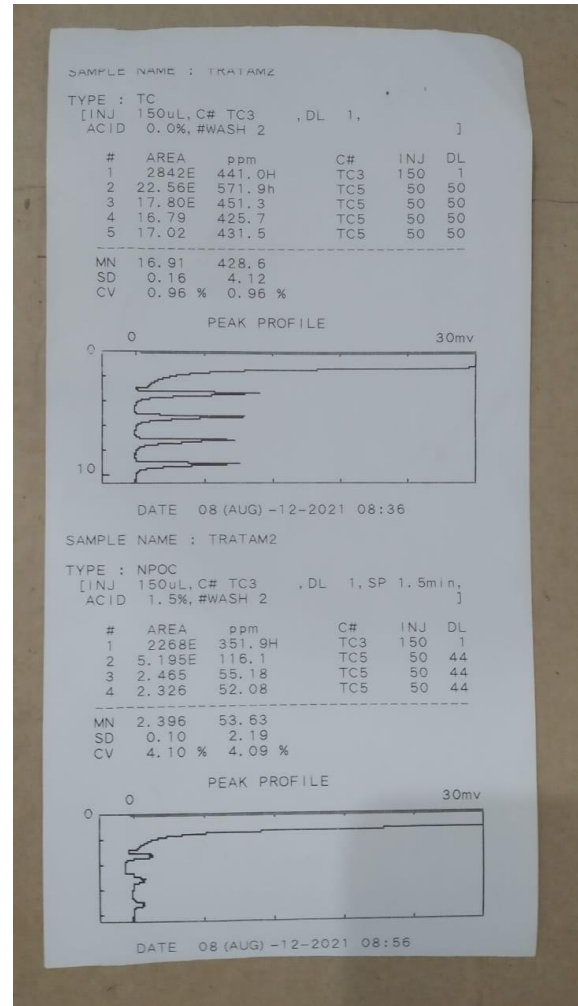
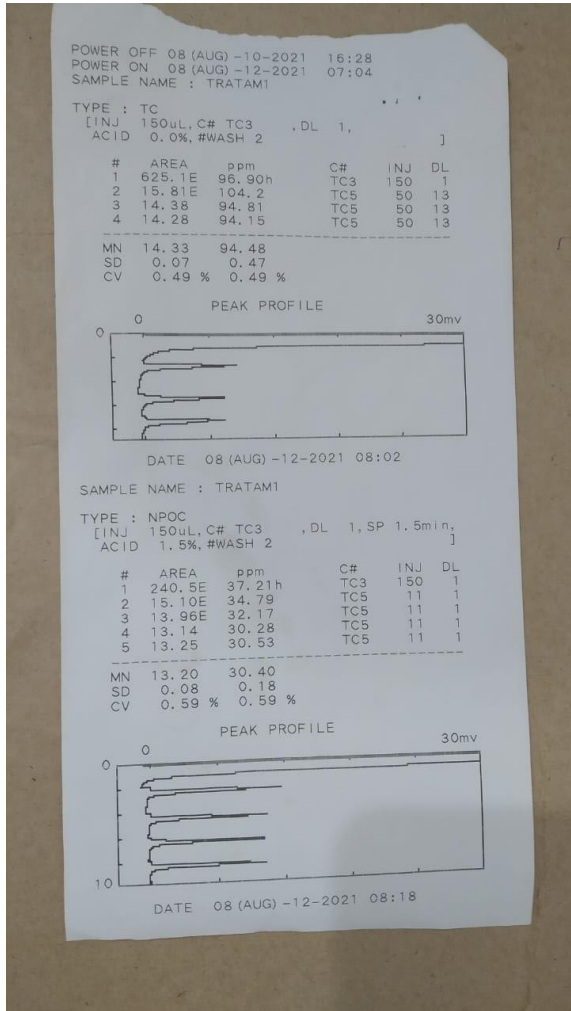
(3) Parámetro acreditado cuyo resultado está FUERA DEL ALCANCE de acreditación.

(4) Parámetro subcontratado ACREDITADO; ver alcance en www.acreditacion.gob.ec

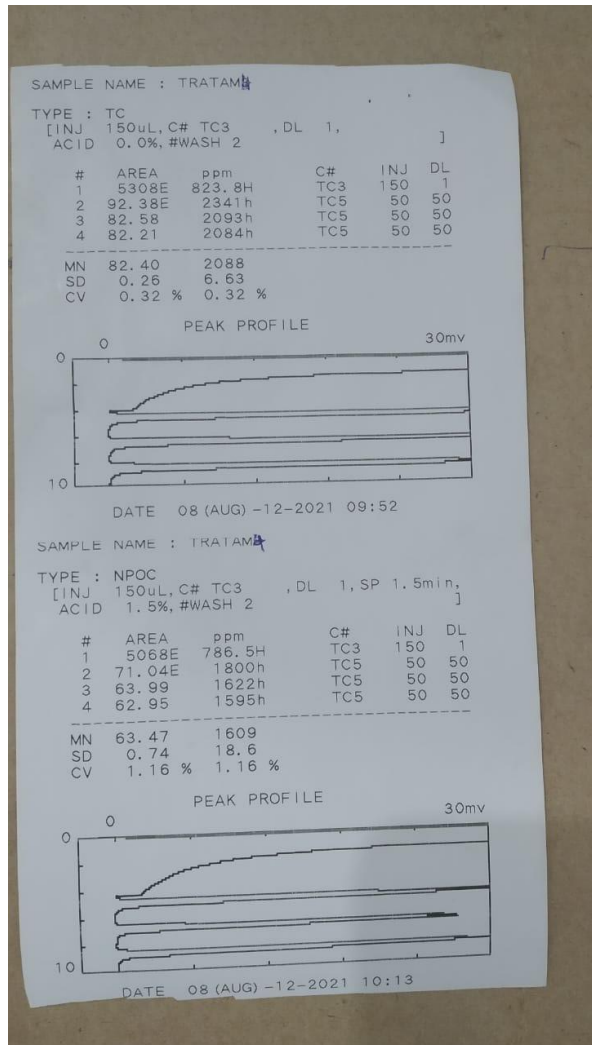
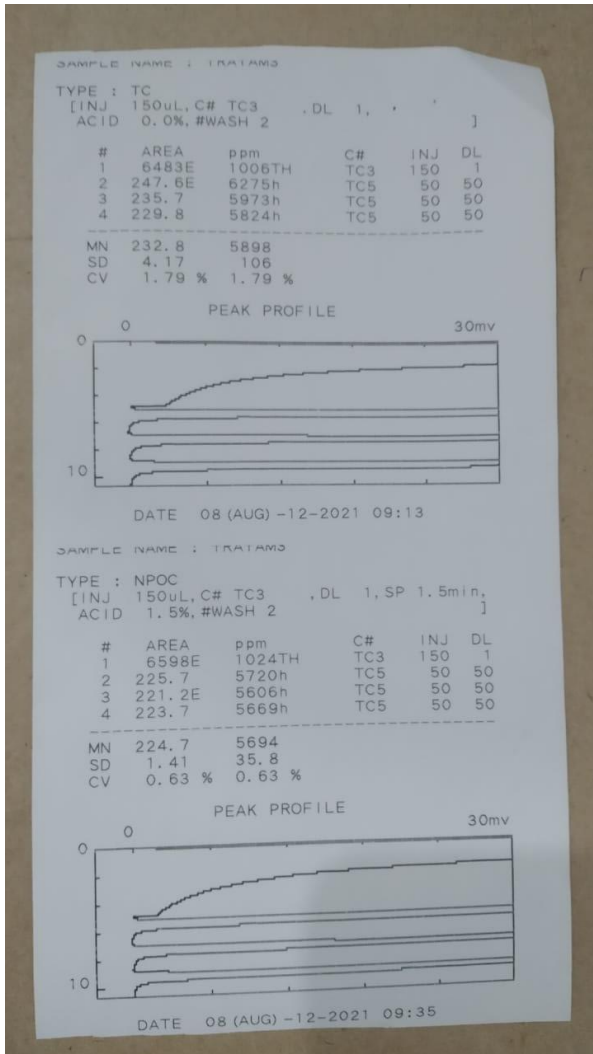
Elaborado por: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

APÉNDICE B

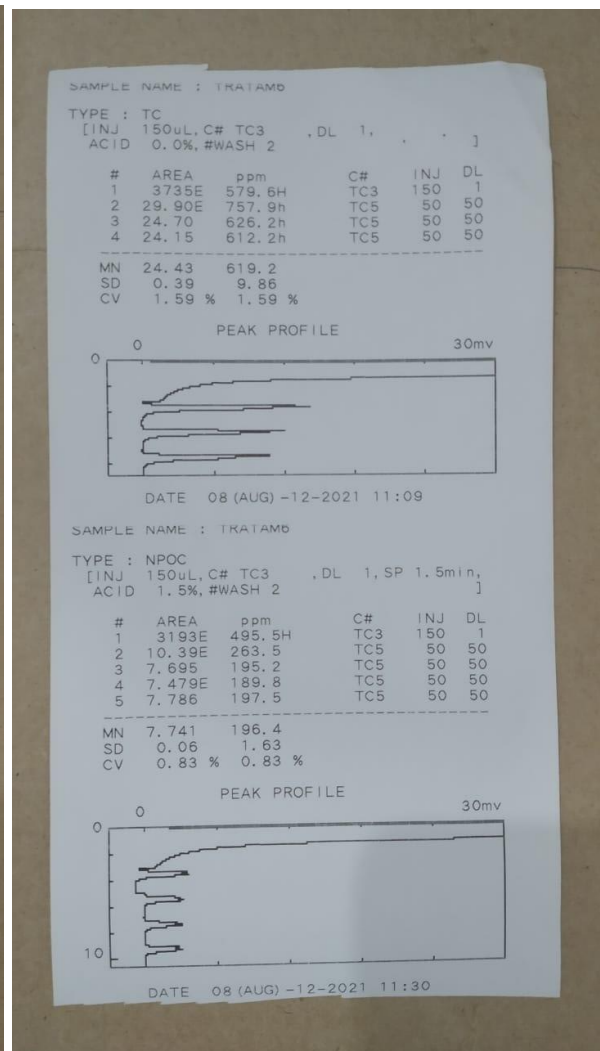
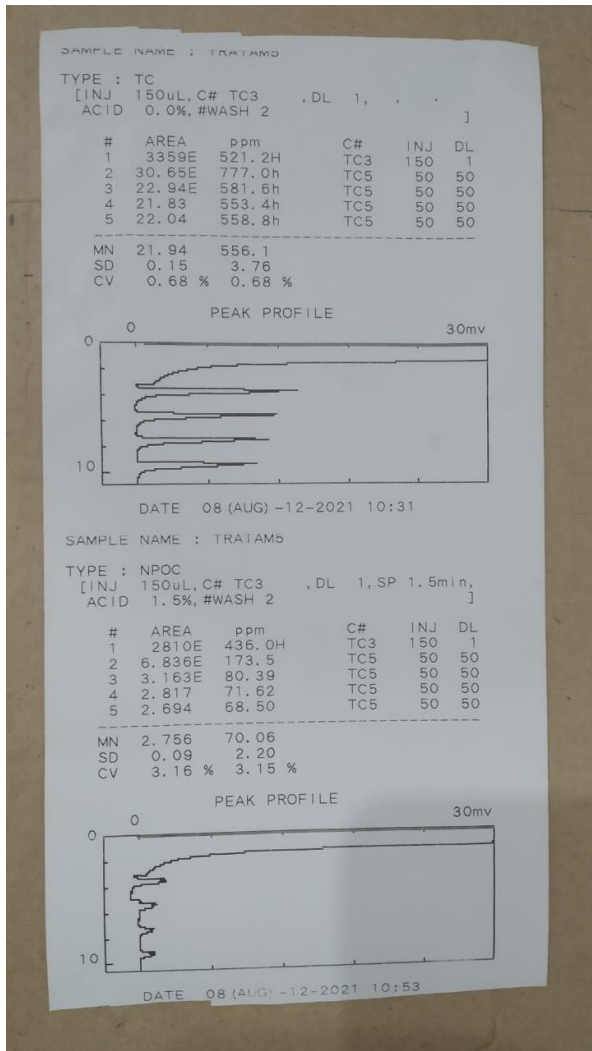
Resultados del TOC tratamiento 1 y 2



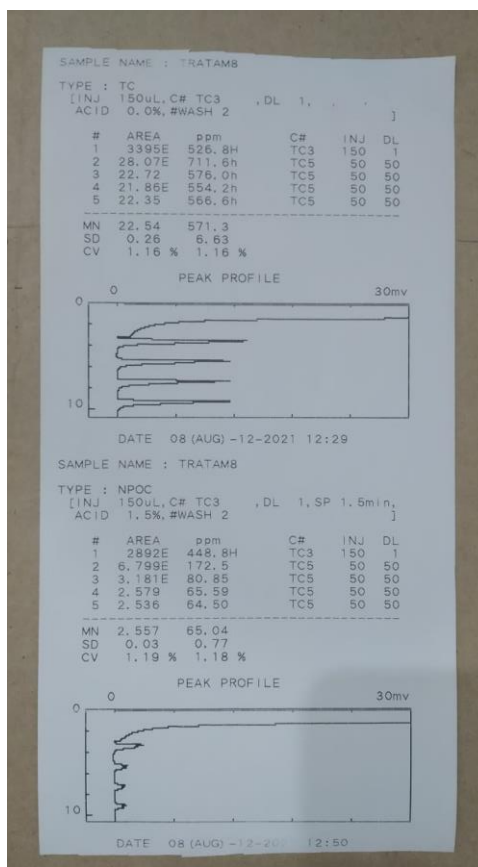
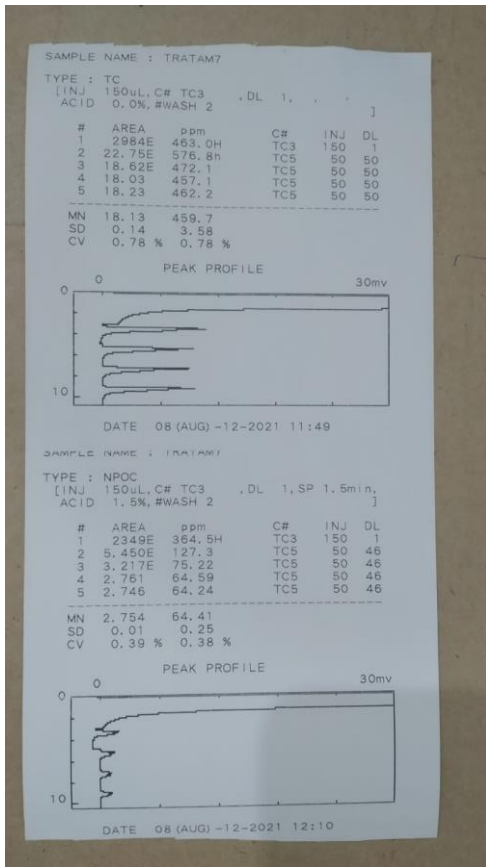
Resultados del TOC tratamiento 3 y 4



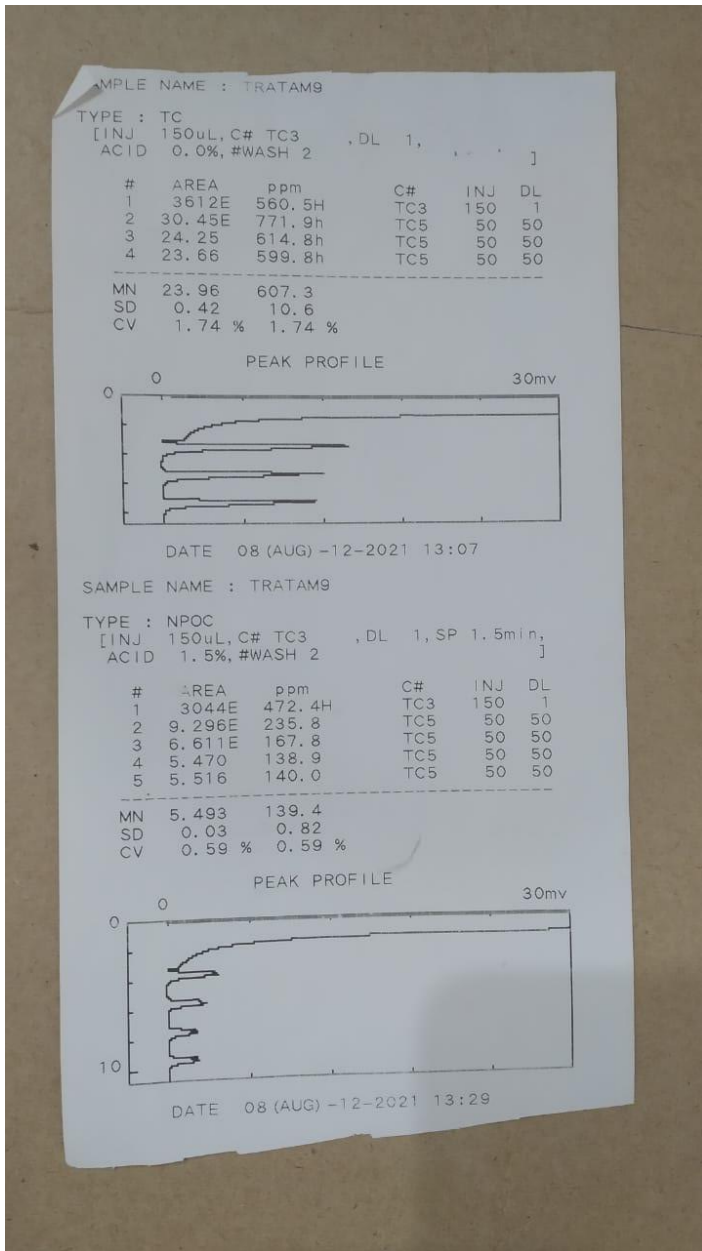
Resultados del TOC tratamiento 5 y 6



Resultados del TOC tratamiento 7 y 8



Resultados del TOC tratamiento 9



APÉNDICE C

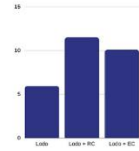
Etapas de la metodología ejecutada en este proyecto.



- Compra de materiales, reactivos y equipos.
- Pruebas de presión a las botellas y verificación del estado de los materiales y equipos.



- Puesta en marcha del manual de procedimiento de experimentación por completo durante 21 días.
- Registro de las observaciones más relevantes del proceso.



1 Investigación

- Revisión de literatura acerca del problema y sus posibles soluciones.
- Compra de la norma ISO 11734
- Redacción del manual de procedimiento para la fase de experimentación.



2 Preparación

- Ejecución del manual de procedimiento de experimentación durante una semana.
- Registro de las principales observaciones.
- Afinar el manual de procedimiento de experimentación para la fase real.

3 Piloto

4 Real

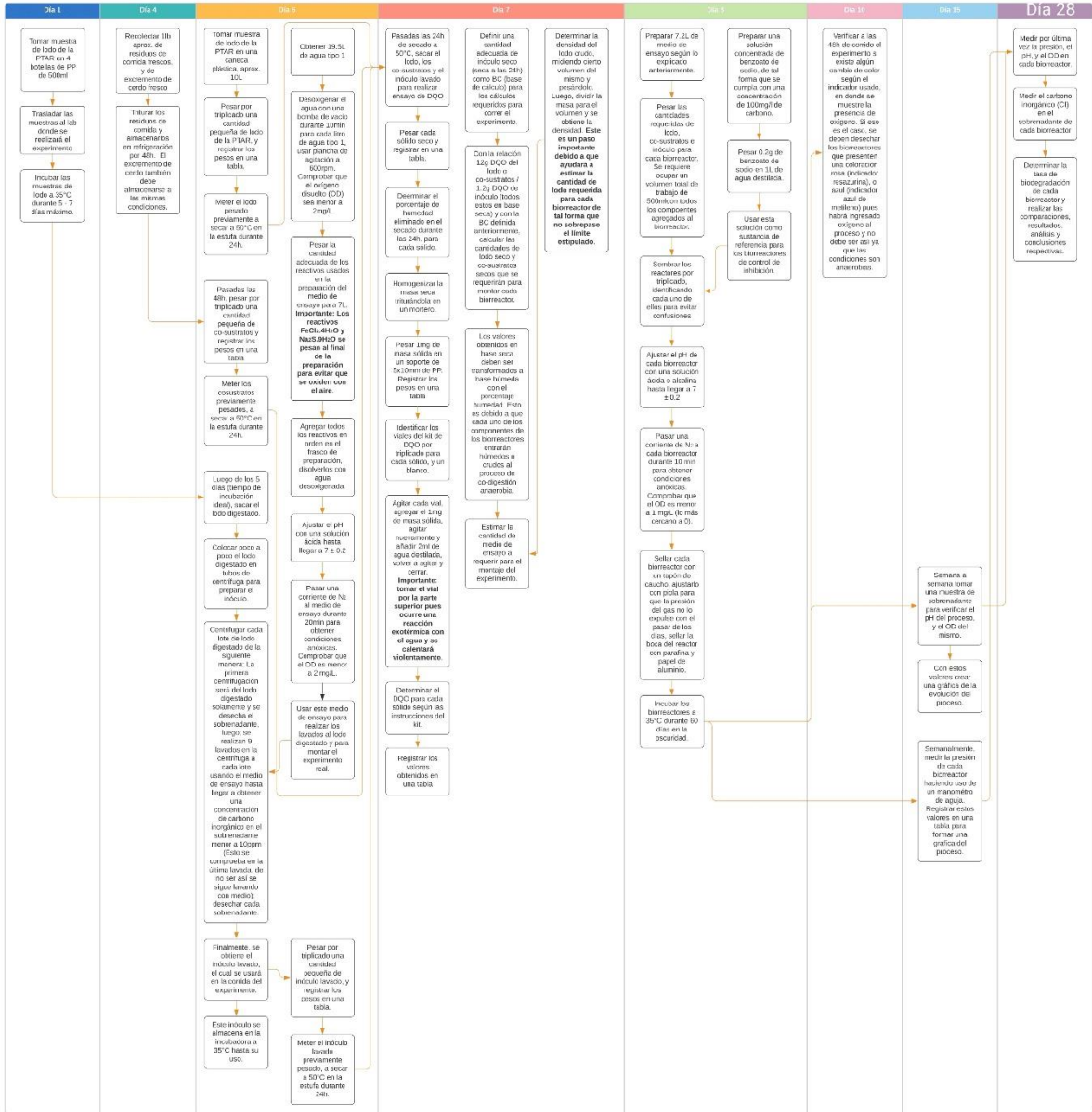


5 Resultados

- Determinación de la tasa de biodegradación de cada biorreactor en base a los resultados del experimento.
- Comprobación de la hipótesis planteada.
- Redacción de las principales conclusiones del experimento.

Elaborado por: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

Diagrama de flujo de proceso de la metodología de experimentación de co-digestión anaerobia puesta en marcha en este proyecto.



Elaborado por: Anguisaca M, Chinchin A, 2021

APÉNDICE D

La norma ISO 11734 el extracto proporcionado en línea por la INEN Ecuatoriana



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
--	--