

**Codigestión anaerobia como alternativa de
tratamiento de los efluentes agroindustriales
en Zamorano, Honduras**

Henry Alexander González Hernández

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Honduras**

Noviembre, 2017

ZAMORANO
CARRERA DE AMBIENTE Y DESARROLLO

Codigestión anaerobia como alternativa de tratamiento de los efluentes agroindustriales en Zamorano, Honduras

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingeniero en Ambiente y Desarrollo en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

Henry Alexander González Hernández

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2017

Codigestión anaerobia como alternativa de tratamiento de los efluentes agroindustriales en Zamorano, Honduras

Henry Alexander González Hernández

Resumen. Con el incremento de la industria láctica y cárnica también ha aumentado la cantidad de efluentes con alto contenido orgánico. Con ello, surge la necesidad de implementar tratamientos de aguas residuales industriales que reduzcan estos contaminantes. La codigestión anaerobia consiste en la combinación de residuos de distinta naturaleza, obteniendo beneficios energéticos y ambientales. El objetivo de este estudio fue calcular la eficiencia de la codigestión en la remoción de materia orgánica de efluentes agroindustriales. Se determinó el volumen de suero y aguas rojas provenientes de las plantas agroindustriales de Zamorano, cuantificando su producción durante mayo-junio de 2017. Para determinar la eficiencia en remoción de materia orgánica los reactores batch fueron montados a una carga orgánica de 1 g SV/L e incubados a 35 °C por 48 días, a distintas proporciones de cada residuo. Con la aplicación de un ANDEVA y pruebas post hoc Tukey se determinó que el mejor tratamiento de codigestión en remoción de materia orgánica fue en la proporción 75% suero – 25% aguas rojas con un 68.1% de eficiencia y un IPM de 0.35 m³ CH₄/kg SV. El mejor tratamiento de codigestión anaerobia en IPM fue el tratamiento 75% aguas rojas – 25% suero con un valor de 0.41 m³ CH₄/kg SV y con una eficiencia de remoción de 64.9%. Se determinó que el tratamiento de codigestión aplicable para Zamorano es el tratamiento 25% aguas rojas – 75% suero debido a la disponibilidad de residuos. En conclusión, la codigestión representa una alternativa viable para el tratamiento de los efluentes mencionado.

Palabras clave: Agua residual, biogás, carga orgánica, suero, rastro.

Abstract. With the spread of the dairy and meat industry, the quantity of effluents with high organic content has also increased. Thus, the need to implement industrial wastewater treatment to reduce these pollutants. Co-digestion is defined as the anaerobic treatment of a mixture of at least two different waste types to improve the process performance, obtaining energetic and environmental benefits. This study's objective was to calculate the efficiency of the codigestion on the removal of organic matter from agroindustrial effluents. The whey and slaughterhouse wastewater from Zamorano's processing plants were quantified from May to June of 2017. To determine the organic matter removal efficiency, batch reactors were established with an organic load of 1 g VS/L and incubated at 35 °C for 48 days, using different mixtures of each waste. As a result of the ANDEVA and Tukey's post hoc test, the best codigestion treatment in the organic matter removal was the 75% whey – 25% slaughterhouse mixture, with 68.1% efficiency and a methane yield of 0.35 m³ CH₄/kg VS. The best treatment for the anaerobic codigestion regarding methane yield was the 75% slaughterhouse wastewater – 25% whey mixture, with 0.41 m³ CH₄/kg VS and with an efficiency removal of 64.9%. Considering the availability of residues in Zamorano, the codigestión treatment that can be applied is the 25% slaughterhouse wastewater – 75% whey mixture. The results indicate that codigestion is a viable alternative for the selected wastes.

Key words: Biogas, organic load, slaughterhouse, wastewater, whey.

CONTENIDO

Portadilla	i
Página de firmas	ii
Resumen	iii
Contenido	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos.....	v
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. METODOLOGÍA.....	5
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	13
4. CONCLUSIONES.....	24
5. RECOMENDACIONES.....	25
6. LITERATURA CITADA.....	26
7. ANEXOS	30

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Caracterización de suero láctico desechado por la industria por diversos autores.....	2
2. Caracterización de las aguas rojas de ganado bovino y porcino desechada por la industria cárnica por diversos autores	3
3. Parámetros físicoquímicos realizados para caracterizar aguas rojas, suero y inóculo	7
4. Diseño experimental con la carga orgánica evaluada y cantidad de reactores montados.....	9
5. Rendimientos en conversión de leche por tipo de queso procesado en Zamorano	14
6. Caracterización del suero proveniente de la planta de lácteos de Zamorano	15
7. Caracterización de las aguas rojas de la planta de cárnicos de Zamorano	16
8. Caracterización del inóculo extraído del biodigestor de cerdos de Zamorano	16
9. Caracterización de los efluentes para cada tratamiento de digestión y codigestión.....	19
10. Comparación entre IPM y producción de CH ₄ por kg de SV removido	20
11. Prueba de normalidad, prueba de comparación de medias y prueba post hoc para conjuntos homogéneos	20
12. Prueba de normalidad y prueba de medias	21
13. Estimación de los beneficios energéticos y económicos en tres escenarios de tratamiento de residuos de acuerdo a su disponibilidad	23
Figuras	
1. Fotografía de la planta de cárnicos, Zamorano	5
2. Fotografía de la planta de lácteos, Zamorano.....	6
3. Reactores batch alimentados con aguas rojas y suero a distintas proporciones y una carga orgánica de 1 g SV/L	8
4. Adaptación del método para cuantificación de CH ₄ por volumetría de KOH	10
5. Volumen de suero desechado semanalmente de la planta de lácteos, Zamorano.....	13
6. Volumen semanal de aguas rojas desechadas por la planta de cárnicos, Zamorano.....	14
7. Producción diaria de CH ₄ para cada tratamiento.....	17

8. Producción acumulada de CH ₄ para cada tratamiento.....	18
9. Índice de Producción de Metano para cada tratamiento.....	18
10. Comparación de eficiencia de remoción de SV y DQO para cada tratamiento.....	19
11. Diagrama de cajas para IPM de los tratamientos de digestión y codigestión.....	21
12. Diagrama de cajas para remoción de SV de los tratamientos de digestión y codigestión.....	22

Anexos	Página
1. Caracterización fisico-química de aguas rojas, suero y el efluente de cada tratamiento.....	30
2. Reactores al final del tratamiento de digestión y codigestión.....	30
3. Prueba de comparación múltiple en el IPM para los tratamientos de digestión y codigestión.....	31
4. Prueba de comparación múltiple en la remoción de SV para los tratamientos de digestión y codigestión.....	32

1. INTRODUCCIÓN

La alimentación se considera una necesidad primaria regulada por factores sociales y culturales que varían geográficamente (Espeitx y Gracia, 1999). El consumo de carnes y lácteos ha incrementado a nivel mundial y con ello, su producción cada año. En 1993, el consumo total de carne de cerdo y res fue superior a 114 millones de toneladas, mientras que para el 2013, sobrepasaba los 190 millones de toneladas (Errecart, 2015). En el caso de los lácteos, la producción de quesos sumaba aproximadamente 8.7 millones de toneladas métricas en 1980, y más de 20 millones de toneladas métricas para el 2011 (Mikkelsen, 2014). El aumento en la producción expone la problemática del manejo de los residuos orgánicos que se generan (Bautista, 2010).

Zamorano cuenta con un complejo agroindustrial constituido por una serie de plantas procesadoras de alimentos, entre ellas la de cárnicos y lácteos. Los efluentes de ambas plantas pasan a una secuencia de lagunas de oxidación facultativas luego de ser recolectadas en fosas sépticas. El estudio más reciente en donde se cuantifica los efluentes de la planta de cárnicos se realizó en el 2013, reporta un estimado de la cantidad de aguas rojas desechadas del área de cosecha. Se encontró que el caudal de este efluente fue de 4.12 m³/día (López y De Arco, 2013). Por otro lado, en el 2015 se cuantificó el efluente de la planta de lácteos, sin hacer separación de cada sala de producción, obteniendo un caudal de descarga de 30.16 m³/día (Rocha, 2015).

El tratamiento de los residuos no solo busca impulsar la sostenibilidad mediante la reducción de impactos ambientales, sino que también procura la obtención de beneficios económicos con la generación de subproductos que puedan ser utilizados en procesos alternativos o con potencial energéticos como el biogás (Bautista, 2010). La digestión anaerobia es uno de los sistemas de tratamiento de residuos orgánicos más eficientes (Karthikeyan y Visvanathan, 2013). Consiste en la degradación bacteriológica anaerobia de compuestos complejos como los hidratos de carbono, lípidos y proteínas en elementos más simples como el CH₄, CO₂ y N-NH₃ (Delfosse, 2010).

La industria láctica se caracteriza por generar efluentes de suero con altas concentraciones de DBO y DQO, cuya relación es un indicador de biodegradabilidad (Orhon, Gorgon, Germirli y Artan, 1993). Estudios previos indican que el tratamiento anaerobio de suero presenta variaciones de pH que confieren inestabilidad al proceso, inhibiendo la fase acetogénica y metanogénica por acidificación (Kalyuzhnyi, Perez y Rodríguez, 1997). También se expone la reducida capacidad de sedimentación de lodos por la tendencia a generar material polimérico viscoso a bajas temperaturas (Malaspina, Stante, Cellamare y Tilche, 1995). Se reporta una baja productividad de metano lo cual está directamente relacionado con los valores de pH del medio (Kavacik y Topaloglu, 2010).

En sistemas de digestión anaerobia de suero se encontró relación entre la eficiencia de remoción de DQO, la producción de CH₄ y la carga orgánica utilizada. Por ejemplo, en sistemas de tratamiento por reactores de película líquida descendente, se encontró que el aumento de la carga orgánica reducía el Índice de Producción de Metano (IPM), la eficiencia en la remoción de DQO y SV (Berg y Kennedy, 1983). El escenario fue el mismo en sistemas utilizando reactores de lecho fluidizado (Boening y Larsen, 1982).

Para el diseño de un sistema de tratamiento de suero, diversos autores evaluaron su composición (Cuadro 1). Las variaciones de la composición del suero dependen de las características de la leche y el tipo de microorganismos utilizados en el procesamiento de queso (Revilla, 2009).

Cuadro 1. Caracterización de suero láctico desechado por la industria por diversos autores.

DQO (mg/L)	pH	ST (mg/L)	NTK (mg/L)	Referencias
55,000.0-70,000.0	6.4-6.2	ND	750.0-1,000.0	(Cheng, 2007)
55,800.0-59,200.0	ND	57,000.0	850.0-1,390.0	(Muñoz, Rico de la Hera y Rico, 2011)
68,814.0	4.9	ND	1462.0	(Malaspira, Stante, Cellamare y Tilche, 1995)
55,000.0-100,000.0	4.6-6.3	59,220.0	ND	(Antonelli et al., 2016)
66,000.0	ND	63,000.0	650.0	(Berg y Kennedy, 1983)

DQO= Demanda Química de Oxígeno.

ST= Sólidos Totales.

NTK= Nitrógeno Total Kjeldahl.

ND= No determinado.

Las aguas rojas obtenidas como resultado de los procesos de matanza presentan una composición proteica que favorece su tratamiento anaerobio (Bayr, Marianne, Kaparaju y Rintala, 2012). Sin embargo, se ha encontrado que la degradación de este tipo de residuo produce con frecuencia compuestos inhibitorios como nitrógeno amoniacal (N-NH₃), ácidos grasos volátiles y de cadena larga (Cuetos, Gómez, Otero y Morán, 2008).

Al aplicar sistemas de tratamiento para aguas rojas, como el reactor anaerobio de flujo ascendente con manto de lodos (UASB), se encontró que bajas cargas orgánicas presentan una mayor producción de CH₄, y que altas cargas orgánicas aumentan la eficiencia de remoción de DQO y SV (Borja, Banks, Wang y Mancha, 1998). Diversos estudios de digestión anaerobia de aguas rojas caracterizaron este tipo de residuo, mostrando pH que oscila en un rango de neutralidad (Cuadro 2).

Cuadro 2. Caracterización de las aguas rojas de ganado bovino y porcino desechada por la industria cárnica por diversos autores.

DQO (mg/L)	pH	ST (mg/L)	NTK (mg/L)	Referencias
5,200.0-11,400.0	6.8-7.8	ND	19.0-74.0	(Rajeshwari, Balakrishnan, Kansal, Lata y Nishore, 2000)
15,600.0-78,650.0	6.8-7.5	9,756.0-64,480.0	87.5-251.0	(López y De Arco, 2013)
7,800.0-15,900.0	6.6-6.9	ND	54.6-63.7	(Ruiz, Veiga, de Santiago y Blázquez, 1997)
2,000.0-6,200.0	6.3-6.6	ND	20.0-30.0	(Caixeta, Cammarota y Xavier, 2002)
2,941.0	6.7	2,244.0	174.0	(Massé y Masse, 2000)

DQO= Demanda Química de Oxígeno.

ST= Sólidos Totales.

NT= Nitrógeno Total Kjeldahl.

ND= No determinado.

La codigestión consiste en el tratamiento anaerobio de dos o más residuos en un mismo proceso (Astals, Batstone, Mata-Alvarez y Jensen, 2014). Esta metodología tiende a ser más eficiente que la digestión anaerobia operada con un solo residuo presentando incrementos en la producción de CH₄ a mayores cargas orgánicas, según la naturaleza de los residuos utilizados. Por ello, la selección de los residuos en codigestión tiene que considerar el balance de nutrientes, comportamiento del pH para cada residuo en procesos de digestión anaerobia y la ausencia de sustancias inhibitorias o la producción de las mismas en alguna fase del proceso de degradación (Mata-Alvarez, Dosta, Macé y Astals, 2011).

En procesos de codigestión, la remoción de DQO, SV y la producción de CH₄ varían positivamente por la relación C/N que se complementa al combinar sustratos de diferente naturaleza. Un estudio que combinó suero y estiércol de ganado lechero, mostró que al utilizar una proporción de 50%:50% se logra remover un 82% de DQO. Además, se presenta la posibilidad de aumentar la proporción de suero a un 65% del volumen total, sin necesidad de utilizar un corrector de pH (Comino, Riggio y Rosso, 2012).

Otro caso es el tratamiento de codigestión de aguas rojas con residuos de maíz. En este estudio se encontró que al combinar los residuos en proporciones de 85% aguas rojas:15% residuos de maíz se alcanzaba una producción de CH₄ de 0.13 m³/kg de SV. Al aumentar la proporción de residuos de maíz a 70% se alcanzó un rendimiento de 0.18 m³/kg de SV, lo cual muestra el beneficio del balance de nutrientes en los tratamientos de codigestión (Gómez, Martínez, Fierro, Otero y Cuetos, 2013).

Considerando que la digestión anaerobia representa una alternativa apropiada para el tratamiento de efluentes agroindustriales con alto contenido de materia orgánica, y la disponibilidad de residuos provenientes de la planta de cárnicos y lácteos en una misma zona del campus Zamorano, se plantean los siguientes objetivos para esta investigación:

- Determinar el volumen de suero lácteo y aguas rojas proveniente de las plantas agroindustriales de Zamorano.
- Evaluar el beneficio energético obtenido a partir de la codigestión de los efluentes en comparación a la digestión de éstos por separado.
- Calcular la eficiencia de los tratamientos de codigestión en la remoción de materia orgánica luego de completar el ciclo de digestión anaerobia.

2. METODOLOGÍA

Localización.

El estudio se realizó en la planta de cárnicos y planta de lácteos de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. La planta de cárnicos de Zamorano se divide en diversas zonas de producción, desde el sacrificio hasta el procesamiento de la carne y embutidos para su posterior comercialización (Figura 1). Cada zona de producción presenta efluentes con distinta carga orgánica y composición química. Para este estudio se consideró únicamente la zona de cosecha y la disposición de las aguas rojas generadas en una de las cajas de registro.



Figura 1. Fotografía de la planta de cárnicos, Zamorano

En la planta de lácteos de Zamorano se lleva a cabo el procesamiento y empaque de leche y derivados. Se generan distintos efluentes de cada zona de producción, unos con alto contenido de detergentes por las actividades de limpieza y otros con alto contenido de suero y materia orgánica, producto del procesamiento de queso. La estructura de la planta de lácteos comprende la recolección de los efluentes de todas estas actividades productivas en una caja de registro única. Además, posee una fosa séptica con trampas de grasa previo como tratamiento primario previo a su disposición en las lagunas de oxidación.

Dado que para cada tratamiento de codigestión era necesario utilizar suero puro, las muestras fueron obtenidas del efluente que sale directamente del tanque de procesamiento de queso (Figura 2). Lo anterior, para evitar la alteración de las características del suero por la presencia de detergentes o su dilución en agua.



Figura 2. Fotografía de la planta de lácteos, Zamorano

Cuantificación del efluente y recolección de muestras.

Se realizó la estimación del caudal para ambas plantas procesadoras. La planta de cárnicos realiza sacrificios de ganado porcino y bovino en días distintos, siendo el lunes y el miércoles de cada semana respectivamente. La cuantificación se llevó a cabo en la caja de registro donde se recolectan las aguas rojas a través del método de aforo directo, donde se midió el tiempo necesario para llenar una botella con capacidad de 2.0 litros en intervalos de 30 minutos. Se verificó el volumen recolectado en cada aforo en una probeta plástica graduada para 1.0 L. Otros métodos para estimar caudal como el uso de un correntómetro no fueron posibles dado las dimensiones de la caja de registro.

Se tomaron muestras puntuales cada 30 minutos, de cada muestra puntual se extraían 200 mL para formar una muestra compuesta de 1.0 L. En total, se obtuvieron cinco muestras compuestas en días distintos. De cada muestra compuesta se extrajo 250 mL en botes plásticos el mismo día de recolección, se identificó por origen y fecha, se agregó ácido sulfúrico (H_2SO_4) como preservante y se almacenó a una temperatura constante de 5 °C junto a las muestras sin preservar.

En el caso de la planta de lácteos, la producción de quesos se lleva a cabo de lunes a jueves, y en menor cantidad el sábado. La estimación del volumen de suero desechado se calculó a partir de las dimensiones del tanque en que se procesa el queso y el valor de la columna de suero líquido producido. A diario, el procesamiento de queso deja como resultado un lote de suero, por ello se recolectó cinco muestras puntuales de suero en la válvula de salida del tanque de procesamiento, extrayendo 200 mL de cada muestra puntual para formar una muestra compuesta de 1.0 L. En total, se obtuvo cinco muestras compuestas en días distintos.

Para la recolección del inóculo, se consideró el efluente del biodigestor de la granja porcina de Zamorano. Éste contiene microorganismos metanogénicos adaptados a altas cargas orgánicas. Se esperó una buena adaptación de los microorganismos a los medios de codigestión de suero y aguas rojas.

Caracterización del suero, aguas rojas e inóculo.

Se determinó la composición de los efluentes seleccionados a partir de las muestras compuestas almacenadas y el inóculo (Cuadro 3). Para el análisis de sólidos totales y sólidos volátiles se utilizaron las muestras sin adición de ácido, mientras que para el análisis de DQO y N-NH₃ se utilizaron las muestras con ácido. La caracterización del inóculo permitió establecer el aporte de DQO, SV y N-NH₃ para cada relación de codigestión.

Cuadro 3. Parámetros fisicoquímicos realizados para caracterizar aguas rojas, suero e inóculo.

Parámetro	Método	Referencias
DQO	8000. Método de digestión de reactor.	(Hach, 2000)
Sólidos totales	2540 B.	
Sólidos volátiles	2540 E.	
pH	4500-H ⁺ . Valor de pH.	(American Public Health Association [APHA], 2005)
Nitrógeno total	4500-Norg C. Método Kjeldahl.	
Nitrógeno amoniacal	4500-NH ₃ C. Método de destilación preliminar.	

La caracterización de estos parámetros permitió establecer la cantidad de aguas rojas y suero a utilizar en los reactores, dependiendo de la carga orgánica establecida. Los valores de DQO, ST y SV brindan escenarios de producción de CH₄ y la eficiencia de los tratamientos en remoción de carga orgánica. En el método colorimétrico de digestión de reactor se definen los mg de O₂ consumido por litro de muestra, digerido a 150 °C por dos horas en dicromato de potasio (Hach, 2000).

Los valores de sólidos totales se obtuvieron al ingresar crisoles tarados a 600 °C con 25 mL de muestra de agua roja o suero en un horno a 100 °C por 12 horas consecutivas. Posterior, se pesó la cantidad de materia seca en cada crisol en una balanza analítica. La concentración de sólidos volátiles se estimó al ingresar la materia seca de cada crisol a una mufla a 600 °C por dos horas hasta obtener las cenizas y registrar nuevamente su peso (APHA, 2005).

La importancia de determinar la concentración de inicial y final de N-NH₃ y pH radica en que ambos parámetros tienen el potencial de inhibir el proceso de digestión anaerobia y, por lo tanto, afectar la productividad de CH₄ y eficiencia de remoción de materia orgánica. El rango de concentraciones de N-NH₃ que puede provocar inhibición es 100 mg/L -1,100 mg/L (Salminen y Rintala, 2002). El valor de pH fue tomado en el laboratorio el mismo día en que se recolectó cada muestra compuesta. El N-NH₃ fue obtenido mediante destilación preliminar, que consiste en la transformación de todas las formas de nitrógeno a amoníaco (APHA, 2005).

Desarrollo de codigestión.

Implementación de reactores batch. A partir de los resultados obtenidos en la caracterización, se realizó el dimensionamiento y el montaje de los reactores batch (Figura 3). La capacidad total de cada batch es de 250 mL, pero se utilizó únicamente 200 mL en volumen líquido. Para el montaje, los 200 mL se distribuyeron en 100 mL que corresponde a inóculo, y 100 mL a aguas rojas y suero diluido en agua destilada.



Figura 3. Reactores batch alimentados con aguas rojas y suero a distintas proporciones y una carga orgánica de 1 g SV/L.

Diseño experimental. La carga orgánica de operación para todos los reactores fue de 1 g SV/L o 1 kg SV/m³, con diferentes proporciones de SV para aguas rojas y suero. Estas proporciones fueron combinadas y diluidas en agua destilada alcanzando los 100 mL, y se agregó 100 mL de inóculo hasta alcanzar un volumen de reactor de 200 mL. Se estableció el montaje de un control, utilizando un sustrato de dextrosa para verificar la viabilidad del inóculo mediante la producción de CH₄. Adicionalmente se incluyó el montaje de un blanco que consistió en 100 mL de inóculo + 100 mL de agua destilada, registrando su producción de CH₄ para corregir la producción de CH₄ de cada tratamiento.

Para determinar la cantidad de SV a utilizar de cada residuo, se calculó los gramos de SV con el que sería alimentado el reactor (Ecuación 1). A partir este valor, la proporción de SV establecido para cada residuo y la concentración de SV de las muestras compuestas más frescas de aguas rojas y suero, mediante la Ecuación 2 se calculó el volumen necesario de cada residuo para alcanzar la carga orgánica establecida. Finalizado el montaje de los reactores batch, se sellaron herméticamente para lograr condiciones anaerobias, permitiendo la adaptación y reproducción de los microorganismos presentes en el inóculo (Wilkie, Smith y Bordeaux, 2004).

$$\text{Total de SV (mg)} = \text{Carga orgánica (mg SV/L)} \times \text{Volumen de reactor (L)} \quad [1]$$

$$\text{Volumen (L)} = \frac{\text{Total SV (mg)} \times \text{Relación SV de residuo (\%)}}{\text{Concentración SV de residuo } \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)} \quad [2]$$

Para todos los tratamientos incluyendo el control y el blanco, se realizaron seis repeticiones y se identificaron según la carga orgánica, relación de SV y fecha de montaje (Cuadro 4). Una vez completos, los 42 reactores se ingresaron a una cámara incubadora en condiciones controladas. La temperatura de operación se mantuvo a 35 °C constantes, un valor intermedio del rango de temperatura para organismos mesófilos (Agrowaste, 2013).

Cuadro 4. Diseño experimental con la carga orgánica evaluada y la relación de SV para aguas rojas y suero.

Reactores batch	Relación SV aguas rojas (%) - suero (%)	Repeticiones
Carga 1 g SV/L	0-100	6
	25-75	6
	50-50	6
	75-25	6
	100-0	6
Control (Biol + dextrosa)		6
Blanco (Biol)		6

Mediciones de metano. Su valor se obtuvo mediante un método volumétrico, utilizando Hidróxido de Potasio (KOH) contenido en un reactor. El KOH tiene la característica de transformar gases como el CO₂ en carbonatos y permite el desplazamiento del CH₄ (Wilkie, Smith y Bordeaux, 2004). Se utilizó una bureta graduada, registrando el volumen inicial previo al desplazamiento de KOH y el volumen final de KOH desplazado en la bureta. La diferencia en el volumen final y el inicial de KOH corresponde a los mL de CH₄ producidos por el reactor en cada tratamiento de codigestión (Figura 4).

Las mediciones se realizaron cada tres días hasta mostrar una producción de CH₄ menor a 0.5 mL. Cuando la producción de CH₄ es menor a 0.5 mL en cuatro días de medición consecutivos, indica el agotamiento de alimento para los microorganismos o la presencia de sustancias inhibitorias (Figura 7). Esta característica fue observada en la producción de CH₄ en el Control 2 durante las primeras cuatro mediciones. Además, se consideraron factores como la temperatura ambiental (°C) y la presión atmosférica (mm Hg) para cada día de medición.



Figura 4. Cuantificación de CH₄ por volumetría de KOH.

Corrección de producción de CH₄. Con los valores de CH₄ generado por reactor y por tratamiento, se realizó la corrección con los valores de temperatura y presión atmosférica. Para obtener la producción de CH₄ a condiciones normales, los valores de temperatura se convirtieron a grados Kelvin y la presión atmosférica se utilizó en mm Hg. Con ello, se calculó la corrección para cada día de medición, por reactor y por tratamientos aplicando la Ecuación 3.

$$V_{\text{corregido (mL)}} = \frac{V_{\text{corrección blanco (mL)}} \times P_{\text{atmosférica (mm Hg)}} \times T_{\text{condiciones normales (K)}}}{P_{\text{condiciones normales (mm Hg)}} \times T_{\text{atmosférica (K)}}} \quad [3]$$

$V_{\text{corregido}}$ = volumen de CH_4 producido en condiciones normales (mL).

$V_{\text{corrección blanco}}$ = Volumen CH_4 por tratamiento (mL) – Volumen de CH_4 del control (mL).

$P_{\text{atmosférica}}$ = presión atmosférica al momento de la medición (mm Hg).

$T_{\text{condiciones normales}}$ = temperatura absoluta en condiciones normales (K).

$P_{\text{condiciones normales}}$ = presión atmosférica absoluta en condiciones normales (mm Hg).

$T_{\text{atmosférica}}$ = temperatura absoluta al momento de la medición (K)

Índice de Producción de Metano (IPM). Con los valores de producción de CH_4 corregidos y la construcción de curvas acumuladas de producción, se calculó el Índice de Producción de Metano (Ecuación 4). Este valor nos indica la degradabilidad del sustrato para los microorganismos, y se ve reflejado en la producción de CH_4 por kg de SV.

$$\text{IPM} \left(\frac{\text{m}^3 \text{CH}_4}{\text{kg SV}} \right) = \frac{\text{CH}_4 \text{ acumulado (mL)}}{\text{Volumen reactor (mL)} \times \text{Carga orgánica} \left(\frac{\text{kg SV}}{\text{m}^3} \right)} \quad [4]$$

Eficiencia de remoción de carga orgánica. Al alcanzar una producción de CH_4 menor a 0.5 mL en cuatro mediciones consecutivas, los reactores fueron abiertos para la caracterización del efluente o inóculo (Cuadro 3). El valor inicial de los reactores se calculó en base a la concentración de SV y DQO de cada residuo e inóculo utilizado (Ecuación 5). El valor final de los mismos parámetros se obtuvo mediante la caracterización del efluente de cada reactor al finalizar el tratamiento de codigestión. Con estos valores, se determinó el porcentaje de remoción de SV, ST y DQO a través de la Ecuación 6.

$$\text{Parámetro inicial (mg)} = \sum \text{residuo puro (mg/L)} \times \text{volumen de residuo utilizado (L)} \quad [5]$$

$$\text{Eficiencia de remoción (\%)} = \frac{\text{Parámetro inicial (mg)} - \text{Parámetro final}}{\text{Parámetro inicial (g)}} \times 100 \quad [6]$$

Para cada tratamiento, se calculó la producción de CH_4 por cada g de SV removido, obteniendo así un valor que indica la transformación de la materia orgánica en metano. Por ello, se utilizó la producción de CH_4 de todo el tiempo de incubación, la cantidad de SV removida y el volumen de cada reactor al final del tratamiento. La relación entre los valores más altos en remoción de SV y los más bajos en producción de CH_4 indican la transformación de la materia orgánica en otros gases como el CO_2 .

Se estimó el aumento de N-NH_3 en cada tratamiento a partir la diferencia en la concentración final e inicial. La concentración final para cada tratamiento es el resultado de la transformación de materia nitrogenada como proteínas en aminoácidos (Mata-Alvarez, Macé y Llabrés, 2000). La concentración inicial por tratamiento se determinó a partir del volumen y concentración de N-NH_3 del inóculo (Ecuación 7), mientras que para la concentración final se consideraron los valores obtenidos en la caracterización del efluente o inóculo de cada reactor.

$$\text{N-NH}_3 \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{(\text{Vol. inóculo (L)} \times \text{N-NH}_3 \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right)) + (\text{Vol. residuo (L)} \times \text{N-NH}_3 \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right))}{\text{Vol. inóculo (L)} + \text{Vol. residuo (L)}} \quad [7]$$

Análisis estadístico. Los resultados se analizaron haciendo uso del programa SPSS. Inicialmente, se verificó la distribución normal de los valores obtenidos de IPM y eficiencia de remoción de SV a través de la prueba Shapiro-Wilk, seguido por la creación de diagrama de cajas. Luego, se realizó una comparación de medias para ambos parámetros a través del modelo estadístico ANDEVA y pruebas post hoc Tukey para definir si había diferencia significativa entre tratamientos y con estos resultados se prosiguió a determinar el mejor tratamiento de digestión y codigestión anaerobia.

Beneficio energético.

La estimación del beneficio energético se realizó en base a tres escenarios. El primero consistió en el aprovechamiento de todo el suero y aguas rojas que salen de ambas plantas, a un IPM específico. El segundo y tercer escenario se realizaron con el fin de evaluar el beneficio energético obtenido en la digestión de aguas rojas y suero por separado, comparado con el tratamiento de codigestión seleccionado en el primer escenario. Para este cálculo se utilizó el poder calorífico del CH₄ a 35.78 kJ/L.

Fue necesario la cuantificación de la demanda de combustible de ambas plantas, utilizado para el calentamiento de agua cuyo uso abarca actividades de limpieza y otros procesos productivos. Se obtuvieron los registros de consumo para todos los meses del año 2016 a través de la Oficina de Compras y Suministros de Zamorano. Se determinó el volumen promedio mensual de consumo en 429.16 galones para la planta de cárnicos, y 1,425 galones para la planta de lácteos. La densidad del diésel se reporta en 0.81 kg/L y el poder calorífico en 43,300 kJ/kg. En términos económicos, el valor del galón de diésel oscila los HNL 86.57 con leves variaciones entre semanas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los efluentes en cada una de las plantas de producción de Zamorano se ven directamente afectados por la rotación de estudiantes en el Aprender Haciendo. En la planta de lácteos y cárnicos, los estudiantes permanecen durante tres semanas. Las actividades dentro de cada planta permiten acoplar al estudiante al sistema productivo y cadena de valor.

Cuantificación del efluente.

En la planta de lácteos, la cuantificación del volumen de suero se realizó durante el mes de mayo y junio. Se encontró un promedio semanal de 11.63 m^3 , presentando valores mínimos de 11.58 m^3 y máximos de 11.69 m^3 (Figura 5). Los valores mínimos se presentan con mayor frecuencia los días sábado, que corresponde al día con menor producción de queso, sin tomar en consideración el viernes y el domingo donde no se fabrica este producto. Rocha (2015), indicó que la composición y el volumen de los efluentes que llegan a la caja de registro de la planta de lácteos se ve directamente afectado por las descargas de suero.

El volumen de suero generado no se ve influenciado por las actividades de Aprender Haciendo, tampoco muestra demasiada variación entre semana lo cual indica la homogeneidad del efluente. La composición del suero si es influenciado por las características de la leche utilizada y el tipo de queso producido (Cuadro 5).

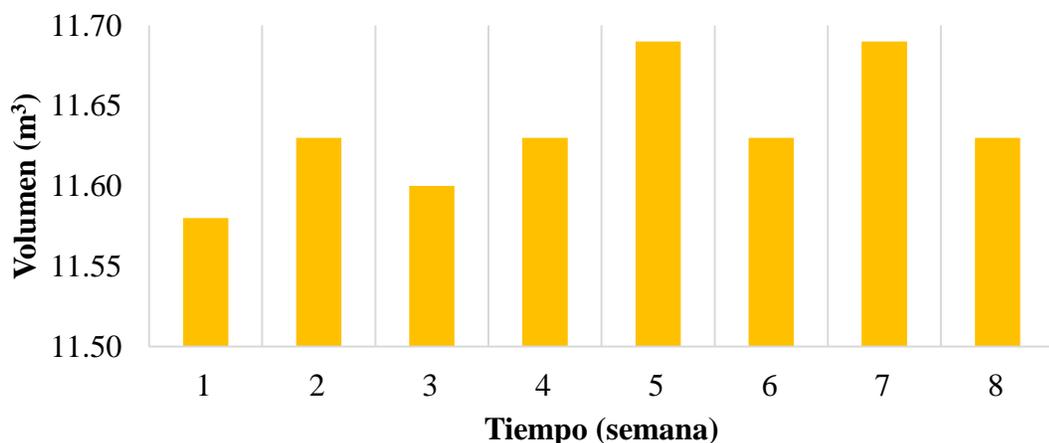


Figura 5. Volumen de suero desechado por semana de la planta de lácteos, Zamorano.

Considerando que el caudal promedio del efluente que sale de la planta de lácteos semanalmente es de 150 m³, se observa un aporte del 8% de aguas residuales de la planta de lácteos por producción de suero y limpieza de maquinaria. El resto del efluente generado en toda la planta corresponde al agua utilizada en la producción de leche (Rocha, 2015). A pesar de su aporte volumétrico mínimo, el impacto por incremento de la DQO y SV al incorporar el suero es de los más altos en toda la cadena de producción. Los efluentes en plantas de procesamiento de lácteos tienen como fuente primaria de contaminación el suero generado en la producción de los distintos quesos, seguido por el uso de detergentes y desinfectantes (Orhon, Gorgon, Germirli y Artan, 1993).

Cuadro 5. Rendimientos en conversión de leche por tipo de queso procesado en Zamorano (Revilla, 2009).

Tipo de queso	Rendimiento
Queso Cheddar	10.5%
Queso Crema especial	14.0%
Queso Crema picante	12.0%
Queso Crema sencillo	12.0%
Queso Dambo	11.5%
Queso Zamodelfia	28.0%
Queso Zamorella	10.0%

Las mediciones en la planta de cárnicos se realizaron durante siete semanas, los días lunes y miércoles que corresponde al sacrificio de cerdos y reses, respectivamente. Se observó variaciones en el tiempo necesario para lavar la sangre derramada en el piso, dependiendo del tipo de animal sacrificado. En promedio, la planta de cárnicos desecha un volumen semanal de 8.42 m³ de aguas rojas, con variaciones mínimas entre semana. Esto indica que el volumen de aguas rojas no es influenciado por el tipo de animal cosechado y que el número de animales sacrificados por semana es similar (Figura 6).

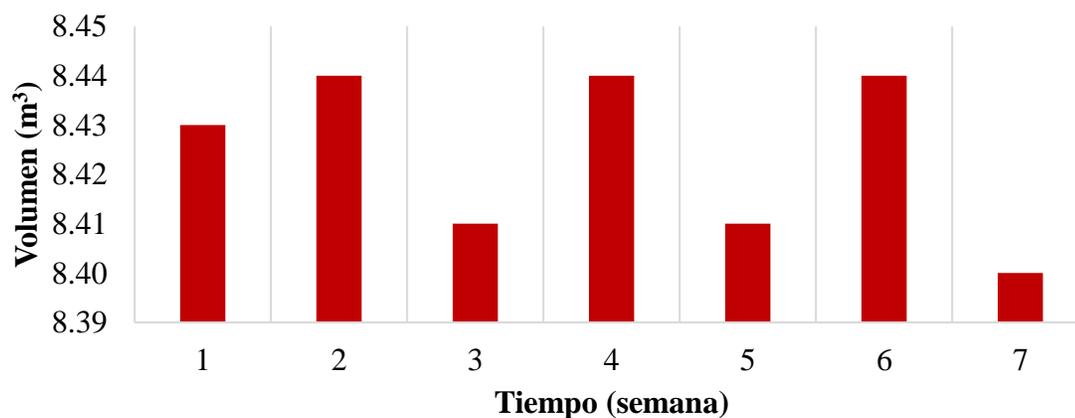


Figura 6. Volumen de aguas rojas desechadas por semana de la planta de cárnicos, Zamorano.

Caracterización del suero, aguas rojas e inóculo.

La composición del suero tiene una estrecha relación de acuerdo al tipo de queso procesado (Cuadro 6). Durante su recolección, fue notable la presencia de partículas sólidas disueltas de pequeño a gran tamaño y diferencias en características como el aroma y color. El valor promedio de pH encontrado fue de 6.42, característica de un suero dulce (Cheng, 2007). A pesar que no se encuentra en el rango ideal para un proceso de digestión anaerobia, el rango de pH encontrado en el suero no presentaría problemas para un proceso de codigestión anaerobia (Comino, Riggio y Rosso, 2012).

Rangos de pH similares a los obtenidos se presentan en un estudio de codigestión donde se caracterizó suero y estiércol de ganado lechero, manteniendo rendimientos de hasta un 95% de reducción en el contenido de DQO (Kavacik y Topaloglu, 2010). Por otro lado, el rango de temperatura permite el ingreso del efluente a un digestor sin poner en una situación crítica las condiciones mesofílicas del mismo (Agrowaste, 2013). Los valores de DQO encontrados se encuentran en un rango de 58,700 mg/L y 60,400 mg/L. Este rango de concentración es similar al registrados en otros estudios (Cuadro 1).

El suero presenta la característica de contener material orgánico fraccionado en azúcares y proteínas. Está compuesto principalmente por azúcares como la lactosa, la cual constituye un 70% del contenido de ST (Panesar, Kennedy, Gandhi y Bunko, 2007). Otro de los componentes son las proteínas, cuyo contenido es el 10% de los ST. De todas las proteínas presentes, un 50% corresponde a la β -lactoglobulina y en menor proporción las α -lactoalbúminas, donde ambas son la fuente de nitrógeno (Kim, Chism y Mangino, 1987).

Cuadro 6. Caracterización del suero proveniente de la planta de lácteos de Zamorano.

Parámetro	Unidad	Promedio	Desviación estándar	Rango
DQO	mg/L	58,700.0	2,700.0	57,700.0 - 60,400.0
Sólidos totales	mg/L	77,860.0	27,732.0	50,412.0 - 105,592.0
Sólidos volátiles	mg/L	58,648.0	13,308.0	45,340.0 - 63,608.0
NTK	mg/L	820.0	ND	ND
pH	ND	6.5	0.3	6.3 - 6.7
Temperatura	°C	31.4	2.3	29.1 - 32.7
C/N	ND	39.0	ND	ND

ND= No determinado.

En el caso de la planta de cárnicos, la composición de las aguas rojas se relaciona con la cantidad de agua utilizada en la limpieza de cada animal y el lavado de la sangre que se acumula en el piso luego del sacrificio (Cuadro 7). Durante la recolección de muestras se observaba la presencia de material orgánico e inorgánico de gran tamaño como pelo, piel y coágulos de sangre. El rango de pH para las aguas rojas está entre 7.45 y 7.65, óptimo para el tratamiento de digestión anaerobia y complementario para el tratamiento de codigestión con suero (Gómez et al., 2013).

En el 2013, previo a la remodelación de la planta de cárnicos se caracterizó las aguas rojas obteniendo un rango de pH que coincide con los encontrados en este estudio (López y De Arco, 2013). Massé y Masse (2001), evaluaron el efecto de la temperatura y pH en digestión anaerobia por reactores de alimentación continua, concluyendo que a una temperatura operativa de 30 °C y a un pH de 7.5 se alcanzan los mayores rendimientos en remoción en DQO en distintas cargas orgánicas, por lo que no es necesario regular el pH y temperatura encontrados.

En el contenido orgánico, la concentración promedio de DQO, ST y SV es de 14,444 mg/L, 13,908 mg/L y 12,576 mg/L respectivamente. Estos datos son menores a los encontrados por López y De Arco (2013), donde los valores promedios de concentración de DQO, ST y SV fueron de 34,142 mg/L, 30,103 mg/L y 28,699 mg/L respectivamente. Esto se debe a la aplicación de rejillas metálicas finas que separan las partículas de gran tamaño.

Cuadro 7. Caracterización de las aguas rojas de la planta de cárnicos de Zamorano.

Parámetro	Unidad	Promedio	Desviación estándar	Rango
DQO	mg/L	17,420.0	2,300.0	2,640.0 - 19,200.0
Sólidos totales	mg/L	16,061.0	2,993.0	5,252.0 - 17,892.0
Sólidos volátiles	mg/L	14,923.0	2,074.0	3,060.0 - 16,972.0
NTK	mg/L	292.5	ND	ND
pH	ND	7.6	0.1	7.5 - 7.7
Temperatura	°C	26.4	2.6	24.4 - 29.0
C/N	ND	26.0	ND	ND

ND= No determinado.

El inóculo tomado del biodigestor de cerdos se caracteriza por operar con estiércol vacuno a cargas mayores a 1 g SV/L, y por su adaptación a la presencia de compuestos inhibidores como el N-NH₃ y caídas de pH. La poca variabilidad en la composición del inóculo indica un rendimiento uniforme en degradación de materia orgánica a pesar de las altas concentraciones de N-NH₃ (Cuadro 8).

Cuadro 8. Caracterización del inóculo extraído del biodigestor de cerdos de Zamorano.

Parámetro	Unidad	Promedio	Desviación estándar	Rango
DQO	mg/L	1,067.0	33.0	1,010.0 - 1,100.0
Sólidos totales	mg/L	1,884.0	61.0	1,823.0 - 1,900.0
Sólidos volátiles	mg/L	1,168.0	518.0	823.0 - 1,687.0
N-NH ₃	mg/L	334.9	1.2	334.3 - 336.1
NTK	mg/L	30.0	ND	ND
pH	ND	7.5	0.2	7.4 - 7.6
C/N	ND	13.0	ND	ND

ND= No determinado.

Evaluación de estabilidad en reactores batch.

Determinación del Índice de Producción de Metano. Para la determinación del IPM, se registró la producción diaria de CH₄ para cada reactor, los cuales fueron montados a una carga orgánica conocida (1 g SV/L). Teóricamente, la producción de CH₄ de tratamientos a una misma carga orgánica debe ser similar. En este estudio se encontró que la producción diaria de CH₄ para cada tratamiento de codigestión fue diferente (Figura 7), donde los reactores con mayor contenido de suero mostraron tendencia a producir un menor volumen de CH₄.

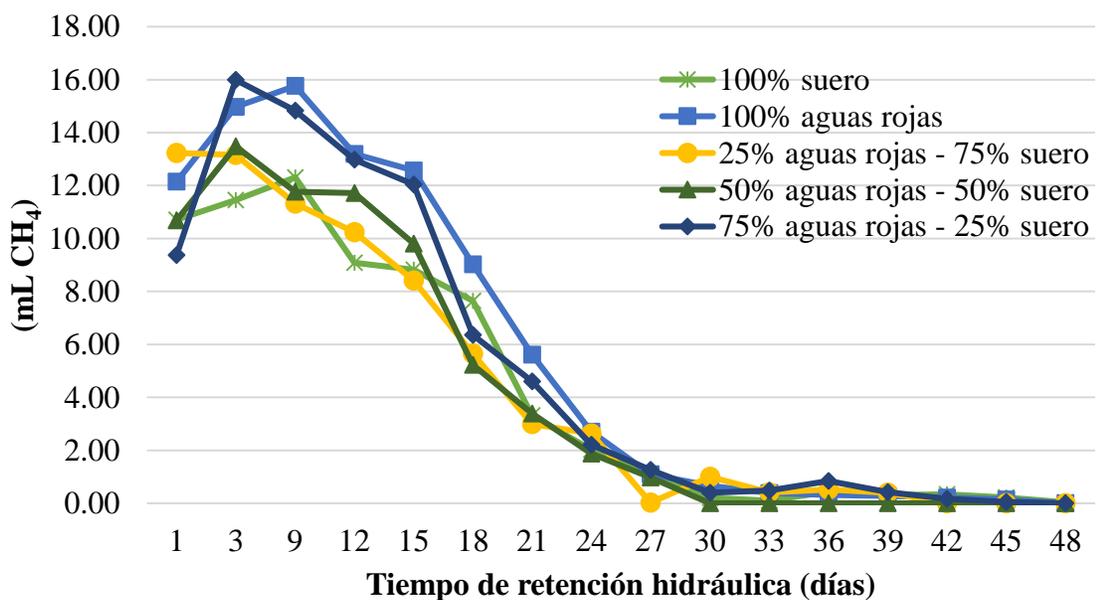


Figura 7. Producción diaria de CH₄ para cada tratamiento.

En el caso de los tratamientos con mayor contenido de aguas rojas, la producción de CH₄ fue mayor. Esto se complementa con un estudio en el que se combinó aguas rojas con residuos agrícolas, donde la proporción con mayor producción de metano fue 50% aguas rojas 50% residuos agrícolas (Pagés et al., 2014). Con ello, se encuentra que al aumentar el contenido de aguas rojas aumenta la producción de CH₄ que también es proporcional al aumento en la concentración de N-NH₃ (Cuadro 9).

Con los datos diarios de producción de CH₄ corregidos, se estimó la producción acumulada para todo el tiempo en que los reactores batch fueron incubados (Figura 8). El TRH para cada tratamiento se estableció considerando el tiempo en que se alcanzó una producción acumulada de CH₄ mayor o igual al 90%. Con ello, todos los tratamientos alcanzaron dicha producción en el día 21, reduciendo el tiempo de codigestión en un 56%.

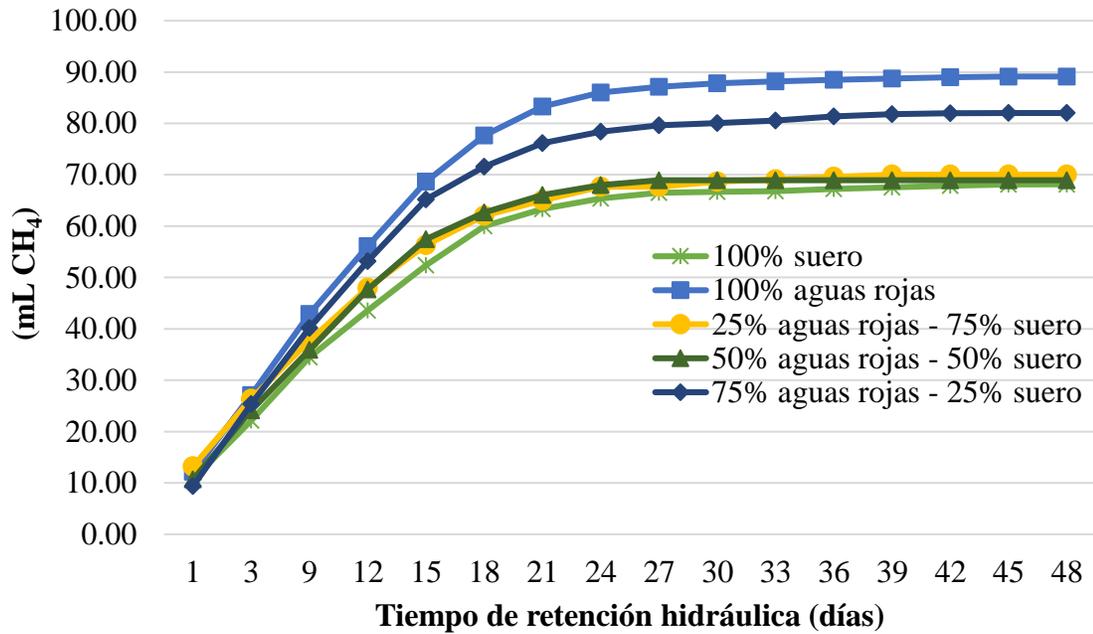


Figura 8. Producción acumulada de CH₄ para cada tratamiento.

A partir de la curva acumulada de producción de CH₄ corregida en todo el proceso de codigestión, se calculó el IPM (Figura 9). El IPM más alto se obtuvo en el tratamiento de digestión anaerobia 100% aguas rojas con 0.44 m³ CH₄/kg SV, seguido por el tratamiento de codigestión anaerobia 75% aguas rojas – 25% suero con 0.42 m³ CH₄/kg SV. El aumento en la concentración de N-NH₃ se evidenció a niveles que podrían ocasionar inhibición, sin embargo, este escenario se descarta considerando que el mayor IPM se obtuvo en los tratamientos con mayor concentración de N-NH₃ (Cuadro 9).

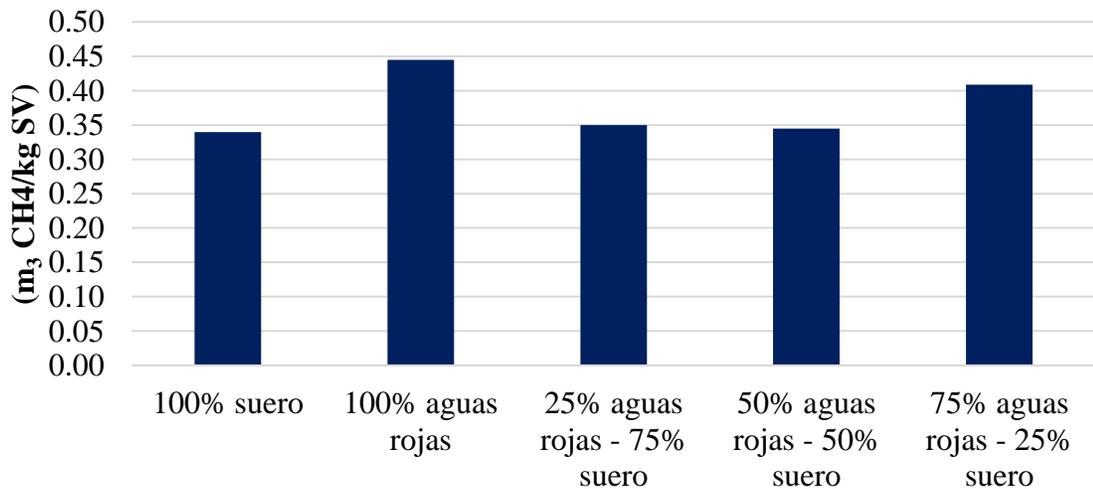


Figura 9. Índice de Producción de Metano para cada tratamiento.

Cuadro 9. Caracterización de los efluentes para cada tratamiento de digestión y codigestión.

Tratamiento	IPM (m ³ CH ₄ /kg SV)	DQO (mg/L)	ST (mg/L)	SV (mg/L)	N-NH ₃ (mg/L)	pH
100 % suero	0.34	304.0	1,188.0	595.0	459.5	7.1
100 % aguas rojas	0.44	336.0	1,520.0	647.0	476.5	7.5
25% aguas rojas - 75% suero	0.35	341.0	1,317.0	619.0	469.9	7.0
50% aguas rojas - 50% suero	0.34	395.0	1,301.0	633.0	492.5	7.2
75% aguas rojas - 25% suero	0.42	433.0	1,449.0	673.0	618.1	7.2

Eficiencia de remoción de carga orgánica. La remoción de carga orgánica fue evaluada en base a los valores iniciales y finales de los parámetros SV y DQO. En la remoción de SV se encontró que los tratamientos más eficientes son los que contienen un mayor volumen de suero, mismo escenario que en la eficiencia de remoción de DQO (Figura 10). Con estos valores es posible definir si la planta lácteos y cárnicos están descargando sus efluentes según la Normativa Ambiental Hondureña.

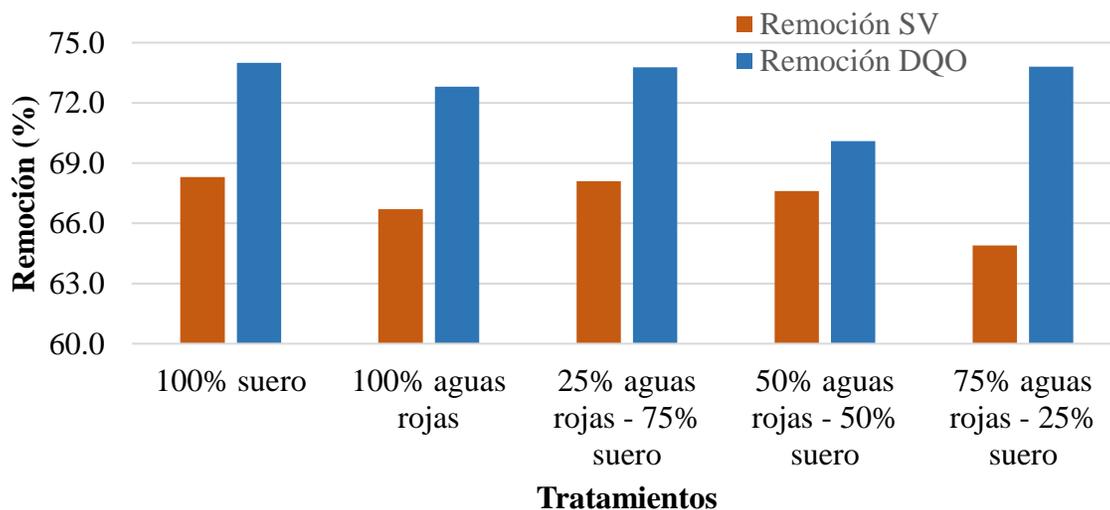


Figura 10. Comparación de eficiencia de remoción de SV y DQO para cada tratamiento.

Se comprueba que un mayor IPM no siempre indica una alta eficiencia en remoción de materia orgánica. Para aquellos tratamientos que presentan un bajo IPM y una alta eficiencia en remoción de materia orgánica, se atribuye este comportamiento a la relación CN y a la disponibilidad de micronutrientes en el medio. Además, se debe considerar que el suero no solo presenta una alta cantidad de materia orgánica volátil, también está compuesto por bacterias facultativas conocidas como *Lactococcus lactis* ssp. *lactis* y *Lactococcus lactis* ssp. *cremoris*, que son utilizadas en el procesamiento de quesos (Revilla, 2009).

El metabolismo de estas bacterias les permite generar ácido láctico y CO₂ a partir de los azúcares presentes en el medio (Monnet, Attar y Corrieu, 2002). Considerando que de todos los ST presentes en el suero más del 70% corresponde a azúcares como la glucosa, su degradación entra en competencia por las bacterias lácticas y las bacterias del inóculo, donde las bacterias lácticas producen CO₂ y las bacterias metanogénicas CH₄.

Obtenido los valores de remoción de SV, se calculó la producción de CH₄ por cada unidad de SV removido. Así, se estableció una relación entre la producción acumulada de CH₄ y la remoción de SV de cada tratamiento (Cuadro 10). A diferencia del IPM que brinda un valor hipotético de producción de CH₄, este valor permite conocer la transformación de cada unidad de SV removido en CH₄ lo cual indica a su vez qué tan eficiente es un tratamiento en la reducción de materia orgánica volátil. Para ello, este parámetro indica que los valores más altos en producción de CH₄ corresponden a aquellos tratamientos cuya eficiencia en reducción de materia orgánica volátil fue menor.

Cuadro 10. Comparación entre IPM y producción de CH₄ por kg de SV removido.

Tratamiento	IPM (m ³ CH ₄ /kg SV)	Remoción SV (%)	(m ³ CH ₄ /kg SV removido)
100 % suero	0.34	68.30	0.47
100 % aguas rojas	0.44	66.70	0.52
25% aguas rojas - 75% suero	0.35	68.10	0.46
50% aguas rojas - 50% suero	0.34	67.60	0.49
75% aguas rojas - 25% suero	0.42	64.90	0.53

Análisis estadístico. Los valores del IPM y remoción de SV se definieron como paramétricos. Con la aplicación de un ANDEVA, se encontró que sí existe diferencia significativa entre tratamientos. La prueba Tukey y el modelo de comparación múltiple establecen que los tratamientos 100% aguas rojas y 75% aguas rojas – 25% suero presentan el mayor IPM. Con ello, los tratamientos se agruparon en conjuntos homogéneos donde se encontró que los tratamientos 100% aguas rojas y 75% aguas rojas – 25% suero no presentan diferencia significativa entre sí, y que sí hay diferencia significativa en ambos con el resto de tratamientos (Cuadro 11). Los mejores tratamientos en IPM fueron definidos por los resultados de la prueba Tukey, estos corresponden a las proporciones 100% aguas rojas y 75% aguas rojas – 25% suero (Figura 11).

Cuadro 11. Prueba de normalidad, prueba de comparación de medias y prueba post hoc para conjuntos homogéneos.

Tratamiento	Shapiro-Wilk	ANOVA	Conjunto 1	Conjunto 2
100 % suero	.452	0.001	.3400	
100 % aguas rojas	.261			.4400
25% aguas rojas - 75% suero	.753		.3500	
50% aguas rojas - 50% suero	.201		.3400	
75% aguas rojas - 25% suero	.399			.4200

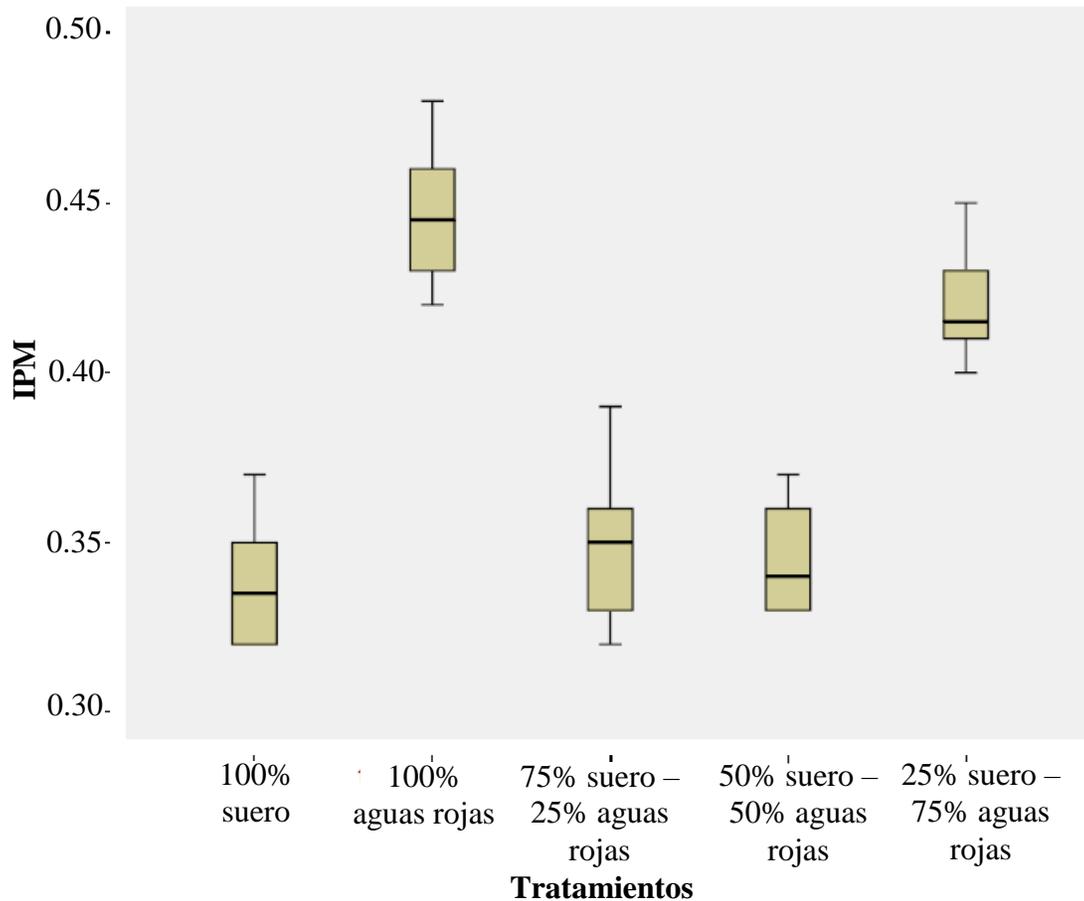
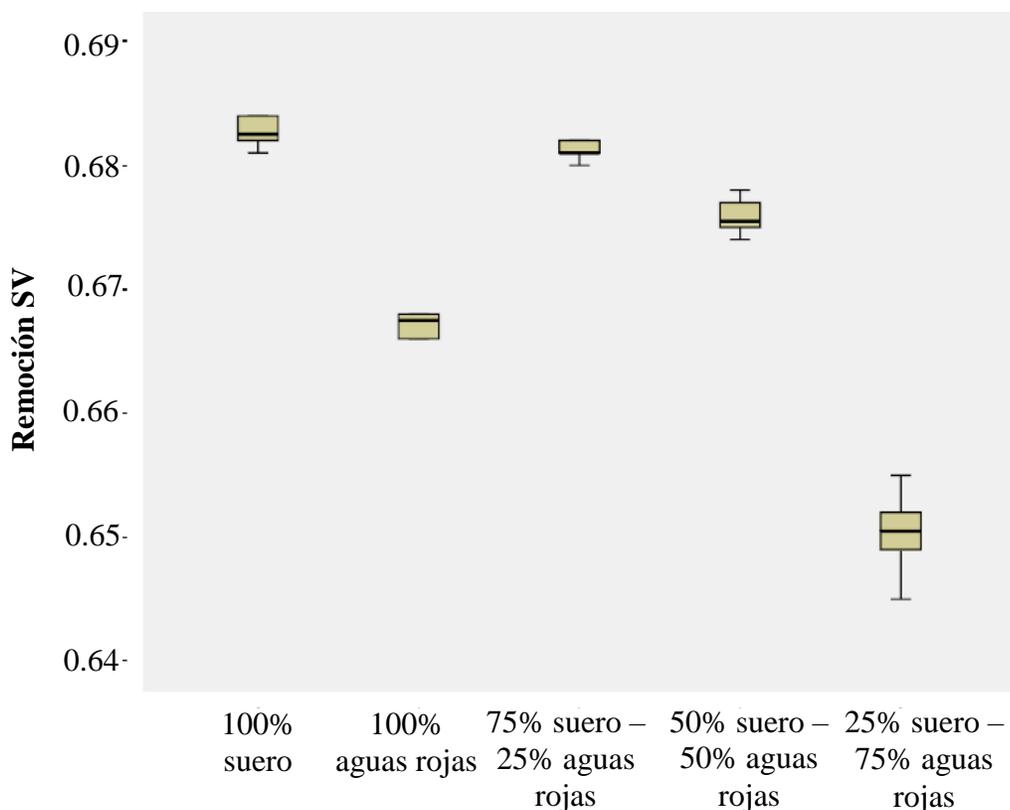


Figura 11. Diagrama de cajas para IPM de los tratamientos de digestión y codigestión.

En remoción de SV, los resultados del ANDEVA indican que todos los tratamientos son estadísticamente diferentes entre sí. En la prueba post hoc de comparación múltiple, se encontró que los tratamientos homogéneos y a la vez con mayor eficiencia en remoción de carga orgánica fueron los tratamientos con mayor contenido de suero (Cuadro 12). Con estos resultados, se define que el tratamiento de digestión anaerobia más eficiente en remoción de SV fue 100% suero, y 75% suero – 25% aguas rojas en codigestión anaerobia (Figura 12).

Cuadro 12. Prueba de normalidad y prueba de medias.

Tratamiento	Shapiro-Wilk	ANOVA	Conjunto			
			1	2	3	4
100 % suero	.801	0.001	0.683			
100 % aguas rojas	.141			0.667		
25% aguas rojas - 75% suero	.858		0.681			
50% aguas rojas - 50% suero	.860				0.676	
75% aguas rojas - 25% suero	.946					0.650



Tratamientos

Figura 12. Diagrama de cajas para remoción de SV de los tratamientos de digestión y codigestión.

Beneficio energético.

El tratamiento de codigestión con mayor IPM no es aplicable debido a la cantidad de residuo desechado en cada planta. Con ello, al cuantificar la cantidad total de suero y aguas rojas desechado de ambas plantas se obtiene que el escenario aplicable es el tratamiento de codigestión 75% suero – 25% aguas rojas. El IPM encontrado para esta proporción fue de $0.35 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$ con una remoción de SV de 68.1%, su aplicación tendría como beneficio la solución ambiental de los desechos generados al reducir su carga orgánica. Para el segundo escenario, se consideró el uso de todo el suero generado en la planta de lácteos semanalmente, con un IPM de $0.34 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$ y una eficiencia de remoción de SV de 68.3%. Para el tercer escenario consistió en el aprovechamiento de las aguas rojas que salen de la planta de cárnicos por semana, con un IPM de $0.44 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$ y una eficiencia de remoción de SV de 66.7% (Cuadro 13).

Cuadro 13. Estimación de los beneficios energéticos y económicos en tres escenarios de tratamiento de residuos de acuerdo a su disponibilidad.

Parámetro	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Tratamiento	75% S–25% AR	100% S	100% AR
Aguas rojas (kg SV/semana)	134.40	NA	134.40
Suero (kg SV/semana)	730.40	730.40	NA
IPM (m ³ CH ₄ /kg SV)	0.35	0.34	0.44
Producción CH ₄ (m ³ /año)	14,528.60	11,920.10	2,838.50
Poder calorífico CH ₄ (kJ/L)	35.78	35.78	35.78
Energía anual por CH ₄ (kJ)	519,833,308.00	426,501,178.00	101,561,530.00
Combustible lácteos (L/año)	NA	64,638.00	NA
Combustible cárnicos (L/año)	NA	NA	19,467.00
Combustible ambas plantas (L/año)	84,105.00	NA	NA
Energía cubierta lácteos (%)	23.00 ^γ	19.00	NA
Energía cubierta cárnicos (%)	76.13 ^ψ	NA	14.90
Energía cubierta para ambas plantas (%)	17.00	NA	NA
Ahorro por consumo de combustibles (US\$/año)	14,383.17	11,800.00	2,810.00

NA= No aplica.

γ= Aprovechamiento único para planta de lácteos.

ψ= Aprovechamiento único para planta de cárnicos.

S= Suero.

AR= Aguas rojas.

En general, el Escenario 1 presentó las mejores características en producción CH₄ y ahorro por combustibles para su implementación, al aplicarlo y aprovechar en una sola planta el CH₄ generado, se alcanza un beneficio económico mayor en comparación del aprovechamiento del CH₄ generado en los tratamientos de digestión anaerobia. Por otro lado, los tratamientos de digestión anaerobia presentan únicamente la potencialidad de reducir las concentraciones de SV y dar solución ambiental, como es el caso del Escenario 2 y Escenario 3.

4. CONCLUSIONES

- La cuantificación de efluentes denota que la variabilidad semanal en el volumen de aguas rojas y suero es de 0.2 y 0.5 respectivamente. Además, cuenta con características homogéneas que facilitan la proyección de sistemas de tratamiento anaerobio.
- La mayor productividad de CH₄ se obtuvo en los tratamientos con mayor contenido de aguas rojas. En Zamorano, los tratamientos de codigestión con el potencial de brindar un beneficio energético no son aplicables por la cantidad de residuos generados en ambas plantas. Con esto, se propone como tratamiento aplicable la codigestión de aguas rojas y suero a una proporción de 25 – 75, donde se aprovecha en totalidad el suero y aguas rojas generados.
- Los tratamientos que brindan una solución ambiental son aquellos con mayor contenido de suero, donde la remoción de SV fue superior a los tratamientos con mayor contenido de aguas rojas. Al comparar la codigestión de aguas rojas y suero a una proporción de 25 – 75 con la digestión anaerobia de aguas rojas y suero, se encontró que en codigestión se alcanza un mayor beneficio energético en caso se aproveche en una sola planta el CH₄ generado y la mayor eficiencia en remoción de SV para ambos efluentes.
- Las mejores eficiencias en remoción de carga orgánica se alcanzan al utilizar una mayor cantidad de suero en relación a aguas rojas en tratamientos de codigestión. El incremento en la remoción de materia orgánica no indica una mayor productividad de metano para estos sustratos.

5. RECOMENDACIONES

- En caso se considere la aplicación de un sistema de codigestión como alternativa de tratamiento de los efluentes de la planta de lácteos y cárnicos, se recomienda evitar que los operarios diluyan las aguas rojas y suero con el resto de aguas residuales generadas en las plantas.
- En caso que el enfoque de esta solución ambiental sea suplir la demanda energética de ambas plantas, será necesario incrementar la cantidad de residuos con fuentes alternativas.
- Para estudios posteriores, se propone evaluar el efecto de los microorganismos presentes en la corriente de suero para conocer su influencia en los tratamientos de digestión anaerobia.

6. LITERATURA CITADA

- Agrowaste. (2013). *Digestión anaerobia*. Madrid: Agrowaste.
- American Public Health Association [APHA]. (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (21 ed.). Washington, DC.: American Public Health Association.
- Antonelli, J., Lindino, C., Rodrigues de Azevedo, J., Melegari de Souza, N., Cremonez, P. y Rossi, E. (2016). Biogas production by the anaerobic digestion of whey. *Revista de Ciencias Agrarias*, 39, pp. 463-467.
- Astals, S., Batstone, D., Mata-Alvarez, J. y Jensen, D. (2014). Identification of synergistic impacts during anaerobic co-digestion of organic wastes. *Bioresource Technology*, 169, pp. 421-427.
- Bautista, A. (2010). *Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos*. Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid.
- Bayr, S., Marianne, R., Kaparaju, P. y Rintala, J. (2012). Mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion of rendering plant and slaughterhouse wastes. *Bioresource Technology*, 104, pp. 28-36.
- Berg, L. y Kennedy, L. (1983). Dairy Waste Treatment with anaerobic stationary fixed film reactors. *Water Science Technology*, 15, pp. 359-368.
- Boening, P. y Larsen, V. (1982). Anaerobic fluidized bed whey treatment. *Biotechnology and Bioengineering*, 24, pp. 2539-2556.
- Borja, R., Banks, C., Wang, Z. y Mancha, A. (1998). Anaerobic digestion of slaughterhouse wastewater using a combination sludge blanket and filter arrangement in a single reactor. *Bioresource Technology*, 65, pp. 125-133.
- Caixeta, C., Cammarota, M. y Xavier, A. (2002). Slaughterhouse wastewater treatment: evaluation of a new three-phase separation system in a UASB reactor. *Bioresource Technology*, 81, pp. 61-69.

- Cheng, C.-Y. (2007). *Energia alternativa na indústria láctea: A produção e aproveitamento de biogás numa pequena Queijaria Minhota*. Laboratório de Engenharia Sanitária. Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Comino, E., Riggio, V. y Rosso, M. (2012). Biogas production by anaerobic co-digestion of cattle slurry and cheese whey. *Bioresource Technology*, *114*, pp. 46-53.
- Cuetos, M., Gómez, X., Otero, M. y Morán, A. (2008). Anaerobic digestion of solid slaughterhouse waste (SHW) at laboratory scale: Influence of co-digestion with the organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). *Biochemical Engineering Journal*, *40*, pp. 99-106.
- Delfosse, P. (2010). *Microbiologie de la digestion anaerobie*. Luxemburgo: Centre de Recherche Public Gabriel Lippmann.
- Errecart, V. (2015). *Análisis del mercado mundial de carnes*. San Martín, Argentina: Universidad Nacional de San Martín.
- Espeitx, E. y Gracia, M. (1999). La alimentación humana como objeto de estudio para la antropología: posibilidades y limitaciones. (E. R. Murcia, Ed.) *AREAS: Revista Internacional de Ciencias Sociales*, *19*, pp. 137-152.
- Gómez, X., Martínez, E., Fierro, J., Otero, M. y Cuetos, M. (2013). Feasibility of anaerobic co-digestion of poultry blood with maize residues. *Bioresource Technology*, *144*, pp. 513-520.
- Hach. (2000). *Manual de análisis de agua: Segunda edición en español*. Colorado: Hach Company.
- Kalyuzhnyi, S., Perez, E. y Rodríguez, J. (1997). Anaerobic treatment of high-strength cheese whey wastewaters in laboratory and pilot UASB-reactors. *Bioresource Technology*, *60*, pp. 59-65.
- Karthikeyan, O. y Visvanathan, C. (2013). Bio-energy recovery from high-solid organic substrates by dry anaerobic bio-conversion processes: a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, *12*, pp. 257-284.
- Kavacik, B. y Topaloglu, B. (2010). Biogas production from co-digestion of a mixture of cheese whey and dairy manure. *Biomass and bioenergy*, *34*, pp. 1321-1329.
- Kim, Y., Chism, G. y Mangino, M. (1987). Determination of the beta-Lactoglobulin, alpha-Lactalbumin and Bovine Serum Albumin of Whey Protein Concentrates and Their Relationship To Protein Functionality. *Journal of Food Science*, *52*, pp. 124-127.

- López, A. y De Arco, F. (2013). *Evaluación del potencial energético de las aguas rojas originadas en la sala de cosecha de la Planta de Cárnicos de Zamorano* (tesis de pregrado). Departamento de Ambiente y Desarrollo. Francisco Morazán: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.
- Malaspira, F., Stante, L., Cellamare, C. y Tilche, A. (1995). Cheese whey and cheese factory wastewater treatment with a biological anaerobic-aerobic process. *Water Science & Technology*, 32, pp. 59-72.
- Massé, D. y Masse, L. (2000). Characterization of wastewater from hog slaughterhouses in Eastern Canada and evaluation of their in-plant wastewater treatment systems. *Agriculture and Agri-Food Canada*, 42, pp. 139-146.
- Massé, D. y Masse, L. (2001). The effect of temperature on slaughterhouse wastewater treatment in anaerobic sequencing batch reactors. *Bioresource Technology*, 76, pp. 91-98.
- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Macé, S. y Astals, S. (2011). Codigestion of solid wastes: A review of its uses and perspectives including modeling. *Critical Reviews in Biotechnology*, 92, pp. 99-111.
- Mata-Alvarez, J., Macé, S. y Llabrés, P. (2000). Anaerobic digestion of organics solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology*, 74, pp. 3-16.
- Mikkelsen, P. (2014). *World cheese market 2000-2020*. Denmark: Pm Food And Dairy Consulting.
- Monnet, C., Attar, A. y Corrieu, G. (2002). Production of carbon dioxide by *Lactococcus lactis* strains with attenuated lactate dehydrogenase activity, in pure cultures and in mixed cultures with an acidifying strain. *EDP Sciences*, 82, pp. 267-279.
- Muñoz, N., Rico de la Hera, C. y Rico, J. (2011). *Codigestión anaerobia de estiércol de vacuno y suero de quesería*. Santander: Universidad de Catabria.
- Orhon, D., Gorgon, E., Germirli, F. y Artan, N. (1993). Biological Treatability of dairy wastewater. *Water Research*, 27, pp. 625-633.
- Pagés, J., Pereda, I., Taherzadeh, M., Sárvári, I. y Lundin, M. (2014). Anaerobic co-digestion of solid slaughterhouse wastes with agro-residues: synergistic and antagonistic interactions determined in batch digestion assays. *Chemical Engineering Journal*, 245, pp. 89-98.
- Panesar, P., Kennedy, J., Gandhi, D. y Bunko, K. (2007). Bioutilisation of whey for lactic acid production. *Food Chemistry*, 105, pp. 1-4.

- Rajeshwari, K., Balakrishnan, M., Kansal, A., Lata, K. y Nishore, V. (2000). State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4, pp. 135-156.
- Revilla, A. (2009). *Tecnología de la leche* (5ta ed.). Honduras: Zamorano Academic Press.
- Rocha, L. (2015). *Aplicación de la digestión anaerobia para el tratamiento del efluente de la planta de lácteos de Zamorano y evaluación de su potencial energético* (tesis de pregrado). Departamento de Ambiente y Desarrollo. Francisco Morazán: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.
- Ruiz, I., Veiga, M., de Santiago, P. y Blázquez, R. (1997). Treatment of slaughterhouse wastewater in a UASB reactor and an anaerobic filter. *Bioresource Technology*, 60, pp. 251-258.
- Salminen, E. y Rintala, J. (2002). Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste - a review. *Bioresource Technology*, 83, pp. 13-26.
- Wilkie, A., Smith, P. y Bordeaux, F. (2004). An economical bioreactor for evaluating biogas potential of particulate biomass. *Bioresource Technology*, 92, pp. 103-109.

7. ANEXOS

Anexo 1. Caracterización físico-química de aguas rojas, suero y el efluente de cada tratamiento.



Anexo 2. Reactores al final del tratamiento de digestión y codigestión.



Anexo 3. Prueba de comparación múltiple en el IPM para los tratamientos de digestión y codigestión.

(I) Tratamiento	(J) Tratamiento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.
100% suero	100% aguas rojas	-.10833	.01651	.000
	25% aguas rojas - 75% suero	-.01167	.01651	.953
	50% aguas rojas - 50% suero	-.00667	.01651	.994
	75% aguas rojas - 25% suero	-.07000 [*]	.01651	.002
100% aguas rojas	100% suero	.10833 [*]	.01651	.000
	25% aguas rojas - 75% suero	.09667 [*]	.01651	.000
	50% aguas rojas - 50% suero	.10167 [*]	.01651	.000
	75% aguas rojas - 25% suero	.03833	.01651	.171
25% aguas rojas - 75% suero	100% suero	.01167	.01651	.953
	100% aguas rojas	-.09667 [*]	.01651	.000
	50% aguas rojas - 50% suero	.00500	.01651	.998
	75% aguas rojas - 25% suero	-.05833 [*]	.01651	.013
50% aguas rojas - 50% suero	100% suero	.00667	.01651	.994
	100% aguas rojas	-.10167 [*]	.01651	.000
	25% aguas rojas - 75% suero	-.00500	.01651	.998
	75% aguas rojas - 25% suero	-.06333 [*]	.01651	.006
75% aguas rojas - 25% suero	100% suero	.07000 [*]	.01651	.002
	100% aguas rojas	-.03833	.01651	.171
	25% aguas rojas - 75% suero	.05833 [*]	.01651	.013
	50% aguas rojas - 50% suero	.06333 [*]	.01651	.006

Anexo 4. Prueba de comparación múltiple en la remoción de SV para los tratamientos de digestión y codigestión.

(I) Tratamiento	(J) Tratamiento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.
100% suero	100% aguas rojas	.020167 [*]	.001790	.000
	25% aguas rojas - 75% suero	.067833 [*]	.001790	.000
	50% aguas rojas - 50% suero	.011000 [*]	.001790	.000
	75% aguas rojas - 25% suero	.033833 [*]	.001790	.000
100% aguas rojas	100% suero	-.020167 [*]	.001790	.000
	25% aguas rojas - 75% suero	.047667 [*]	.001790	.000
	50% aguas rojas - 50% suero	-.009167 [*]	.001790	.000
	75% aguas rojas - 25% suero	.013667 [*]	.001790	.000
25% aguas rojas - 75% suero	100% suero	-.067833 [*]	.001790	.000
	100% aguas rojas	-.047667 [*]	.001790	.000
	50% aguas rojas - 50% suero	-.056833 [*]	.001790	.000
	75% aguas rojas - 25% suero	-.034000 [*]	.001790	.000
50% aguas rojas - 50% suero	100% suero	-.011000 [*]	.001790	.000
	100% aguas rojas	.009167 [*]	.001790	.000
	25% aguas rojas - 75% suero	.056833 [*]	.001790	.000
	75% aguas rojas - 25% suero	.022833 [*]	.001790	.000
75% aguas rojas - 25% suero	100% suero	-.033833 [*]	.001790	.000
	100% aguas rojas	-.013667 [*]	.001790	.000
	25% aguas rojas - 75% suero	.034000 [*]	.001790	.000
	50% aguas rojas - 50% suero	-.022833 [*]	.001790	.000