

**Evaluación de la Eficiencia de un Reactor UAPB para la Biodegradación de Aguas
Residuales de la Industria Láctea**

Ingrid Julieth Díaz Vargas

**Universidad de Boyacá
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Ingeniería Sanitaria
Tunja
2023**

**Evaluación de la Eficiencia de un Reactor UAPB para la Biodegradación de Aguas
Residuales de la Industria Láctea**

Ingrid Julieth Díaz Vargas

**Trabajo de para optar por el título de:
Ingeniera Sanitaria**

Director

Jaime Díaz Gómez

MSc. Ciencias Ambientales y Tecnología

Codirector

Diego Camilo Guio Sandoval

MSc. Ingeniería civil con énfasis en hidroambiente

Universidad de Boyacá

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Ingeniería Sanitaria

Tunja

2023

Nota de aceptación:

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Tunja, 20 de junio del 2023

“Únicamente el graduando es responsable de las ideas expuestas en el presente trabajo”.
(Lineamientos constitucionales, legales e institucionales que rigen la propiedad intelectual).

Este trabajo de grado va dedicado especialmente a mi familia y mi pareja quienes fueron mi apoyo incondicional durante todos estos años y que me impulsaron a ser mejor persona cada día.

Contenido

	Pág.
Introducción.....	17
Evaluación de la biodegradabilidad de los residuos líquidos sintéticos lácteos.....	19
Análisis de resultados de biodegradabilidad anaerobia	25
Producción de biogás en el reactor UAPB	28
Actividad metanogénica del lodo granular	32
Eficiencia en el sistema de tratamiento	39
Análisis de datos a diferentes temperaturas	39
Análisis de variabilidad para las dos temperaturas	43
Análisis de datos a diferentes TRH.....	47
Análisis de variabilidad para los dos TRH.....	50
Análisis de datos con la resolución 631 de 2015 de Colombia.....	53
Análisis de operación del reactor	55
Conclusiones.....	62
Referencias	64
Anexos.....	68

Listado de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Resultados de los ensayos de Biodegradabilidad	21
Tabla 2. Recopilación de resultados de FBD, FM y FA	23
Tabla 3. Volumen total de gas en los colectores	28
Tabla 4. Cálculos del AME en lodo granular (ensayo 1)	35
Tabla 5. Cálculos del AME en lodo granular (ensayo 2)	37
Tabla 6. Resultados de DQO y grasas y aceites (35°C)	40
Tabla 7. Resultados de DQO y grasas y aceites (17°C)	41
Tabla 8. Eficiencia de grasas y aceites a 35°C	45
Tabla 9. Resultados de calidad con un TRH 4.4 días	48
Tabla 10. Resultados de calidad con un TRH 2.5 días	49
Tabla 11. Resolución 631 de 2015 y resultados de las mediciones.....	53
Tabla 12. Resultados AGV, pH y Alcalinidad a 35°C	56
Tabla 13. Resultados AGV, pH y Alcalinidad en TRH de 4.4 días	58
Tabla 14. Resultados AGV, pH y Alcalinidad en TRH de 2.5 días	60

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Botella de Mariotte y ensayo Biodegradabilidad anaerobia del residuo lácteo	20
Figura 2. Diagrama de cajas para FM,FA y FBD.....	24
Figura 3. Mediciones de gas en el colector 1	29
Figura 4. Mediciones de gas en el colector 2	30
Figura 5. Ensayo actividad metanogénica del lodo granular.....	33
Figura 6. Producción de metano lodo granular (ensayo 1).....	34
Figura 7. Máxima producción de metano del lodo granular.....	35
Figura 8. Producción de metano lodo granular (ensayo 2).....	36
Figura 9. Máxima producción de metano del lodo granular.....	37
Figura 10. Eficiencia DQO en las dos temperaturas	44
Figura 11. Eficiencia grasas y aceites a temperatura ambiente	46
Figura 12. Diagrama de cajas de DQO en los diferentes TRH	51
Figura 13. Diagrama de cajas de grasas y aceites en los diferentes TRH	52

Lista de Anexos

	Pág.
Anexo A. Anteproyecto.....	69

Glosario

Ácidos grasos volátiles (AGV): la determinación de los AGV es de gran utilidad en el control de las plantas de tratamiento anaerobias de aguas residuales domésticas e industriales y se pueden obtener diferentes ácidos, como: fórmico, acético, propiónico, butírico, isobutírico, valérico e isovalérico. Además, estos ácidos orgánicos poseen otras características como ser los intermediarios más relevantes en el proceso anaerobio, siendo el acético el responsable del 70% del metano producido en la digestión (Ortegón Velandía, 2016, citado por Herrera, 2020, p. 18).

Actividad metanogénica: “la actividad metanogénica específica determina la capacidad de producción de metano del lodo para un sustrato específico a un nivel de concentración donde la disponibilidad del sustrato no es un factor limitante” (Hussain y Dubey, 2014).

Afluente: “es el agua residual que ingresa a una planta de tratamiento de aguas residuales o proceso de tratamiento” (Ancalle y Ledesma, 2020).

Aguas residuales industriales: “proceden de los procesamientos realizados en fábricas y establecimientos industriales y contienen aceites, detergentes, antibióticos, ácidos y grasas y otros productos y subproductos de origen mineral, químico, vegetal o animal. Su composición es muy variable, dependiendo de las diferentes actividades industriales” (García y Pérez, s.f.)

Alcalinidad total: “es la capacidad de la muestra para amortiguar o neutralizar los cambios de pH cuando se vierte en ella un tipo de ácido. La alcalinidad en el agua residual se debe a la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos como calcio, magnesio, sodio o amoníaco” (Jiménez Gonzales, 2006).

Biodegradabilidad anaerobia: “la determinación de la biodegradabilidad anaerobia de un agua residual permite estimar la fracción DQO que puede ser eliminada por medio de la digestión anaerobia” (Chávez y Díaz, 2003).

Demanda química de oxígeno (DQO): la demanda química de oxígeno determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2007).

Efluente: “Flujo de salida del agua residual tratada” (Ancalle y Ledesma, 2020).

Gas metano: el metano es un gas natural, incoloro e inodoro que se produce debido a la digestión de materia orgánica, como las plantas. Una de las principales propiedades del metano es que produce mayor calor y luz, y su combustión es más limpia, que otros combustibles hidrocarburos, o fósiles (SoCalGas, s.f.).

pH: “la escala del pH usualmente se presenta en el rango de 0 a 14. Valores menores que 7 indican que la concentración de hidrogeniones es más alta que la concentración de ion hidróxido, y el agua se denomina ácida; en condiciones opuestas, en la que el pH excede a 7, el agua se denomina básica” (Osorio y Vargas, 2005).

Reactor anaerobio de lecho empacado de flujo ascendente (UAPB): este reactor es un tanque en el que ingresa el agua residual por la parte inferior y sale por la parte superior. La mezcla en el sistema es promovida por el flujo ascensional del fluido y por las burbujas de gas. El reactor contiene un medio de soporte que permite separar las fases líquido sólido gas en forma efectiva. Se produce una elevada reducción de la materia orgánica y el biogás obtenido se puede aprovechar para la generación de energía (Bedoya y Sánchez e Sousa, 2009).

Residuos lácteos: “la industria láctea a través de la producción de leche, mantequilla, queso o yogur, mediante pasteurización u homogeneización, produce aguas residuales. Estos efluentes vienen con altos niveles de cargas de aditivos tóxicos que deben reducirse antes de ser descargadas al alcantarillado o al mar” (Bedoya y Sánchez e Sousa, 2009).

Tiempo de retención hidráulica (TRH): “es el tiempo que permanecerá el agua dentro del reactor, los tiempos de retención varían de acuerdo con el tipo de modificación utilizada y

la calidad del agua a tratar. (“Fundamentos de lodos activados de aireación extendida”, s.f., p. 20).

Resumen

Evaluación de la Eficiencia de un Reactor UAPB para la Biodegradación de Aguas Residuales de la Industria Láctea.

Este proyecto presenta los resultados de la evaluación de la biodegradabilidad de residuos líquidos lácteos empleando un reactor anaerobio de lecho empacado y flujo ascendente en términos de la eficiencia para remoción de materia orgánica y producción de biogás.

El objetivo del estudio fue evaluar la eficiencia de un reactor anaerobio de lecho empacado de flujo ascendente para la biodegradación a escala laboratorio de un agua residual sintética representativa de una industria láctea.

Inicialmente se puso en funcionamiento el reactor alimentándolo con el residuo lácteo sintético, y realizando la determinación de pH, AGV, DQO y alcalinidad tanto para afluente como los dos efluentes del reactor para el control de la operación del sistema. Adicionalmente se hicieron ensayos de biodegradabilidad anaerobia para el residuo lácteo sintético y la evaluación de la actividad metanogénica del lodo anaerobio granular utilizado como inóculo de los reactores anaerobios. También se llevaron a cabo mediciones de la producción de gas en el reactor. Los resultados obtenidos de los ensayos los cuales se consiguieron por la evaluación diaria del sistema se consignaron en una base de datos.

En conclusión, con el ensayo de biodegradabilidad anaerobia se determinó que el residuo lácteo sintético es 89% biodegradable mediante la Digestión Anaerobia (DA), además, se obtuvieron altas eficiencias de remoción (en parámetros como DQO y grasas y aceites) al implementar el reactor UAPB con la temperatura de 35°C (96.96% y 97.71%, respectivamente) y el TRH de 4.4 días (83.14% y 88.21% respectivamente), lo que llevo a que el sistema tuviera una producción de gas de 0.1491 m³ durante todo el tiempo del ensayo. Sin embargo, esto no es suficiente para cumplir con la legislación ambiental (Resolución 631 de 2015) ya que no alcanza a remover materia orgánica en términos de DQO y grasas y aceites. Por lo anterior se propone que este tipo de reactor se emplee como un pretratamiento de un sistema posterior como lodos

activados. La ventaja de hacer esto está en la reducción de los requerimientos de energía en el proceso aerobio.

Palabras Clave: Tratamiento anaerobio, biodegradabilidad, residuos lácteos, metano y actividad metanogénica.

Abstract

Evaluation of the Efficiency of a UAPB Reactor for the Biodegradation of Wastewater from the Dairy Industry.

This project presents the results of the evaluation of the biodegradability of liquid dairy wastes using an upflow packed bed anaerobic reactor in terms of organic matter removal efficiency and biogas production.

The objective of the study was to evaluate the efficiency of an upflow packed bed anaerobic reactor for the laboratory-scale biodegradation of a synthetic wastewater representative of a dairy industry.

Initially, the reactor was put into operation by feeding it with the synthetic dairy waste, and determining pH, VFA, COD and alkalinity for both the influent and the two effluents of the reactor to control the operation of the system. In addition, tests of anaerobic biodegradability were performed for the synthetic dairy waste and the evaluation of the methanogenic activity of the granular anaerobic sludge used as inoculum for the anaerobic reactors. Measurements of the gas production in the reactor were also carried out. The results obtained from the tests, which were obtained by daily evaluation of the system, were recorded in a database.

In conclusion, the anaerobic biodegradability test determined that the synthetic milk residue is 89% biodegradable by anaerobic digestion (AD), in addition, high removal efficiencies were obtained (in parameters such as COD and fats and oils) when implementing the UAPB reactor with the temperature of 35°C (96.96% and 97.71%, respectively) and the TRH of 4.4 days (83.14% and 88.21% respectively), which led to the system having a gas production of 0.1491 m³ during the entire time of the test. However, this is not enough to comply with environmental legislation (Resolution 631 of 2015) as it does not remove organic matter in terms of COD and fats and oils. It is therefore proposed that this type of reactor be used as a pre-treatment of a later system as activated sludge. The advantage of doing this is in reducing energy requirements in the aerobic process.

Keywords: Anaerobic treatment, biodegradability, dairy waste, methane and methanogenic activity.

Introducción

La industria láctea utiliza como materia prima la leche y produce productos derivados de la misma. Estos procesos productivos generan diferentes subproductos que en muchas ocasiones son descargados en el ambiente generando contaminación atmosférica, residuos sólidos y efluentes líquidos y en general impactos negativos en el ambiente y la salud de las personas.

En los procesos llevados a cabo dentro de esta industria se generan aguas residuales, las cuales contienen una gran carga contaminante proveniente de la limpieza de equipos y superficies, de aguas de refrigeración, de condensados, de restos de leche y lacto suero. Dichas aguas, tienen un alto contenido de material orgánico, alta biodegradabilidad, contiene aceites y grasas, fósforo, nitratos, sólidos en suspensión (especialmente las productoras de queso), y gran variabilidad de pH (Bedoya y Sanches E Sousa, 2009). En muchas ocasiones a estas aguas residuales no se les realiza ningún tipo de tratamiento antes de ser vertidas en fuentes hídricas y suelos lo que ocasiona problemas estéticos, un aumento en la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y aguas que pueden contener patógenos que afecten la salud humana y animal (Bedoya y Sanches E Sousa, 2009).

Debido a lo anterior, es necesario encontrar alternativas de tratamiento para este tipo de residuos. En este proyecto se evaluó la implementación de un reactor anaerobio empacado con flujo ascendente y ensayos de biodegradabilidad anaerobia, para determinar si a estos desechos se les puede aplicar un pretratamiento anaerobio y así lograr reducir las cargas contaminantes en términos de DQO, grasas y aceites. Los resultados se verificaron comparando la calidad del efluente con la Resolución 0631 de 2015 de Colombia.

Con este proyecto se buscó determinar la eficiencia de un sistema de tratamiento anaerobio para los residuos líquidos lácteos que permitan futuras investigaciones e incentivar a las empresas de la industria láctea a implementar este tipo de tratamiento y de esa manera lleguen a cumplir con la normatividad vigente. Cabe aclarar que, en la fase que se encuentra esta investigación es a pequeña escala que podría ser desarrollada en un futuro con reactores de mayor capacidad unido a otros procesos aerobios posteriores.

El reactor biológico anaerobio empacado se operó con lodo granular proveniente de un reactor UASB localizado en la Industria Indega de Cali. Como afluente, se preparó un residuo

lácteo sintético típico que simula la composición real de un residuo lácteo y que está preparado a partir de leche en polvo. Además, se realizaron ensayos de control (tanto para afluente como los dos efluentes del reactor) como lo son: DQO, pH, alcalinidad, ácidos grasos volátiles y grasas y aceites, también, se hicieron ensayos de biodegradabilidad anaerobia y actividad metanogénica. La información fue consignada en una base de datos empleada para evaluar la eficiencia y la operación del sistema.

Los resultados de este proyecto se presentan en tres capítulos. En el primero se encuentra la determinación de la biodegradabilidad de los residuos lácteos sintéticos, en el segundo las mediciones de la producción gas en el reactor y finalmente, en el tercero se muestra la evaluación de la eficiencia del sistema de tratamiento.

Evaluación de la biodegradabilidad de los residuos líquidos sintéticos lácteos

En este capítulo se presentan los resultados de los ensayos de biodegradabilidad anaerobia empleando la metodología basada en lo propuesto por Field (1987). El método emplea un reactor anaerobio operado en tándem utilizando 20 mililitros (ml) de lodo granular anaerobio. Para este ensayo se deben realizar dos montajes; una botella de blanco (es decir, contiene solo agua destilada y el volumen de lodo mencionado anteriormente) y otra botella la cual contiene la misma cantidad de lodo pero en este caso en vez de agua destilada se le agrega el residuo lácteo propuesto que tiene una DQO de 3,000 mg DQO/L (dicha DQO esta sugerida en la composición del sustrato y por ende se manejó tal valor), estos ensayos se llevaron a cabo a una temperatura de 35 grados centígrados (°C), montados sobre una plancha de agitación de marca Fisherbrand de modelo Isotemp. El metano producido se mide diariamente en botellas Mariotte como se ve en la Figura 1. Estos ensayos determinan la fracción que es biodegradable anaerobiamente y la DQO biodegradable se mide por la producción de metano, la producción de AGV y la producción celular (son la cantidad de microorganismos nuevos generados por cantidad de DQO biodegradada), adicional a esto, dado que el blanco no contiene ningún tipo de sustrato y si durante el tiempo de ensayo se obtuvo producción de metano en el mismo, se considera que esta producción de gas no está dada por la degradación de material orgánico si no por la existencia de bacterias metanogénicas en el lodo y por tanto, estos resultados se deben corregir, en otras palabras, los resultados del blanco se deben restar a los resultados de la botella con sustrato para realizar el ajuste correspondiente. A continuación, se expone una imagen que muestra cómo se realizó el montaje de dicho ensayo (Ver Figura 1).

Figura 1

Botella de Mariotte y ensayo Biodegradabilidad anaerobia del residuo lácteo



Fuente: Autora

Con los resultados de los ensayos de biodegradabilidad se procedió a construir una base de datos en Excel. Se realizaron 8 ensayos cuyos resultados se presentan a continuación:

Tabla 1*Resultados de los ensayos de Biodegradabilidad*

Tiempo (d)	Control (mg DQO/L)			Sustrato (mg DQO/L)			Resultados corregidos (mg DQO/L)			Resultados de biodegradabilidad							
	DQO (g DQO/L)	AGV	Metano (ml)	DQO (g DQO/L)	AGV	Metano (ml)	DQO (g DQO/L)	AGV	Metano (ml)	FM	FAGV	FA	FDQO remanente	FDQO removida	FBD	FCEL	Y
Ensayo 1																	
0	28	8.0	0	3467	81.6	0	3439	73.6	0	0.00	0.02	0.02	1	0.0	0.02	0.00	0.00
2	160	10.0	183.3	2354	159.9	1004	2194	149.9	821	0.24	0.04	0.28	0.64	0.36	0.41	0.12	0.30
4	175	26.7	355.5	1813	203.3	1499	1638	176.6	1144	0.33	0.05	0.38	0.48	0.52	0.58	0.19	0.33
7	190	30.0	637.8	906	219.9	2438	716	189.9	1800	0.52	0.06	0.58	0.21	0.79	0.85	0.27	0.32
Ensayo 2																	
0	27	7.3	0	3321	80.0	0	3294	72.6	0	0.00	0.02	0.02	1.00	0.0	0.02	0.00	0.00
2	162	11.3	318.9	977	163.3	1822	815	151.9	1502.8	0.46	0.05	0.50	0.25	0.75	0.80	0.30	0.37
4	178	28.0	494.8	850	196.6	2407	672	168.6	1912.1	0.58	0.05	0.63	0.20	0.80	0.85	0.22	0.25
7	194	31.3	674.4	707	216.6	2973	513	185.3	2298.2	0.70	0.06	0.75	0.16	0.84	0.90	0.15	0.16
Ensayo 3																	
0	29	8.7	0	3843	90.6	0	3814	82.0	0	0.00	0.02	0.02	1.00	0.0	0.02	0.00	0.00
2	165	12.0	168.6	1567	171.6	733	1402	159.6	564.5	0.15	0.04	0.19	0.37	0.63	0.67	0.48	0.72
4	180	29.3	260.2	1321	175.6	1473	1141	146.3	1213.3	0.32	0.04	0.36	0.30	0.70	0.74	0.38	0.52
7	198	32.7	494.8	825	184.3	2683	627	151.6	2188.3	0.57	0.04	0.61	0.16	0.84	0.88	0.26	0.30
Ensayo 4																	
0	31	10.7	0	3399	73.3	0	3368	62.6	0	0.00	0.02	0.02	1.00	0.0	0.02	0.00	0.00
2	170	13.3	99.0	2267	143.3	898	2097	130.0	799	0.24	0.04	0.28	0.62	0.38	0.42	0.14	0.34
4	190	32.7	179.6	1321	170.9	1616	1131	138.3	1437	0.43	0.04	0.47	0.34	0.66	0.71	0.24	0.34
7	193	33.3	285.9	721	186.6	2701	528	153.3	2416	0.72	0.05	0.76	0.16	0.84	0.89	0.13	0.14
Ensayo 5																	
0	30	10.0	0	3390	73.3	0	3360	63.3	0	0.00	0.02	0.02	1.00	0.0	0.02	0.00	0.00
2	175	14.0	230.9	1540	143.3	2071	1365	129.3	1840	0.55	0.04	0.59	0.41	0.59	0.63	0.05	0.07
4	196	33.3	443.5	1319	170.9	2452	1123	137.6	2009	0.60	0.04	0.64	0.33	0.67	0.71	0.07	0.10
7	200	34.0	641.4	650	186.6	2987	450	152.6	2346	0.70	0.05	0.74	0.13	0.87	0.91	0.17	0.18
Ensayo 6																	
0	26	7.3	0	3054	66.6	0	3028	59.3	0	0.00	0.02	0.02	1.00	0.0	0.02	0.00	0.00
2	165	10.0	25.7	894	169.9	689	729	159.9	663.4	0.22	0.05	0.27	0.24	0.76	0.81	0.54	0.67
4	175	26.7	282.2	654	203.3	1257	479	176.6	975	0.32	0.06	0.38	0.16	0.84	0.90	0.52	0.58
7	180	30.7	538.8	538	206.6	2152	358	175.9	1613	0.53	0.06	0.59	0.12	0.88	0.94	0.35	0.37

Tiempo (d)	Control (mg DQO/L)			Sustrato (mg DQO/L)			Resultados corregidos (mg DQO/L)			Resultados de biodegradabilidad							
	DQO (g DQO/L)	AGV	Metano (ml)	DQO (g DQO/L)	AGV	Metano (ml)	DQO (g DQO/L)	AGV	Metano (ml)	FM	FAGV	FA	FDQO remanente	FDQO removida	FBD	FCEL	Y
Ensayo 7																	
0	26	7.3	0	3500	86.6	0	3474	79.3	0	0.00	0.02	0.02	1.00	0.0	0.02	0.00	0.00
2	165	10.0	25.7	833	149.9	817	668	140.0	791.73	0.23	0.04	0.27	0.19	0.81	0.85	0.58	0.68
4	175	26.7	282.2	752	163.3	1459	577	136.6	1176.6	0.34	0.04	0.38	0.17	0.83	0.87	0.50	0.57
7	180	30.7	465.5	619	169.9	2416	439	139.3	1950.0	0.56	0.04	0.60	0.13	0.87	0.91	0.31	0.34
Ensayo 8																	
0	26	7.3	0	3498	83.3	0	3472	76.0	0	0.00	0.02	0.02	1.00	0.0	0.02	0.00	0.00
2	165	10.0	25.7	1329	85.0	803	1164	75.0	777.07	0.22	0.02	0.25	0.34	0.66	0.69	0.44	0.64
4	175	26.7	282.2	1159	120.0	1371	984	93.3	1088.63	0.31	0.03	0.34	0.28	0.72	0.74	0.40	0.54
7	190	30.7	538.8	800	133.3	2350	610	102.6	1810.71	0.52	0.03	0.55	0.18	0.82	0.85	0.30	0.35

Nota. Algunos significados de las siglas mostradas en las tablas se amplían a continuación: Fracción de la DQO inicial que fue convertida en AGV (FAGV), Fracción de la DQO inicial que permanece en el agua después de los 7 días de digestión (FDQO remanente), Fracción de la DQO inicial que ha sido removida en los 7 días de digestión (FDQO removida) y la Fracción de la DQO inicial que se convirtió en biomasa (FCEL). Fuente: Autora

En la Tabla 1 se presentan los resultados de todos los ensayos de biodegradabilidad realizados, en este apartado se expondrán los análisis de cada uno de los ensayos en cuanto a la fracción biodegradable (FBD), la DQO inicial fue convertida en metano (FM), la DQO que fue acidificada (FA) y finalmente, el coeficiente de producción celular (Y), todos ellos para el séptimo día de digestión. Como se puede observar para los ensayos realizados el FBD se mantuvo en un rango entre 0.85-0.94 lo que nos indica que el sustrato analizado tiene un porcentaje de biodegradabilidad entre el 85-94% mediante digestión anaerobia. En el caso del FM, este se sostuvo en un rango entre 52-72% mostrándonos así que este porcentaje de la DQO inicial se convirtió en metano y el FA se mantuvo en un rango de 58-76% lo que significa que este fue el porcentaje de la DQO inicial que se acidifico, además de esto, el Y se mantuvo entre 14-37%, es decir, son la cantidad de microorganismos nuevos generados por cantidad de DQO biodegradada. Finalmente, para los ocho ensayos de biodegradabilidad se obtuvo una producción acumulada de metano de 16,421.05 ml.

A manera de resumen a continuación se presenta la recopilación de los resultados de FA, FM y FBD:

Tabla 2

Recopilación de resultados de FBD, FM y FA

Ensayo	FM (%)	FA (%)	FBD (%)
1	52.3	57.9	85
2	69.8	75.4	90
3	57.4	61.3	88
4	71.7	76.3	89
5	69.8	74.4	91
6	53.3	59.1	94
7	56.1	60.1	91
8	52.2	55.1	85
Promedio	60.3	64.9	89.1

Fuente: Autora

En la Tabla 2 se presentan los resultados en cuanto FA, FM y FBD de los ocho ensayos de biodegradabilidad realizados. Para tener una idea de la variabilidad que hubo en los resultados de los ensayos se va a realizar un pequeño análisis estadístico en cuanto a desviación estándar y diagrama de cajas.

A los resultados obtenidos de FM, FA y FBD para los ocho ensayos, se les realizó un análisis estadístico en cuanto a desviación estándar y diagramas de cajas, con el fin de determinar la variación entre los mismos. A continuación, se presentan los resultados de desviación estándar:

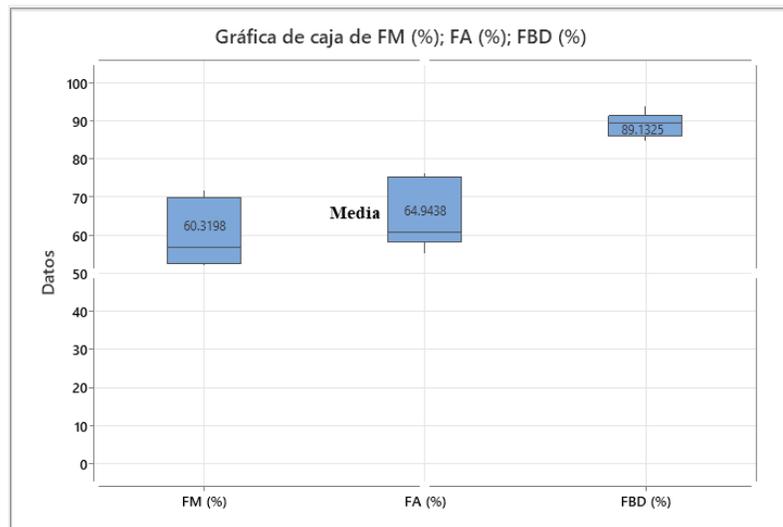
Los resultados de desviación estándar para la FM y FA fueron 8.59% y 8.81% respectivamente, lo cual nos indica que los resultados en cuanto a esos datos tuvieron una dispersión pequeña, es decir, tuvieron una variabilidad mínima con respecto a la media (promedio) lo que indica poca incertidumbre y bajo error en las evaluaciones. Los resultados de FBD tuvieron una menor dispersión que los anteriores, su dispersión fue de 3.16%, por tanto,

sus datos están más cercanos al valor del promedio, por tanto, hay poca incertidumbre en los datos analizados.

Después de esto, se realizaron los diagramas de cajas en el software Minitab, el cual es una herramienta estadística de fácil manejo, enfocada al análisis de datos.

Figura 2

Diagrama de cajas para FM, FA y FBD



Fuente: Autora

Al observar la Figura 2 se encuentran los diagramas de cajas de FM, FA y FBD, en esta gráfica se tiene el valor de la media (promedio) de cada uno de los datos y aquí se expondrán los valores del cuartil 1 (Q1) el cual representa el 25% de los datos y el cuartil 3 (Q3) que representa el 75% de los datos, además, el rango intercuartílico (RIC) que se calcula con la diferencia del Q3 y Q1 y significa la dispersión de los datos analizados utilizando como medida central la media y también, se presentan los intervalos de confianza (IC) los cuales se analizan con un rango de confianza del 95% con respecto a la media lo cual ayudó a identificar si los valores promedios se encuentran dentro de dicho rango para ser aceptables. En el caso de FM el cuartil Q1 es de 52.565%, el cuartil Q3 es 69.805%, el rango intercuartílico es de 17.240%, además de ello, estos datos cuentan un IC entre 54.37% y 66.27%. Como se puede observar en el RIC los datos tienen una dispersión baja, la caja no presenta un ancho muy significativo es decir hay poca variabilidad de los datos, y al examinar los resultados del IC y compararlo con

el promedio obtenido para FM (60.3%) se puede concluir que dicho dato se encuentra dentro del rango de confianza.

Para FA el Q1 fue de 58.159%, el Q3 de 75.135%, el RIC de 16.975%, el IC entre 58.84% y 71.05%, al observar el RIC los datos tienen una dispersión baja, la caja no presenta un ancho demasiado significativo (es decir, existe una baja variabilidad de los datos) y al realizar la comparación del IC con el promedio obtenido para FA (64.9%) se puede concluir que se encuentra dentro del rango de confianza. Finalmente, en el caso de FBD el Q1 fue de 85.924%, Q3 de 91.316%, el RIC de 5.392%, el IC entre 86.94% y 91.32%, al analizar los resultados, el FBD es el que tiene una menor variabilidad en comparación con los otros ya que tiene un valor de RIC bajo, el ancho de la caja es mínimo (poca variabilidad de los datos) y al examinar su promedio (89.1%) se puede observar que se encuentra dentro del rango de confianza. En conclusión, los cuartiles no tuvieron una distribución significativa, con los intervalos de confianza se estableció que los datos se encuentran dentro de dicho rango obteniendo así una confiabilidad alta con respecto a los datos estudiados, por tanto, para el desarrollo de este capítulo se trabajó con el valor promedio de los datos de FM, FA y FBD para así realizar un análisis en general de los mismos.

Análisis de resultados de biodegradabilidad anaerobia

En la Tabla 2 se presentan los datos de FM, FA y FBD en el tiempo de digestión de 7 días de los ensayos realizados con el fin de hacer unas gráficas comparativas de los mismos y hacer un análisis en general sobre la biodegradabilidad del residuo lácteo sintético utilizado. Las gráficas se presentan a continuación:

La variación de la FA en el tiempo de digestión de 7 días en todos los ensayos realizados. En este caso el promedio de los datos fue de 64.9% que corresponde al porcentaje de la DQO inicial que se acidificó. Este es un resultado positivo, ya que es la parte de la DQO biodegradable la cual está verdaderamente disponible a las bacterias metanogénicas. Equivale a la fracción de la DQO que puede ser convertida a AGV y metano (Universidad Agrícola de Wageningen, 1987).

Esta fracción de DQO que se acidificó se da por la fase de acidogénesis, en la que las moléculas orgánicas solubles son fermentadas por diversos agentes fermentativos para formar

compuestos que pueden ser utilizados directamente por microorganismos metanogénicos (acético, fórmico, hidrógeno (H_2)) y compuestos orgánicos más reducidos (láctico, etanol, propiónico, butírico) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas a sustratos que puedan utilizar los metanógenos (Gerardi, 2003, citado por Cámara Moguel y Laines, 2011). La fracción entre productos de fermentación depende del consumo de H_2 consumido por el microorganismo que utiliza el compuesto, este es eliminado de forma eficiente las bacterias fermentativas no producen compuestos relacionados como el etanol, favoreciendo la producción de H_2 y la liberación química en forma de ATP” (Jördening y Winter, 2005, citador por Cámara Moguel y Laines, 2011)

Por otro lado, un importante hecho para recordar es que no toda la DQO biodegradable está disponible también para las bacterias metanogénicas. “El sustrato que es consumido por las bacterias fermentativas es convertido parte a células, parte a H_2 y gran cantidad a AGV. Las DQO de las células no es disponible para la metanogénesis” (Universidad Agrícola de Wageningen, 1987).

En cuanto a los resultados de FM de los 8 ensayos realizados se obtuvo un promedio de 60.3%. Esto demuestra que ese porcentaje de la DQO inicial fue convertida en metano por los microorganismos anaerobios al degradar la materia orgánica (MO).

En el caso de los ensayos 2, 3 y 5 hubo una producción de metano elevada, en el caso de ensayo 2 y 3 pudo ser debido a dificultades en el ajuste de la agitación lo que posiblemente llevo a que los microorganismos tuvieran un mayor contacto con la fracción orgánica fresca y con ello se facilitó su degradación y el aumento en la producción de metano (Ver Tabla 1).

“Estos procesos de producción de metano se dan en la fase de metanogénesis, en donde, la producción de metano y dióxido de carbono a partir de productos intermedios se lleva a cabo por bacterias metanogénicas bajo condiciones anaeróbicas estrictas” (Adekunle y Okolie, 2015). Dicho proceso se explica de la siguiente manera: La DQO biodegradable degradada a C_2 (ácido acético) y H_2 proviene en una parte de la fermentación y en otra de la acetogénesis. Estos dos compuestos son los verdaderos sustratos metanogénicos. Ambos son tomados dentro de las células bacteriales metanogénicas y metabolizados a metano, que a su vez es excretado fuera de la célula. En un caso típico, 30% y 70% del metano formado se atribuye a las bacterias metanogénicas autótroficas y acetoclásticas, respectivamente (Universidad Agrícola de Wageningen, 1987).

Finalmente, los datos de FBD de todos los ensayos realizados se obtuvo un promedio de 89.1% que equivale a porcentaje de la fracción de biodegradabilidad que tiene el sustrato analizado (es decir, el residuo lácteo estudiado tiene una alta degradación de los contaminantes mediante el uso de la DA), estos resultados se pueden comparar con el estudio llevado a cabo por Mendes et. al (2010), en donde evaluaron la biodegradabilidad anaerobia de las aguas residuales lácteas y obtuvieron porcentajes de remoción entre 62.8% y 88.8%, siendo valores cercanos a los obtenidos en esta investigación.

Se debe tener en consideración que en los sistemas anaerobios uno de los requisitos más importantes es que se tenga la suficiente MO en el sustrato para que los microorganismos puedan realizar sus diferentes procesos de digestión de forma eficiente.

Producción de biogás en el reactor UAPB

En este capítulo se presentan los resultados de las mediciones de gas de los dos colectores con los que cuenta el reactor UAPB y las actividades metanogénicas realizadas, para el funcionamiento del reactor se contó con dos caudales (en los primeros 45 días se manejó un caudal de 3 litros de residuo lácteo por día y los 35 días restantes se trabajó un caudal de 5 litros por día, en ambos casos el afluente del reactor tuvo una DQO de 3,000 mg DQO/L aproximadamente. Con las mediciones diarias en los colectores se estimó la medida de gas generada durante el tiempo de operación del reactor y con ello se determinó si al volumen de gas obtenido se le podía dar algún tipo de aprovechamiento, y con las actividades metanogénicas, se estableció la capacidad del lodo granular utilizado para producir metano.

Es importante recordar que las mediciones de gas se llevaban a cabo con el control del volumen de agua desplazado por la producción de biogás en cada uno de los digestores en un tiempo de 24 horas. En la Tabla 3 se muestra el volumen total de gas obtenido durante todo el ensayo, además de ello, en la Figura 3 y 4 se muestra los resultados obtenidos al realizar el seguimiento diario de la producción de gas en cada uno de los colectores del reactor.

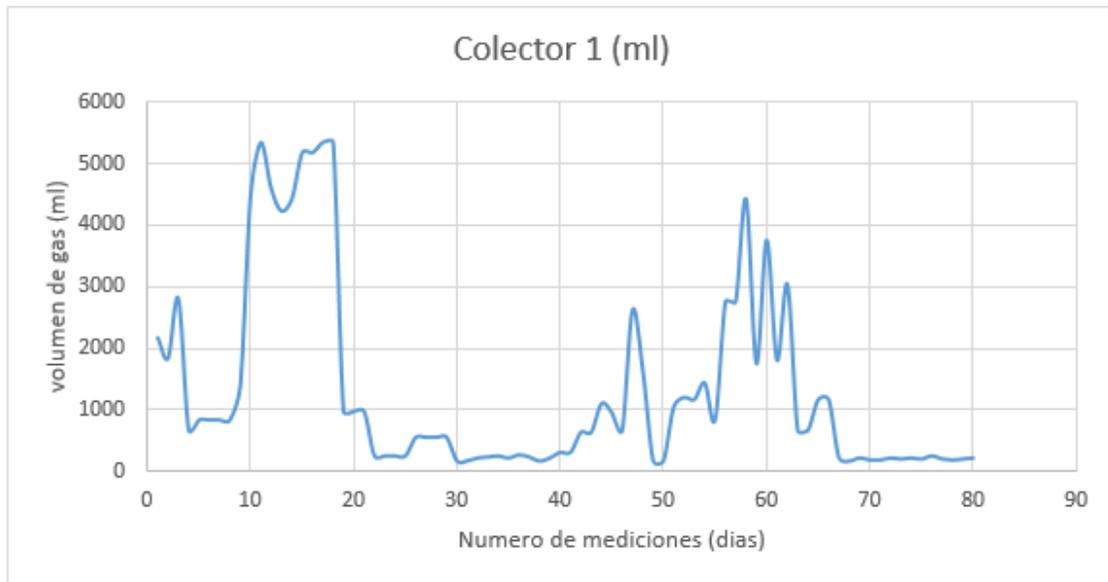
Tabla 3

Volumen total de gas en los colectores

N° Días	Total de gas producido	
	Colector 1 (m)	Colector 2 (ml)
80	102,105	39,827.5

Fuente: Autora

En la Tabla 3 se reporta el total de gas obtenido en las 80 mediciones conseguidas a lo largo del ensayo, en el colector 1 se obtuvieron 102,105 ml de gas (102.1 L aproximadamente) y 39,827 ml en el colector 2 (39.8 L aproximadamente), en total se produjeron 141.9 L de gas en el reactor.

Figura 3*Mediciones de gas en el colector 1*

Fuente: Autora

En los primeros quince días de funcionamiento del reactor, este contó con una temperatura de 35°C, esta temperatura está en un rango denominado mesofílico (20 – 40°C), la cual es necesaria para permitir que los microorganismos se adapten al sustrato, en esta temperatura prevalecen los microorganismos formadores de metano que pertenecen a los géneros *Methanobacterium*, *Methanobrevibacter* y *Methanosaeta*, que son microorganismos que usan acetato para formar metano, por tanto, como se observa en la Figura 3, desde el día 1 al día 18 se obtuvo la mayor cantidad de gas generado en el reactor, ya que se estaba favoreciendo con la temperatura a las bacterias formadoras de metano para que cumplieran con su digestión, es decir, que descompusieran la MO presente en el sustrato y llegar a la producción de gas, con esto no se quiere decir que el 100% de este está compuesto por metano pero como se indica en la literatura, “al menos el 50 o 70 por ciento del gas en un reactor anaerobio está compuesto por metano” (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2007).

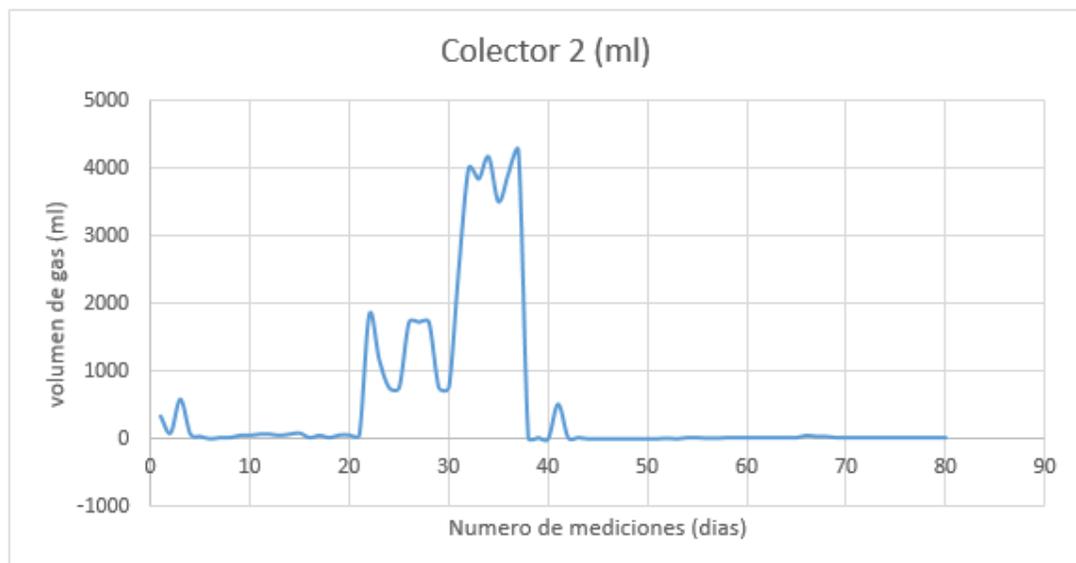
Luego de esto, la temperatura del reactor descendió y empezó a trabajar a la temperatura ambiente de Tunja (17 °C aproximadamente), lo que genera que la degradación de los componentes del sustrato disminuya y con ello la producción de gas, tal y como lo explica Lorenzo Acosta y Obaya Abreu (2005) “debido a que los cambios bruscos de temperatura

pueden generar una desestabilización en los procesos pues afecta la actividad de las bacterias”. Por ende, al observar los resultados de la Figura 3, se obtiene concordancia con lo dicho anteriormente, dado que, después del cambio de temperatura en los próximos 20 días la actividad de las bacterias disminuyó considerablemente hasta que los microorganismos se adaptaron a su nuevo ambiente, posterior a este lapso de tiempo el digestor se estabilizó y la producción de gas volvió a aumentar lo que nos muestra que los procesos de la DA se estaban realizando adecuadamente, es decir, las bacterias están cumpliendo con su función de degradar los constituyentes contaminantes existentes en el residuo lácteo.

Adicional a lo mencionado anteriormente, se debe tener en consideración que el digestor 1 es el que recibe el afluente directamente, lo que quiere decir, que este digestor recibe la mayor entrada de carga orgánica presente en el residuo lácteo, en él se lleva la mayor degradación de material biodegradable y de este modo se tiene la mayor de producción de gas. También, cabe mencionar que la generación de gas en el reactor nos indica que se están ejecutando correctamente los procesos de la DA (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis).

Figura 4

Mediciones de gas en el colector 2



Fuente: Autora

Para el análisis del colector 2 se debe tener en cuenta que los digestores trabajan en serie, es decir, el colector 2 tiene por afluente el agua residual parcialmente tratada saliente del digestor 1 lo que también hace que el segundo digestor reciba una menor carga orgánica. Al observar la Figura 4 podemos analizar que en los primeros 21 días aproximadamente se obtuvo una producción baja de gas en el colector 2, lo que se puede deducir de esto y como se mencionó anteriormente, a dicho digestor estaba llegando una menor carga y, por ende, menos MO debían descomponer las bacterias lo que conlleva a una baja producción de gas.

Luego, al disminuir la temperatura del reactor y dejarla a temperatura ambiente (el colector 2 tuvo una mejor adaptación, ya que al observar los datos del día 12 al 41 aproximadamente, se obtuvo una buena generación de gas, todo lo contrario a lo que paso en el digestor 1 dado que se generó una afectación en el sistema al hacer el cambio de temperatura, lo que significa que el digestor 2 hizo un aprovechamiento de los nutrientes y constituyentes para la alimentación de sus bacterias lo que lo llevo a la disminución de la MO presente y a la producción de biogás.

A modo general, también se debe tener en cuenta que los tiempos de retención hidráulica afectan en la generación de gas, dado que las bacterias requieren de un cierto tiempo para degradar la MO. Por ende, al tener un tiempo de retención hidráulica (THR) menor en los primeros 42 días de funcionamiento del reactor (TRH 4 días aproximadamente con un caudal de 3 litros por día (L/d)) se obtuvo una mayor producción de gas dado que el agua residual permanece más tiempo en los digestores y por ende se puede tener una mejor degradación de los materiales orgánicos. Por otro lado, posterior al tiempo mencionado se aumentó el caudal a 5 L/d y el TRH disminuyó a 2.5 días, lo que hace que haya una disminución en la eficiencia de degradación de MO y de este modo, poca producción de gas en ambos digestores. Cabe aclarar que en el Manual del reactor anaerobio utilizado proponen que para el arranque del reactor se debe iniciar con caudales pequeños para que la biomasa se adapte al sustrato y después de un tiempo se puede aumentar al caudal que se desee tratar, en este caso al inicio se trataron 3 L/d y luego se aumentó a 5 L/d, y por ello, se obtuvieron los TRH mencionados anteriormente.

Finalmente, como se mencionó anteriormente en el reactor se obtuvo una cantidad total de 141.9 L (0.1491 m³) de gas. Según lo buscado en la literatura solo se encuentran usos para el biogás a partir de un m³, por tanto, como lo indica la Dirección de Sustentabilidad, Medio Ambiente y Cambio Climático (s.f.) “un m³ de biogás tiene un poder calorífico aproximado de

6,000 kcal, y tiene la siguiente equivalencia en otras fuentes de energía; 0.6 m³ de gas natural, puede generar 6.9 kWh de electricidad, puede funcionar un motor de 1 HP durante 2 horas, se pueden cocinar 3 comidas para una familia de cuatro personas y también puede funcionar una pantalla infrarroja de 3,000 calorías durante 3 horas”. Cabe mencionar que en la literatura no indican los usos para menores cantidades de biogás, por tanto, el gas generado en el reactor durante el tiempo de funcionamiento es mínimo y no se le podría dar ningún tipo de aprovechamiento, también, se debe tener en cuenta que es un reactor piloto y la investigación es a escala muy pequeña como para poder dar mayores conclusiones con respecto al volumen de gas obtenido durante el ensayo.

Por otro lado, durante los 2 meses y medio que duro ensayo se trataron aproximadamente 200 litros de residuo lácteo con lo cual se consiguió un volumen de gas de 0.1491 m³. En Boyacá se procesan 1,207,998 litros de leche por día (Acosta, 2022) y por cada litro (L) de leche procesada se generan aproximadamente de 0.2 a 10 litros de aguas residuales lácteas (Merino, 2017), al asumir un valor medio (5 L de agua residual por litro de leche procesada) y haciendo una estimación, se generarían en el departamento cerca de 6,039,990 litros de efluentes lácteos por día obteniendo así alrededor de 42,279 m³ de gas, siendo viable para un aprovechamiento.

Actividad metanogénica del lodo granular

A continuación, se presentan los resultados de actividad metanogénica (utilizando la metodología propuesta en el manual de prácticas de laboratorio para la clase de procesos de agua residual de la Universidad de Boyacá) con el lodo granular de la empresa de gaseosas INDEGA de Cali, como lo indicó Lingehed, 2006, citado por Md Huzir et al., 2019 “esta prueba es una de las herramientas clave para evaluar el rendimiento y la estabilidad del digestor anaeróbico, la actividad metanogénica representa la velocidad a la que los metanógenos (microbios) utilizan el sustrato (alimento) para producir metano y dióxido de carbono, dicha prueba se realiza para determinar la actividad máxima del inóculo que se puede producir por día por gramo de bacteria presente en la unidad de g DQO/g SSV*d”. En este caso, se muestran las gráficas y respectivo análisis de las mismas de los experimentos ejecutados. Se realizó el ensayo por duplicado, mejor dicho, se presentan dos ensayos de actividad metanogénica los cuales duraron aproximadamente 16 días en digestión, en donde diariamente se midió el

desplazamiento de hidróxido con el fin de llevar el control del volumen de metano generado durante el tiempo del ensayo y finalmente, con todo lo anterior se realizaron los cálculos propuestos en dicha metodología para la determinación de la actividad metanogénica.

Es importante mencionar que se utilizó una concentración de 2 gramos de sólidos suspendidos volátiles por litro, los ensayos se realizaron a una temperatura de 35°C y a la presión atmosférica de Tunja 550 mm Hg, además de que, el volumen de lodo utilizado en cada botella es de 20 ml. A continuación, se presenta una imagen que muestra cómo se realizó el montaje de dicho ensayo:

Figura 5

Ensayo actividad metanogénica del lodo granular



Fuente: Autora

A continuación, se presentan los resultados del primer ensayo de actividad metanogénica con el lodo granular utilizado:

Figura 6

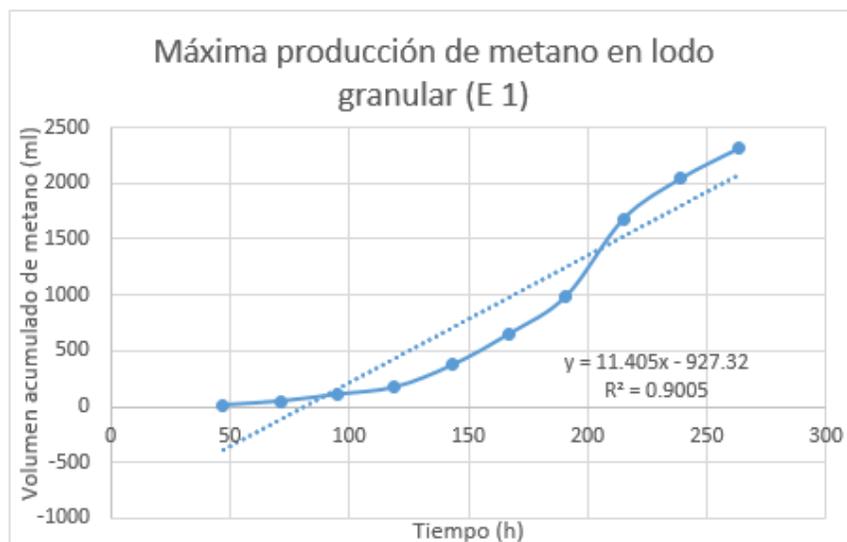
Producción de metano lodo granular (ensayo 1)



Fuente: Autora

En la Figura 6 se tiene la producción acumulada de metano generada en el ensayo 1 con el lodo granular, este tuvo una producción de 2,500 ml de metano aproximadamente.

Para los cálculos se requiere que a la pendiente máxima de la gráfica mostrada anteriormente se le aplique una función lineal y así poder sacar el R (tasa de producción de metano en ml CH₄/L).

Figura 7*Máxima producción de metano del lodo granular*

Fuente: Autora

Como se puede observar la tasa de producción de metano en el ensayo 1 fue de 11,405 ml CH₄/L, con este dato ya se pueden realizar los cálculos de actividad metanogénica, se presentan a continuación:

Tabla 4*Cálculos del AME en lodo granular (ensayo 1)*

Cálculos	Resultados
Factor de corrección por temperatura (FT) (ml CH ₄ /g DQO)	394.9
Factor de corrección por presión (FC) (ml CH ₄ /g DQO)	545.6
Actividad metanogénica del lodo (AME) (g DQO CH ₄ / g SSV*d)	0.502

Fuente: Autora

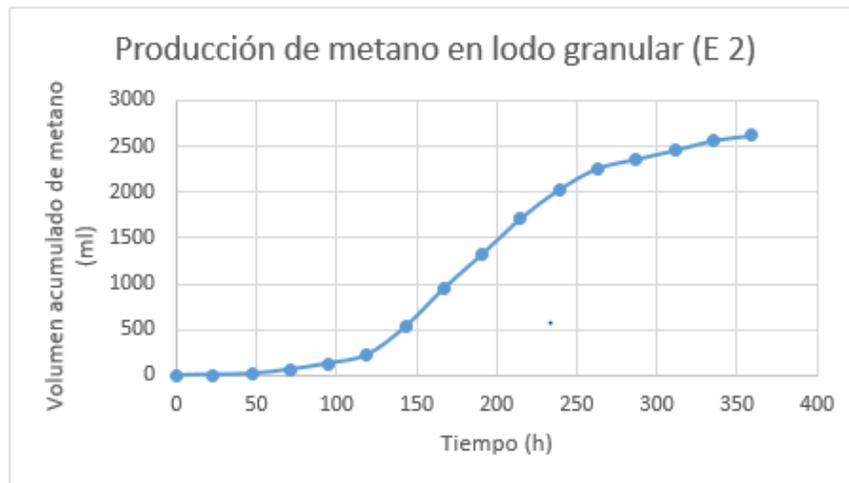
En la Tabla 4 se pueden contemplar los cálculos de actividad metanogénica, indicándonos así que la actividad metanogénica del lodo granular es de 0.502 g DQO CH₄/g SSV*d, estando así dentro de los rangos típicos de actividad metanogénica establecidos en la

literatura (0.500-1.500 g DQO CH_4/g), dichos valores son tomados de la guía de procesos unitarios de agua residual de la Universidad de Boyacá.

Ahora se presentan los datos del segundo ensayo realizado:

Figura 8

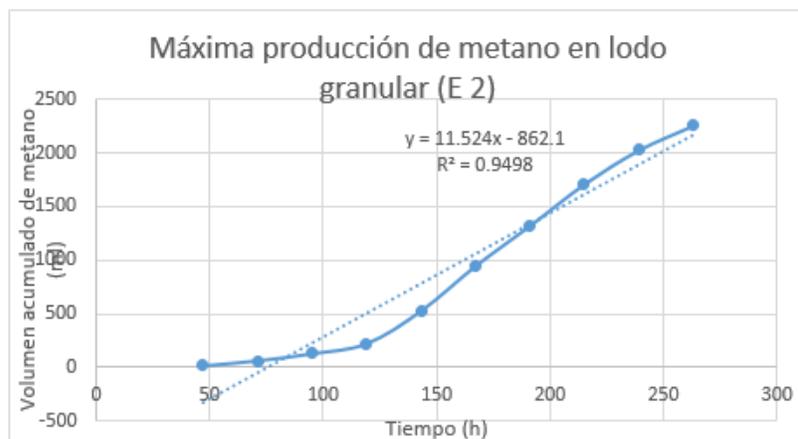
Producción de metano lodo granular (ensayo 2)



Fuente: Autora

Como se puede observar en la Figura 8 se tiene la producción acumulada de metano generada en el ensayo 2 con el lodo granular, este tuvo una producción de 2,620 ml de metano aproximadamente.

Para los cálculos se requiere que a la pendiente máxima de la gráfica mostrada anteriormente se le aplique una función lineal y así poder sacar el R (tasa de producción de metano en ml CH_4/L).

Figura 9*Máxima producción de metano del lodo granular*

Fuente: Autora

En el ensayo 2 la tasa de producción de metano fue de 11,524 ml CH₄/L, con este dato ya se pueden realizar los cálculos de actividad metanogénica, se presentan a continuación:

Tabla 5*Cálculos del AME en lodo granular (ensayo 2)*

Cálculos	Resultados
Factor de corrección por temperatura (FT) (ml CH ₄ /g DQO)	394.9
Factor de corrección por presión (FC) (ml CH ₄ /g DQO)	545.6
Actividad metanogénica del lodo (AME) (g DQO CH ₄ / g SSV*d)	0.507

Fuente: Autora

En la Tabla 5 se tienen los cálculos de actividad metanogénica, indicándonos así que la actividad metanogénica del lodo granular es de 0.507 g DQO CH₄/g SSV*d, concordando con lo establecido en la literatura.

En promedio la actividad metanogénica del lodo granular utilizado está en 0.504 g DQO CH₄/g SSV*d, estando dentro de los rangos máximos establecidos de actividad metanogénica para lodo granular (0.500 a 1.500 g DQO CH₄/g SSV*d) indicando así que tiene una alta

capacidad para producir metano. Este resultado es la medida experimental de la capacidad que tiene el lodo para transformar un sustrato artificial (ácido acético) en gas metano y también, indica de manera indirecta la fracción existente de bacterias metanogénicas en el lodo. En otras palabras, “es la masa de sustrato en forma de DQO que es convertida a metano por unidad de masa de biomasa y por unidad de tiempo” (Universidad Nacional de Colombia, 2002). Los resultados obtenidos se pueden comparar con el ensayo realizado por Javed y Tare (1999) citado por Hussain y Dubey (2015) en donde hicieron una prueba de actividad metanogénica con lodo granular utilizando ácido acético como sustrato a una temperatura de 35°C y aplicaron entre 2–2.5 g DQO/L consiguiendo así un valor de actividad entre 0.635 y 0.887 g DQO/ SSV *día, siendo valores cercanos a los alcanzados en la presente investigación.

Eficiencia en el sistema de tratamiento

En el capítulo mostrado a continuación se presentan los datos de calidad obtenidos en el afluente y los dos efluentes del reactor, en donde se obtuvieron 8 mediciones a temperatura de 35 grados centígrados, es decir, al inicio del funcionamiento del reactor, y 25 pruebas de calidad a temperatura ambiente, en este caso la eficiencia del reactor se evaluó en términos de remoción en cuanto a parámetros como DQO y grasas y aceites, además de ello, se realizó una comparación en cuanto a la calidad en las diferentes temperaturas y también a diferentes tiempos de retención hidráulica (en los primeros 45 días se trabajó con un caudal de 3 L/d obteniendo así un tiempo de retención de 4.4 días, luego de esto, el reactor trabajo 35 días con un caudal de 5 L/d teniendo así un tiempo de retención de 2.5 días). Adicional a esto, se realizó un pequeño análisis comparativo con la resolución 631 de 2015 de Colombia y finalmente, se hizo un análisis de las pruebas de AGV, pH, y alcalinidad con el fin observar el comportamiento del reactor en cuanto a su operatividad. Cabe mencionar que en todos los casos se manejó una DQO en el orden de 3,000 mg DQO/L aproximadamente.

Análisis de datos a diferentes temperaturas

Inicialmente se mostrará la comparación de la eficiencia del reactor con las dos temperaturas propuestas, es decir, se hizo el análisis de los datos a la temperatura de 35° C y a temperatura ambiente en cuanto a términos de remoción de DQO y grasas y aceites, y además de ello, al final se presentará un análisis estadístico para ver la variabilidad de los datos en las diferentes temperaturas.

En ambas temperaturas se trabajó un caudal en el reactor de 3 L/d y con una de DQO alrededor de 3,000 mg DQO/L. A continuación, se presentan los datos de DQO y grasas y aceites en las dos temperaturas:

Tabla 6*Resultados de DQO y grasas y aceites (35°C)*

Resultados										
	Fecha: 21 Noviembre 2022		Fecha: 23 Noviembre 2022		Fecha: 25 Noviembre 2022		Fecha: 28 Noviembre 2022		Fecha: 29 Noviembre 2022	
Parámetro	DQO (mg/l)	Grasas y aceites								
Afluente	3261	8.975	3771	9.2136	3621	8.3167	3459	9.9548	3321	9.4821
Efluente 1	670	2.2106	141	0.0233	574	2.024	223	0.0094	354	0.0314
Efluente 2	429	1.6369	117	0.0012	131	0.0062	33	0.0003	33	0.0001
Eficiencia	86.84	81.76	96.90	99.99	96.38	99.93	99.05	100.00	99.01	100.00
	Fecha: 30 Noviembre 2022		Fecha: 1 Diciembre 2022		Fecha: 2 Diciembre 2022					
Afluente	3477	9.8236	3399	9.7589	3504	9.8897				
Efluente 1	503	1.0208	425	0.1508	466	0.1411				
Efluente 2	7.1	0.0001	7.8	0.0001	71	0.00105				
Eficiencia	99.80	100.00	99.77	100.00	97.97	99.99				

Fuente: Autora

En la Tabla 6 se observan los resultados de DQO y grasas y aceites, como también el porcentaje de eficiencia de cada uno de ellos en las diferentes fechas de la toma de datos a la temperatura de 35°C, para realizar el análisis se va a hallar el promedio de los datos de eficiencia en cuanto a DQO y de grasas. Por tanto, el porcentaje de la eficiencia de DQO es 96.96% y para grasas y aceites es 97.71%.

Tabla 7*Resultados de DQO y grasas y aceites (17°C)*

Parámetro	DQO (mg/l)	Grasas y aceites								
	Fecha: 5 Diciembre 2022		Fecha: 7 Diciembre 2022		Fecha: 12 Diciembre 2022		Fecha: 14 Diciembre 2022		Fecha: 16 Diciembre 2022	
Afluente	3762	9.1024	3312	9.4821	2490	7.0887	4713	12.7643	3231	9.1432
Efluente 1	1345	3.0927	797	3.8112	1841	4.4012	2000	3.0665	1449	3.3236
Efluente 2	137	0.0012	186	0.0086	677	2.1968	586	2.0353	320	0.0241
Eficiencia	96.36	99.99	94.38	99.91	72.81	69.01	87.57	84.05	90.10	99.74
	Fecha: 19 Diciembre 2022		Fecha: 21 Diciembre 2022		Fecha: 11 de Enero 2023		Fecha: 13 de Enero 2023		Fecha: 16 de Enero 2023	
Afluente	3213	9.3159	3390	9.4291	4428	12.1256	4440	12.3678	4653	12.6751
Efluente 1	1345	2.1713	1841	2.8710	3621	8.9763	2700	6.6133	1200	3.0104
Efluente 2	368	0.0418	340	0.0349	2805	6.5174	1800	4.1704	600	2.0118
Eficiencia	88.55	99.55	89.97	99.63	36.65	46.25	59.46	66.28	87.11	84.13
	Fecha: 18 de Enero 2023		Fecha: 20 de Enero 2023		Fecha: 23 de Enero 2023		Fecha: 25 de Enero 2023		Fecha: 27 de Enero 2023	
Afluente	4536	12.5781	4416	12.1542	4329	11.9759	3648	9.6873	3054	9.0621
Efluente 1	1080	1.9309	897	3.8387	1148	2.1460	1452	2.2095	1328	1.9913
Efluente 2	354	0.0552	216	0.0186	406	0.0594	616	1.0349	781	1.1339
Eficiencia	92.20	99.56	95.11	99.85	90.62	99.50	83.11	89.32	74.43	87.49
	Fecha: 30 de Enero 2023		Fecha: 01 de Febrero 2023		Fecha: 03 de Febrero 2023		Fecha: 06 de Febrero 2023		Fecha: 08 de Febrero 2023	
Afluente	3788	9.2054	3084	8.6967	3500	9.3154	3130	9.0367	3532	9.7659
Efluente 1	1337	2.0021	2268	3.1647	1998	2.9560	1447	2.2499	1959	2.4797
Efluente 2	570	1.0169	889	1.4335	884	1.3351	788	1.2339	840	1.1442
Eficiencia	84.95	88.95	71.17	83.52	74.74	85.67	74.82	86.35	76.22	88.28
	Fecha: 10 de Febrero 2023		Fecha: 13 de Febrero 2023		Fecha: 15 de Febrero 2023		Fecha: 17 de Febrero 2023		Fecha: 20 de Febrero 2023	
Afluente	3498	9.4412	3602	9.7524	3118	8.6572	3651	9.8551	3460	8.7953
Efluente 1	1475	1.8690	1422	1.5691	1980	2.0767	1460	2.0056	1080	1.5256
Efluente 2	882	1.7442	863	1.2142	998	1.5160	664	0.4572	655	0.2567
Eficiencia	74.79	81.53	74.79	87.55	67.99	82.49	81.81	95.36	81.07	97.08

Fuente: Autora

En la Tabla 7 se tienen los datos de DQO y grasas y aceites, como también el porcentaje de eficiencia de cada uno de ellos a la temperatura de 17°C, para realizar el análisis se va a hallar el promedio de los datos. Por tanto, el porcentaje de la eficiencia de DQO es 80.03% y para grasas y aceites es 88.04%.

Como se mencionó anteriormente la eficiencia de remoción en la temperatura de 35°C en cuanto a DQO y grasas y aceites fue de 96.96% y 97.71, y a temperatura ambiente de 80.03% y 88.04% respectivamente. En este ensayo la DQO en el afluente vario entre 2,400 mg/L y 4600 mg/L, al observar la eficiencia de remoción, esta fue mejor a temperatura de 35°C, esto se da debido a que a esta temperatura se tiene mayor actividad microbiana, es decir, las bacterias están más activas a estas temperaturas lo que facilita que degraden más rápido la MO, además de que, se da una mayor producción de gas. Por otro lado, a temperatura ambiente se obtuvo una menor eficiencia pero esto no quiere decir que no haya habido una buena remoción, ya que un 80% de eficiencia sigue siendo alto, pero esta reducción en la eficiencia se da a causa de que al trabajar el reactor a temperatura ambiente este puede sufrir unas variaciones de temperatura a lo largo del día (puede subir o bajar más la temperatura del reactor) y lo que estos cambios generan es que haya una menor velocidad en la actividad de las bacterias y por ello disminuye la eficiencia (Ordoñez, 2022). Dichas eficiencias son concordantes con el estudio realizado por Parra (2010), el cual obtuvo una eficiencia de remoción de contaminantes del 80% al tratar un residuo de lacto suero a temperatura ambiente con cargas entrantes de DQO en el orden de 5,200-7,800 mg DQO/L-día y también, con el estudio realizado por Gonzales et. al (1994), en donde se consiguió una eficiencia de remoción de 96.4% al tratar aguas residuales lácteas con valores de DQO de 1100-2200 mg DQO/L-día, en este caso, al entrar una menor carga al sistema se pudo obtener una mayor remoción.

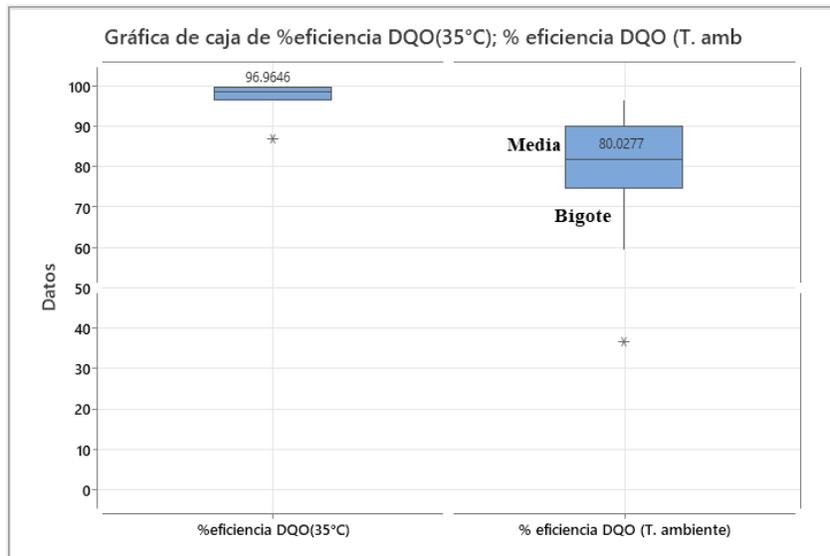
Debido a lo anterior, la temperatura es uno de los factores ambientales más importantes, ya que con ella se afecta el crecimiento y la supervivencia microbiana. Esta puede afectar de dos formas diferentes a los microorganismos, a medida que la temperatura sube, las reacciones enzimáticas son más rápidas y el crecimiento se hace más rápido. Sin embargo, por encima de cierta temperatura, las proteínas, ácidos nucleicos y otros componentes celulares pueden dañarse irreversiblemente. Por encima de ese punto las funciones celulares paran (Morales, 2005). Por otro lado, la temperatura ambiente es muy inestable, dadas las diferencias de temperatura ambiental a lo largo de un día; la reducción de la temperatura, puede reducir

considerablemente la velocidad de la actividad microbiana y afectar la eficiencia del tratamiento, entre más baja la temperatura, menor la eficiencia, (Chae, 2008, citado por Ordoñez, 2022). Por lo tanto, se debe tener en cuenta que para cada microorganismo existe una temperatura óptima a la cual el crecimiento es lo más rápido posible, y se llega a la conclusión de que las bacterias trabajan mejor a temperaturas constantes entre 32-36°C (Morales, 2005).

Análisis de variabilidad para las dos temperaturas

Para observar la variación de los datos entre la temperatura a 35°C y temperatura ambiente se decidió hallar la desviación estándar para cada uno de ellos y unos diagramas de cajas.

Los resultados de desviación para ambas temperaturas en cuanto a DQO fueron los siguientes; a 35°C la desviación fue de 4.28% y a temperatura ambiente de 13.09%, en ambos casos se puede decir que hay una variabilidad pequeña con respecto a la media lo que indica poca incertidumbre y bajo error en las evaluaciones. Sin embargo, los resultados a 35°C tuvieron una menor variabilidad ya que su desviación fue de 4.28%, es decir sus datos están más cercanos al valor del promedio. Posteriormente, se presentan los diagramas de cajas para observar la variabilidad de los datos:

Figura 10*Eficiencia DQO en las dos temperaturas*

Fuente: Autora

Como se puede contemplar en la Figura 10 se encuentran los diagramas de cajas de la eficiencia de DQO en ambas temperaturas, en esta gráfica se tiene el valor de la media de cada uno de los datos. Para la DQO a 35°C el Q1 es de 96.511%, el cuartil Q3 es 99.589%, el rango intercuartílico es de 3.078%, el IC entre 94.0% y de 99.93%, al observar el RIC los datos tienen una dispersión muy baja, la caja no presenta un ancho significativo (es decir la dispersión de los datos es mínima). Al comparar el promedio de este dato (96.96%) con el IC se puede observar que está mínimamente alejado del rango, sin embargo, no se considera que haya algún tipo de afectación y se estima que está dentro del rango de confianza. Adicional a esto, hay un dato atípico el cual fue del primer día de funcionamiento del reactor y este tuvo una eficiencia menor que los demás días (86.84%).

En el caso la DQO a temperatura ambiente el Q1 es de 74.584%, el cuartil Q3 es 90.033%, el rango intercuartílico es de 15.448%, el IC entre 74.90% y 85.16%, además de lo anterior, este cuenta con un “bigote” inferior amplio y nos indica que un cuarto de los datos se encuentra en un rango de eficiencia de 59.459% y 74.584%. Al observar el RIC los datos tienen una dispersión pequeña, el ancho de la caja indica que no existe una dispersión alta en los estudiados. Al comparar el promedio obtenido para esta DQO (80.03%) con el IC se puede

observar que está dentro del rango de confianza, también, se cuenta con un dato atípico en la eficiencia y fue de 36.65%. Además de lo analizado anteriormente, se puede contemplar que los datos de DQO a 35°C estuvieron la mayoría del tiempo por encima del 95% de remoción, mientras que a la temperatura ambiente se mantuvo en un rango entre el 60-90%.

Ahora se presentarán los resultados de desviación estándar y los diagramas de cajas con la eficiencia de remoción de grasas y aceites con su respectivo análisis:

Los resultados de desviación para ambas temperaturas en cuanto a grasas y aceites, a 35°C fue de 6.44% y a temperatura ambiente de 12.82%, en ambos casos se puede decir que hay una variabilidad pequeña con respecto a la media lo que indica poca incertidumbre y bajo error en las evaluaciones. Sin embargo, los resultados a 35°C tuvieron una menor variabilidad, es decir sus datos están más cercanos al valor del promedio. A continuación, se presentan los diagramas de cajas para observar la variabilidad de los datos:

En la situación de la remoción de grasas y aceites para la temperatura de 35°C esta fue alta y tuvo muy poca variabilidad en los datos, por esto, el diagrama de caja no se generaba de forma adecuada. Por tanto, se presentará una tabla con los datos mencionados anteriormente:

Tabla 8

Eficiencia de grasas y aceites a 35°C

Fecha	Grasas y aceites (%)
21-nov-22	81.76
23-nov-22	99.99
25-nov-22	99.93
28-nov-22	100.00
29-nov-22	100.00
30-nov-22	100.00
1-dic-22	100.00
2-dic-22	99.99

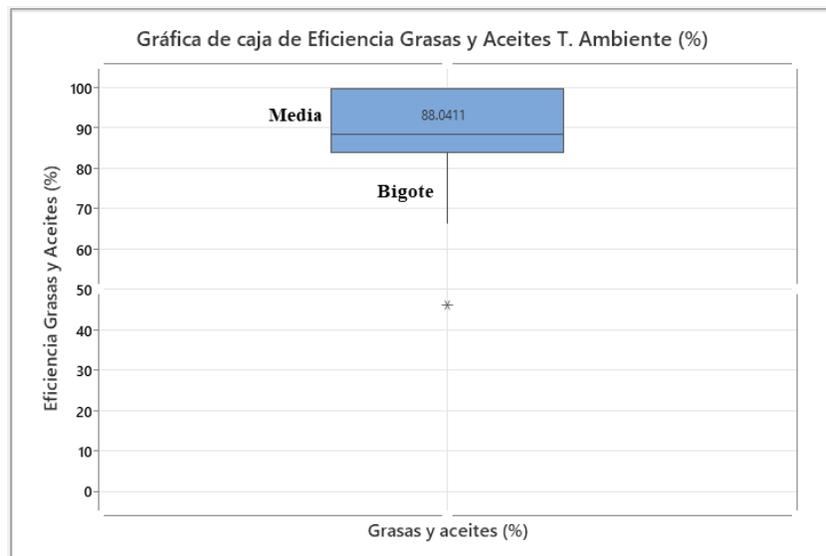
Fuente: Autora

En la Tabla 8 se puede ver que se obtuvo una alta remoción de grasas y aceites a esta temperatura (casi siempre en un 100%) y la variación de los datos es muy mínima, el menor valor de eficiencia (81.76%) se presentó el primer día de funcionamiento del reactor lo que se

da por la adaptación de los microorganismos al sustrato. Para el caso de los datos a temperatura ambiente se les realizó el diagrama de cajas y se presenta a continuación:

Figura 11

Eficiencia grasas y aceites a temperatura ambiente



Fuente: Autora

En la Figura 11 se encuentra el diagrama de cajas de la eficiencia de grasas y aceites, en esta gráfica se tiene el valor de la media de los datos. El Q1 es de 83.785%, el cuartil Q3 es 99.556%, el rango intercuartílico es de 15.770%, el IC entre 83.02% y 93.07%, además de esto, cuenta con un bigote inferior amplio que indica que un cuarto de los datos analizados se encuentra en un rango de eficiencia 66.280% y 83.785%. Al observar el RIC los datos tienen una dispersión baja, la caja no presenta un ancho significativo (es decir la dispersión de los datos es mínima). Al comparar el promedio del dato estudiado (88.04%) con el IC se puede observar que se encuentra dentro del rango de confianza, adicional a esto, cuenta con un dato atípico el cual fue del día en que se disminuyó la temperatura del reactor y esta puede ser la causa del descenso en la eficiencia (46.25%).

En conclusión y como se puede ver en las gráficas, a los 35°C se tuvo una eficiencia de remoción alta (por encima del 96%) en cuanto a los dos parámetros analizados, siendo esta la temperatura óptima para tratar los residuos y obtener una calidad mejor en el efluente. Sin embargo, a temperatura ambiente no se obtuvo una mala eficiencia de remoción, siempre estuvo

entre el 70-90%. Pero si se quiere una remoción más rápida y más eficiente, es mejor trabajar el reactor a una temperatura de 35°C.

Análisis de datos a diferentes TRH

Para esta investigación se llevó un control del efluente del reactor con el fin de hallar el TRH con el cual estaba funcionando el mismo y a continuación se muestran los datos de DQO y grasas y aceites en los diferentes tiempos de retención para observar la afectación de este parámetro de operación en la eficiencia del reactor, se debe tener en cuenta que en ambos TRH se trabajó el reactor a temperatura ambiente y con una DQO alrededor de 3,000 mg DQO/L. Inicialmente se trabajó con un caudal de 3 L/d y con el control del efluente se pudo determinar que con este caudal se tenía un tiempo de retención hidráulica de 4.4 días (funcionó 45 días con este TRH), luego de esto, el caudal su aumento 5 L/d y se obtuvo un TRH de 2.5 días (el reactor trabajo 35 días con este TRH).

A continuación, se presentan los resultados de calidad obtenidos para el TRH de 4.4 días:

Tabla 9*Resultados de calidad con un TRH 4.4 días*

Parámetro	DQO (mg/l)	Grasas y aceites								
	Fecha: 5 Diciembre 2022		Fecha: 7 Diciembre 2022		Fecha: 12 Diciembre 2022		Fecha: 14 Diciembre 2022		Fecha: 16 Diciembre 2022	
Afluente	3762	9.1024	3312	9.4821	2490	7.0887	4713	12.7643	3231	9.1432
Efluente 1	1345	3.0927	797	3.8112	1841	4.4012	2000	3.0665	1449	3.3236
Efluente 2	137	0.0012	186	0.0086	677	2.1968	586	2.0353	320	0.0241
Eficiencia	96.36	99.99	94.38	99.91	72.81	69.01	87.57	84.05	90.10	99.74
	Fecha: 19 Diciembre 2022		Fecha: 21 Diciembre 2022		Fecha: 11 de Enero 2023		Fecha: 13 de Enero 2023		Fecha: 16 de Enero 2023	
Afluente	3213	9.3159	3390	9.4291	4428	12.1256	4440	12.3678	4653	12.6751
Efluente 1	1345	2.1713	1841	2.8710	3621	8.9763	2700	6.6133	1200	3.0104
Efluente 2	368	0.0418	340	0.0349	2805	6.5174	1800	4.1704	600	2.0118
Eficiencia	88.55	99.55	89.97	99.63	36.65	46.25	59.46	66.28	87.11	84.13
	Fecha: 18 de Enero 2023		Fecha: 20 de Enero 2023		Fecha: 23 de Enero 2023					
Afluente	4536	12.5781	4416	12.1542	4329	11.9759				
Efluente 1	1080	1.9309	897	3.8387	1148	2.1460				
Efluente 2	354	0.0552	216	0.0186	406	0.0594				
Eficiencia	92.20	99.56	95.11	99.85	90.62	99.50				

Fuente: Autora

En la Tabla 9 se presentan los datos de calidad obtenidos para el tiempo de retención de 4.4 días y de igual forma que los datos analizados anteriormente, se halló el promedio de los datos en cuanto a la eficiencia de remoción de DQO y grasas y aceites, los cuales para este caso fueron: 83.14% y 88.21% respectivamente.

Luego de esto, el caudal se aumentó con el fin de disminuir el TRH, manejando un caudal de 5 L/d se obtuvo un TRH de 2.5 días, los análisis de calidad de este se muestran a continuación:

Tabla 10*Resultados de calidad con un TRH 2.5 días*

Parámetro	DQO (mg/l)	Grasas y aceites								
	Fecha: 25 de Enero 2023		Fecha: 27 de Enero 2023		Fecha: 30 de Enero 2023		Fecha: 01 de Febrero 2023		Fecha: 03 de Febrero 2023	
Afluente	3648	9.6873	3054	9.0621	3788	9.2054	3084	8.6967	3500	9.3154
Efluente 1	1452	2.2095	1328	1.9913	1337	2.0021	2268	3.1647	1998	2.9560
Efluente 2	616	1.0349	781	1.1339	570	1.0169	889	1.4335	884	1.3351
Eficiencia	83.11	89.32	74.43	87.49	84.95	88.95	71.17	83.52	74.74	85.67
	Fecha: 06 de Febrero 2023		Fecha: 08 de Febrero 2023		Fecha: 10 de Febrero 2023		Fecha: 13 de Febrero 2023		Fecha: 15 de Febrero 2023	
Afluente	3130	9.0367	3532	9.7659	3498	9.4412	3602	9.7524	3118	8.6572
Efluente 1	1447	2.2499	1959	2.4797	1475	1.8690	1422	1.5691	1980	2.0767
Efluente 2	788	1.2339	840	1.1442	882	1.7442	863	1.2142	998	1.5160
Eficiencia	74.82	86.35	76.22	88.28	74.79	81.53	74.79	87.55	67.99	82.49
	Fecha: 17 de Febrero 2023		Fecha: 20 de Febrero 2023							
Afluente	3651	9.8551	3460	8.7953						
Efluente 1	1460	2.0056	1080	1.5256						
Efluente 2	664	0.4572	655	0.2567						
Eficiencia	81.81	95.36	81.07	97.08						

Fuente: Autora

En la Tabla 10 se encuentran los datos de calidad obtenidos para el tiempo de retención de 2.5 días, se halló el promedio de los datos en cuanto a la eficiencia de remoción de DQO y grasas y aceites, los cuales para este caso fueron: 76.65% y 87.80% respectivamente.

Como se mencionó anteriormente la eficiencia de remoción en el TRH de 4.4 días en cuanto a DQO y grasas y aceites fue 83.14% y 88.21%, y a el TRH de 2.5 días fue de 76.65% y 87.80% respectivamente. En este ensayo la DQO en el afluente vario entre 3,000-4,600 mg/L, como se puede observar la eficiencia de remoción fue mejor a el TRH 4.4 días, esto se da debido a que el agua residual permanece más tiempo dentro del reactor y las bacterias tienen mayor tiempo para degradar la MO, dichos resultados concuerdan con el estudio llevado a cabo por Muralikrishnan (2017), en donde implementó un reactor anaerobio de flujo ascendente para tratar un residuo lácteo con una DQO entrante de 1,350 mg DQO/L y con un TRH de 24 horas, obteniendo así una eficiencia de remoción entre 76-89.48%. Además, se puede explicar de la siguiente manera:

La cantidad de MO degradada aumenta al aumentar el TRH, mientras que la producción volumétrica de metano (producción por unidad de reactor) disminuye una vez superado el óptimo; por lo tanto, es necesario determinar para cada tipo de residuo y de digestor el tiempo de retención que optimiza el proceso. Los TRH están relacionados con dos factores, el tipo de sustrato y la temperatura del mismo. La selección de un rango de mayores temperaturas conllevaría a una disminución en los tiempos de retención requeridos, por lo tanto, serán menores los volúmenes de digestor necesarios para un determinado volumen de material (Torres, 2018).

Por tanto, si se va a trabajar el reactor a una temperatura ambiente es necesario tener un mayor TRH, con el fin de obtener una mayor eficiencia de remoción de contaminantes.

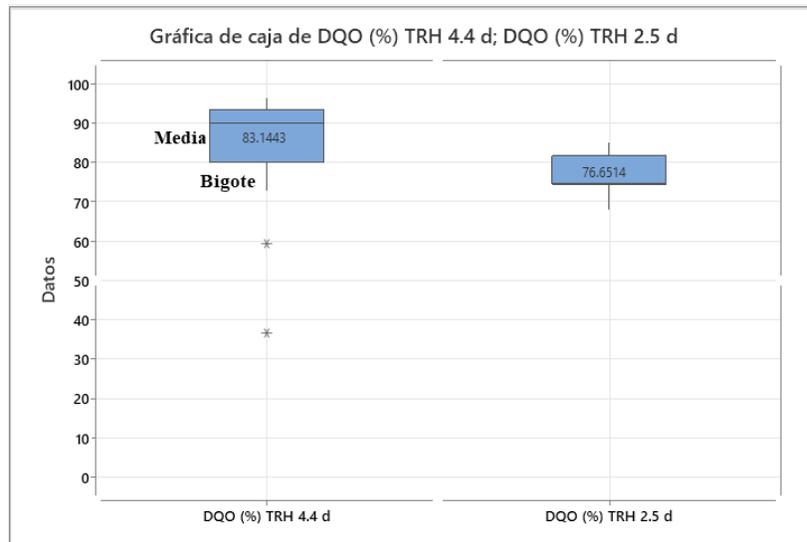
Análisis de variabilidad para los dos TRH

Para observar la variación de los datos en los dos TRH se les va a hallar la desviación estándar y los diagramas de cajas correspondientes.

Los resultados de desviación los dos TRH para DQO y grasas y aceites, como se puede observar para el TRH de 2.5 días se obtuvo una desviación de 5.06% y 4.67% respectivamente, indicando así una menor variabilidad en los datos, es decir, valores están más cerca del promedio, es decir existe poca incertidumbre y bajo error en las evaluaciones. Por otro lado, para el TRH de 4.4 días tuvieron una variabilidad un poco mayor con respecto a la media (17.25% y 17.57% respectivamente). A continuación, se presentan los diagramas de cajas:

Figura 12

Diagrama de cajas de DQO en los diferentes TRH



Fuente: Autora

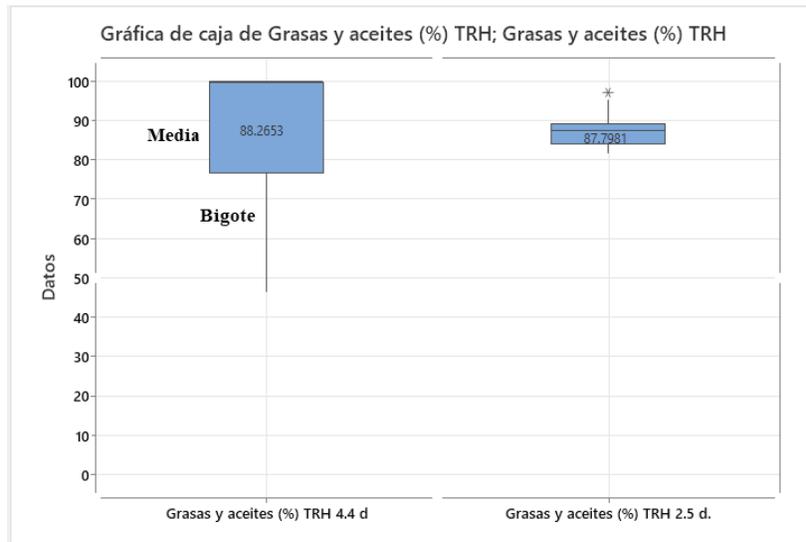
En la Figura 12 se encuentra el diagrama de cajas de la eficiencia de DQO en los dos TRH, en esta gráfica se tiene el valor de la media de cada uno de los datos. El Q1 para la DQO en el TRH de 4.4 días es de 79.958%, el cuartil Q3 es 93.289%, el rango intercuartílico es de 13.331% y el IC entre 73.77% y 92.52%. Analizando el RIC este nos muestra que hay una dispersión baja en los datos analizados, la caja no presenta un ancho significativo (existe poca dispersión de los datos). Al comparar el promedio del dato analizado (83.14%) con el IC este está dentro del rango de confianza, además de ello, cuenta con dos datos atípicos los cuales son de los dos primeros días de inicio del reactor a temperatura ambiente y por ello bajo la eficiencia, ya que las bacterias deben adaptarse a la nueva temperatura y su actividad disminuye (es decir, degradan menor cantidad de MO) y adicional a esto, cuenta con un bigote que nos muestra que el 25% de los datos se encuentra entre un rango de 72-80% de eficiencia.

Para la DQO en el TRH de 2.5 el Q1 fue de 74.506%, el Q3 de 81.627%, el rango intercuartílico de 7.121%, el IC entre 73.79% y 79.51%. Al observar el RIC este nos indica que estos datos tuvieron una mínima dispersión en cuanto a la media, el ancho de la caja es pequeño (poca variabilidad de los datos) y, además, al comparar el promedio del dato analizado (76.65%) con el IC se puede establecer que se encuentra dentro del rango de confianza. También, cuenta con un bigote que nos muestra que el 25% de los datos se encuentran entre 67-75% de eficiencia.

De igual forma, al comparar las dos remociones, en TRH de 4.4 días esta estuvo siempre entre el 75-95%, mientras que en el TRH de 2.5 días fue de 68-85%, mostrando así una mayor eficacia en el TRH mayor. Ahora, se presentarán los diagramas de cajas para grasas y aceites:

Figura 13

Diagrama de cajas de grasas y aceites en los diferentes TRH



Fuente: Autora

En la Figura 13 se encuentra el diagrama de cajas de la eficiencia de grasas y aceites en los dos TRH, en esta gráfica se tiene el valor de la media de cada uno de los datos. El Q1 de grasas y aceites para el TRH de 4.4 días es de 76.532%, el cuartil Q3 es 99.791%, el rango intercuartílico es de 23.259%, el IC entre 78.71% y 97.92%. Al analizar el RIC este nos muestra que hay una dispersión medianamente alta en cuanto a la media, el ancho de la caja es más o menos grande indicando así que existe una dispersión considerable de los datos, y al comparar el promedio de este dato estudiado (88.21%) con el IC se puede observar que se encuentra dentro del rango de confianza. Adicional a esto, cuenta con un bigote el cual nos indica que el 25% de los datos se encuentran en un rango entre el 46-86% de eficiencia.

Para grasas y aceites en el TRH de 2.5 días, el Q1 fue de 84.054% el Q3 de 89.226%, el rango intercuartílico de 5.171%, el IC entre 85.16% y 90.44%. Al examinar el RIC nos muestra que estos datos tienen una dispersión mínima en cuanto a la media, la caja tiene un ancho mínimo es decir hay poca dispersión de los datos, y, además, al comprar el promedio del dato

estudiado (87.80%) con el IC se puede concluir que se encuentra dentro del rango de confianza. También, se cuenta con un bigote el cual señala que el 25% de los datos se encuentran entre un rango de 89-95% de eficiencia y tiene un dato atípico que señala que en el último día de funcionamiento del reactor este tuvo una eficiencia de remoción de 97%.

En este caso se debe tener en consideración que los datos del TRH de 4.4 días tuvieron una mayor dispersión dado que coincidió con el cambio de temperatura y esto afectó la actividad de las bacterias hasta que se volvieron a adaptar a su nuevo ambiente, por ello, los datos del TRH de 2.5 tuvo una dispersión menor ya que las bacterias se habían adaptado a la temperatura. Sin embargo, el TRH mayor tuvo una eficiencia en un rango entre 85-95% la gran parte del tiempo, mientras que para el otro TRH la eficiencia estuvo entre 75-85%, siendo mejor para el tratamiento del residuo el TRH de 4.4 días.

Análisis de datos con la resolución 631 de 2015 de Colombia

En este apartado se verificará si los datos analizados anteriormente cumplen con los límites máximos permisibles establecidos en la norma de vertimientos 631 de 2015 de Colombia para la industria láctea. Inicialmente se verificará la resolución en las dos temperaturas implementadas y luego para los dos tiempos de retención utilizados en cuanto a los parámetros de DQO y grasas y aceites. A continuación, se presenta una tabla resumen con los resultados obtenidos:

Tabla 11

Resolución 631 de 2015 y resultados de las mediciones

Parámetros	DQO (mg DQO/L)	Grasas y aceites
Límites máximos permisibles Resolución 631 de 2015	450	20 mg/L
Temperatura 35°C	7-131	0.0001- 0.0012 g/L (0.1-1.2 mg/L)
Temperatura Ambiente	570-1000	1.017-1.516 g/L (1017-1516 mg/L)
TRH 4.4 días	137-406	0.0012- 0.059 g/L (1.2-59.4 mg/L)
TRH 2.5 días	570-1000	1.017- 1.512 g/L (1017- 1517 mg/L)

Fuente: Autora

Al observar la Tabla 11 en el caso de los datos a la temperatura de 35°C la DQO se mantuvo en un rango entre 7-131 mg DQO/L cumpliendo así con el límite establecido en la resolución el cual es de 450 mg DQO/L y en cuanto a grasas y aceites el rango se mantuvo entre 0.0001- 0.0012 g/L (0.1-1.2 mg/L respectivamente) cumpliendo con el límite máximo que es 20 mg/L, mostrando así que esta temperatura es efectiva para el tratamiento del residuo lácteo sintético implementado.

Para los datos de la temperatura ambiente, la DQO en la mayoría del tiempo se mantuvo entre 570-1,000 mg DQO/L, es decir, no cumple con el límite máximo propuesto, adicional a esto, durante 5 días se tuvo una DQO por encima de los 1,000 mg/L afectando así la calidad obtenida en el efluente. En cuanto a grasas y aceites el rango se mantuvo entre 1.017-1.516 g/L (1,017-1,516 mg/L) incumpliendo así con la normatividad. Comparando con los días que se tuvo una DQO alta también se obtuvieron valores de grasas y aceites por encima de 4,170.4 mg/L, mostrando así a que esta temperatura no se logra la remoción suficiente para cumplir con la normatividad.

Por otro lado, en el tiempo de TRH de 4.4 días la DQO en su gran mayoría se mantuvo en un rango de 137-406 mg DQO/L cumpliendo con la normatividad, pero tuvo 4 días en que la DQO estuvo por encima de los 600 mg/L afectando así la calidad del efluente tratado. Para grasas y aceites se mantuvo en un rango de 0.0012- 0.059 g/L (1.2-59.4 mg/L), incumpliendo con la resolución y concordando con los días en que la DQO estuvo fuera del rango, el volumen de grasas y aceites alcanzó valores de 6,517.4 mg/L estando muy por encima de lo permitido.

Finalmente, en el TRH de 2.5 días la DQO en su gran mayoría se mantuvo en un rango de 570-1,000 mg DQO/L incumpliendo así con el límite permitido y para grasas y aceites estuvo en un rango de 1.017- 1.512 g/L (1,017- 1,517 mg/L) es decir, tampoco cumple con lo establecido en la resolución 631 de 2015.

Como se pudo observar los resultados obtenidos para la temperatura de 35°C tuvieron una mayor eficiencia en cuanto a la remoción de DQO y grasas y aceites, sin embargo, esto no es viable ya que para un sistema más grande habría que hacer una gran inversión de energía y dinero para mantener el sistema caliente, por otro lado, los ensayos con los dos TRH mostraron que se obtiene una mayor eficiencia con un TRH hidráulica mayor, por ende, sería posible obtener una buena remoción de contaminantes a temperatura ambiente y un mayor TRH.

En general, este tratamiento se sigue proponiendo como un pretratamiento ya que no sería posible cumplir con la normatividad implementando solo dicho sistema de tratamiento.

Análisis de operación del reactor

Para hacer una pequeña evaluación de la operatividad del reactor se analizaron a modo general los datos obtenidos durante el ensayo, en este caso el análisis se realizó con los resultados obtenidos en la temperatura de 35° C y en los dos TRH (4.4 y 2.5 días), con el fin de observar si hubo variaciones importantes en el sistema en cuanto a pH, alcalinidad y acumulación de AGV, lo que ayudó a determinar si hubo o no algún tipo de inhibidores en el sistema. Los resultados se presentan a continuación:

En primera instancia se van a evaluar dichos parámetros a temperatura de 35°C para verificar como se llevaron a cabo los procesos dentro del reactor y si están dentro de los valores normales establecidos en la literatura.

Tabla 12*Resultados AGV, pH y Alcalinidad a 35°C*

Parámetro	pH	Alcalinidad			pH	AGV (mg/L)	Alcalinidad		pH	AGV (mg/L)	Alcalinidad	
		Fenolftaleína	Total (mg/L CaCO ₃)	Fenolftaleína			Total (mg/L CaCO ₃)	Fenolftaleína			Total (mg/L CaCO ₃)	
		21-nov					23-nov				25-nov	
Afluente	7.33	-	0	1000	7.19	-	0	874	7.26	-	0	1000
Efluente 1	8.28	38.1	0	16080	8.13	52.8	0	14800	8.13	57.2	0	16160
Efluente 2	8.8	66.7	30	10720	8.81	37.4	20	14320	8.77	36.7	20	16000
		28-nov					29-nov				30-nov	
Afluente	7.15	-	0	686	7.16	-	0	824	7.37	-	0	934
Efluente 1	7.86	22.0	0	13280	8.11	40.7	0	13840	8.2	53.1	0	15040
Efluente 2	8.74	8.1	18	8640	8.78	8.8	14	12960	8.79	9.2	22	13600
		1-dic					2-dic					
Afluente	7.41	-	0	800	7.52	-	0	790				
Efluente 1	8.11	87.2	0	14960	8.16	163.1	0	13840				
Efluente 2	8.75	23.5	16	13440	8.69	213.3	8	15440				

Fuente: Autora

En la Tabla 12 se encuentran los datos de pH, AGV y alcalinidad en la temperatura de 35°C los cuales se evaluaron únicamente en el efluente final del reactor (efluente 2). Como se puede observar en todos los ensayos el pH del efluente se mantuvo en un rango de 8-8.8 indicando así un efluente alcalino. El pH es una de las variables más importantes, el mantenimiento en un rango apropiado es requerido para una DA eficiente, “deben evitarse valores de pH inferiores a 6.0 y superiores a 8.3, ya que pueden inhibirse los microorganismos formadores de metano, el pH óptimo depende del tipo de microorganismos involucrados en el proceso de digestión, así como de tipo del sustrato” (Chernicharo, 2007); al analizar los resultados obtenidos, el pH está un poco por encima del valor permitido pero con los datos de calidad analizados al inicio del capítulo se pudo establecer que no hubo afectación en los procesos de digestión.

En cuanto a la alcalinidad, esta tiene una interacción con los ácidos grasos volátiles durante el proceso de digestión, y se basa en que “si la alcalinidad del sistema es capaz de neutralizar los ácidos formados en el proceso y amortiguar el pH en caso de acumulación de los ácidos volátiles. Tanto la alcalinidad como los ácidos grasos volátiles derivan principalmente de la descomposición de compuestos orgánicos durante la digestión” (Chernicharo, 2007). La alcalinidad es necesaria para evitar disminuir el pH debido a la acumulación de ácidos grasos volátiles al aplicar una carga orgánica alta. Los digestores anaeróbicos funcionan en una amplia variedad de valores de alcalinidad dependiendo del sustrato a degradar. Estos valores oscilan entre 2,000 y 18,000 mg CaCO₃/L (Álvarez et al., 2010, citado por Parra, 2010), mencionado lo anterior y al observar los datos de alcalinidad en el efluente estos se mantuvieron en un rango de 8,000-16,000 mg CaCO₃/L estando dentro del rango establecido en la literatura.

Los AGV se producen debido a que las bacterias fermentativas usan la MO soluble para obtener energía y dejan como productos intermedios hidrogeno y ácidos orgánicos, la producción de los AGV completa la primera etapa del proceso de digestión (acidogénesis) (Morales, 2005), en un reactor estable la concentración de AGV en el efluente es relativamente baja y se encuentra usualmente en el rango de 50-250 mg/L (Ministerio de Energía de Chile, 2011) y según Wesley Eckenfelder (2000), citado por Parra (2010) se mantendrá entre 20 mg/L y 200 mg/L dependiendo de la carga que se está introduciendo al reactor, mirando los resultados del efluente los AGV se mantuvieron la mayoría del tiempo en un rango entre 23-67 mg/L estando así dentro de los parámetros establecidos en la literatura, por otro lado, tres mediciones estuvieron en un rango de 8-9 mg/L indicando así que hubo un buen contenido de alcalinidad en el sistema que actuó amortiguando la producción de los AGV, también, el día 2 de diciembre se tuvo un dato de 213.3 mg/L el cual está un poco por encima de los demás datos obtenidos, sin embargo, sigue cumpliendo con los valores mostrados anteriormente.

Continuando con la evaluación de los datos, ahora se presentarán los resultados para los TRH y su correspondiente análisis:

Tabla 13*Resultados AGV, pH y Alcalinidad en TRH de 4.4 días*

Parámetro	pH	Alcalinidad			pH	AGV (mg/L)	Alcalinidad			pH	AGV (mg/L)	Alcalinidad		
		AGV (mg/L)	Fenolftaleína	Total (mg/L CaCO3)			AGV (mg/L)	Fenolftaleína	Total (mg/L CaCO3)			AGV (mg/L)	Fenolftaleína	Total (mg/L CaCO3)
		5-dic					7-dic					12-dic		
Afluente	7.21	-	0	690	6.86	-	0	440	6.69	-	0	366		
Efluente 1	7.95	194.6	0	11520	7.85	169.7	0	9840	6.89	531.0	0	7840		
Efluente 2	8.6	240.6	8	14000	8.57	91.9	20	12800	8.35	290.8	0	9760		
		14-dic					16-dic					19-dic		
Afluente	6.77	-	0	460	6.8	-	0	392	6.86	-	0	380		
Efluente 1	7.08	205.9	0	7520	6.78	777.8	0	11040	6.7	184.1	0	8000		
Efluente 2	8.4	120.3	0	11520	8.57	127.3	0	11920	8.4	99.3	0	10400		
		21-dic					11-ene					13-ene		
Afluente	6.69	-	0	366	6.94	-	0	326	6.7	-	0	340		
Efluente 1	6.89	325.4	0	7840	7.99	177.1	0	8720	6.95	162.7	0	9600		
Efluente 2	8.35	305.2	0	9760	8.33	212.2	0	6480	8	205.2	0	6880		
		16-ene					18-ene					20-ene		
Afluente	6.48	-	0	304	6.43	-	0	262	6.65	-	0	346		
Efluente 1	6.84	318.4	0	5920	6.82	705.8	0	6000	6.77	770.8	0	5120		
Efluente 2	7.99	177.1	0	7840	8.09	177.1	0	6880	8.2	180.6	0	6560		
		23-ene												
Afluente	6.86	-	0	374										
Efluente 1	6.85	489.7	0	4320										
Efluente 2	8.2	169.7	0	5840										

Fuente: Autora

En la Tabla 13 se encuentran los datos de pH, AGV y alcalinidad en el TRH de 4.4 días los cuales se evaluaron únicamente en el efluente final del reactor. Como se puede observar el pH se mantuvo en un rango de 8-8.6 indicando así un efluente alcalino y con resultados cercanos a los establecidos en la literatura (pH 6.0 – 8.3), aun que sobrepasan un poco el rango, los procesos de digestión no se vieron afectados según los datos de calidad analizados para este TRH.

Los valores de alcalinidad estuvieron en un rango de 5,800-14,000 mg CaCO₃/L, estando dentro de los valores normales encontrados en la literatura (2,000-18,000 mg CaCO₃/L). Finalmente, en cuanto a los AGV la mayoría de datos estuvieron entre 91-240 mg//L estando dentro de los valores normales reportados para este parámetro (50-250 mg/L), sin embargo, para el día 12 y 21 de diciembre se reportaron valores de 290.8 mg/L y 305.2 mg/L respectivamente, los cuales demuestran una acumulación de AGV y verificando con los datos de alcalinidad para estos días, hubo una baja de concentración de la misma haciendo así que se perdiera la capacidad amortiguadora del sistema y por tanto aumentarían los AGV.

Para finalizar, se presentan los resultados obtenidos para el TRH de 2.5 días:

Tabla 14*Resultados AGV, pH y Alcalinidad en TRH de 2.5 días*

Parámetro	pH	Alcalinidad			pH	AGV (mg/L)	Alcalinidad			pH	AGV (mg/L)	Alcalinidad		
		Fenolftaleína	Total (mg/L CaCO3)				Fenolftaleína	Total (mg/L CaCO3)				Fenolftaleína	Total (mg/L CaCO3)	
		25-ene					27-ene					30-ene		
Afluente	6.7	-	0	340	6.73	-	0	306	6.64	-	0	312		
Efluente 1	6.53	656.0	0	4800	7.07	821.0	0	4800	6.84	927.3	0	4560		
Efluente 2	8.09	240.6	0	5680	7.96	353.9	0	5520	8	311.4	0	5840		
		1-feb					3-feb					6-feb		
Afluente	6.58	-	0	250	6.57	-	0	334	6.62	-	0	358		
Efluente 1	6.41	651.3	0	5200	6.76	389.3	0	4800	6.69	339.9	0	5360		
Efluente 2	8	332.8	0	5600	8.03	191.1	0	6960	8	88.4	0	6400		
		8-feb					10-feb					13-feb		
Afluente	6.73	-	0	424	6.71	-	0	350	6.55	-	0	338		
Efluente 1	6.58	91.9	0	4800	6.79	141.7	0	5600	6.58	283.0	0	5040		
Efluente 2	8	123.8	0	6080	8.02	63.8	0	7120	7.97	113.3	0	6640		
		15-feb					17-feb					20-feb		
Afluente	6.47	-	0	304	6.75	-	0	360	6.43	-	0	262		
Efluente 1	6.76	470.7	0	5440	6.55	665.3	0	4960	6.82	705.8	0	5760		
Efluente 2	8.06	173.2	0	7200	8.03	262.0	0	6240	8.09	184.1	0	6560		

Fuente: Autora

En la Tabla 14 se encuentran los datos de pH, AGV y alcalinidad en el TRH de 2.5 días los cuales se evaluaron únicamente en el efluente final del reactor. Como se puede observar, el pH se mantuvo en un rango de 7.96-8.09 indicando un efluente alcalino y con resultados que se encuentran dentro de lo normal para dicho parámetro (pH 6.0 – 8.3).

Los valores de alcalinidad estuvieron en un rango de 5,500-7,200 mg CaCO₃/L, estando dentro de los valores normales encontrados en la literatura (2,000-18,000 mg CaCO₃/L). Finalmente, en cuanto a los AGV la mayoría de datos estuvieron entre 88-240.6 mg/L encontrándose dentro de los valores normales establecidos para este parámetro (50-250 mg/L), sin embargo, para los días 27-30 de Enero se reportaron valores de 353,9 mg/L y 311,4 mg/L respectivamente, y el día 1 de Febrero se reportó un valor de 332,8 mg/L los cuales demuestran una acumulación de AGV y concordando con los datos de alcalinidad para estos días, hubo una baja de concentración de la misma haciendo así que se perdiera la capacidad amortiguadora del sistema y por con ello, aumentarían los AGV.

En general se puede concluir que el reactor tuvo un buen funcionamiento, en ninguno de los casos analizados anteriormente hubo bajas significativas en el pH, por ende, no hubo acidificación en el sistema (es decir, no se tuvieron acumulaciones importantes de AGV), lo que llevo a que los procesos de DA se pudieran realizar de una forma adecuada y con ello se obtuvieran buenas eficiencias de remoción y producción de gas durante el tiempo de ensayo.

Conclusiones

Con la ejecución de los ensayos de biodegradabilidad anaerobia se pudo determinar la fracción biodegradable del residuo lácteo sintético, arrojando un resultado de 89%, demostrando así que dicho residuo puede ser tratado mediante digestión anaerobia con el fin de reducir sus contaminantes y como un adicional a esto, se obtuvo que una alta fracción de la DQO inicial fue convertida en metano (60.03%).

Con el funcionamiento del reactor UAPB para el tratamiento de los residuos lácteos se consiguió una considerable producción de biogás (0.1491m^3) a partir del tratamiento de 200 litro de residuo lácteo, la cual ayudó a verificar que los procesos de la digestión anaerobia se estaban efectuando de forma correcta dentro del mismo, sin embargo, debido a que el ensayo es a escala muy pequeña no se puede realizar una conclusión mayor sobre la cantidad de gas obtenida en el proceso, y adicional a esto, el volumen de gas generado no es suficiente para darle algún tipo de aprovechamiento. Por otro lado, al hacer una estimación de la producción de gas con los residuos lácteos generados en Boyacá al día se esperaría tener un volumen de gas de $42,279\text{ m}^3$, por lo cual sería viable para aprovechamiento.

Al realizar los ensayos de actividad metanogénica utilizando el lodo granular de la empresa INDEGA de Cali, se pudo establecer que dicho lodo tiene una alta capacidad para producir metano y se encuentra en un valor de $0.504\text{ g DQO CH}_4/\text{g SSV}^*\text{d}$.

Se pudo determinar que la mayor eficiencia de remoción de contaminantes se generó a la temperatura de 35°C , con un porcentaje de remoción de grasas y aceites de 96.96% y 97.71%, dado que a esta temperatura se facilita la actividad microbiana lo que hace que exista una mayor eficiencia de degradación de MO. Mientras que a temperatura ambiente las bacterias disminuyeron su actividad lo que afectó la eficacia de remoción de los contaminantes y por ello, se obtuvieron porcentajes de remoción menores para DQO y grasas y aceites (80.03% y 88.04% respectivamente).

La segunda eficiencia de remoción más alta se obtuvo con el TRH 4.4 días a temperatura ambiente, teniendo resultados para DQO y grasas y aceites de 83.14% y 88.21% respectivamente, ya que el residuo lácteo permanece más tiempo dentro del reactor lo que permite que las bacterias estén en mayor contacto con el sustrato y lo puedan degradar de forma más eficiente, mientras que en el TRH de 2.5 días las eficiencias fueron de 76.76% para DQO

y 87.80% para grasas y aceites. Pero en términos generales se puede observar que se tuvieron altos porcentajes de remoción lo que permite concluir que al combinar la temperatura y el TRH adecuado se puede obtener una alta eficiencia para el tratamiento de los residuos lácteos.

En cuanto a la resolución 631 de 2015, se pudo establecer que los resultados a la temperatura de 35°C son los únicos que cumplen a cabalidad con los límites máximos permisibles establecidos para DQO y grasas y aceites. Lo que permite concluir que el sistema de tratamiento utilizado en esta investigación (reactor UAPB) no es suficiente para lograr la remoción de todos los contaminantes existentes en el agua residual láctea y se propone solo como un pretratamiento.

Finalmente, con los resultados de AGV, pH y alcalinidad se puede concluir que el reactor anaerobio opero de forma idónea, no tuvo importantes acumulaciones de AGV, por ende, no se tuvieron inhibidores de los procesos y, por tanto, se pudo tratar el residuo lácteo de forma satisfactoria mediante la utilización de un reactor anaerobio tipo UAPB.

Referencias

- Acosta, D. (2022). *Análisis al Clúster de derivados lácteos en el departamento de Boyacá – CLACBOY- y sus oportunidades en los mercados internacionales*. (Tesis de pregrado, Universidad Santo Tomás). Repositorio USTA. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/46185/2022danielacosta.pdf?sequence=1>
- Adekunle, F., y Okolie, J. (2015). A Review of biochemical process of anaerobic digestion. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 6, 205-212.
- Ancalle, C., y Ledesma, W. (2020). *Caracterización de las aguas residuales en el afluente y efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales del distrito de Yauli – Huancavelica* (Tesis, Universidad Nacional de Huancavelica). Repositorio UNH. <https://repositorio.unh.edu.pe/items/f6029b85-d92b-4a6a-bcbc-eea124aea4c9>
- Bedoya, O., y Sanches e Sousa, L. (2009). Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea en sistemas anaerobios tipo UASB. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, (2), 8. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612009000200004
- Cámara Moguel, K., y Laines, J. (2011). La digestión anaerobia y la bioquímica. *Kuxulkab'*, (XVII), 90-92. <https://revistas.ujat.mx/index.php/kuxulkab/article/view/380>
- Cazier, E., Trably, E., Steyer, J., y Escudie, R. (2015). Biomass hydrolysis inhibition at high hydrogen partial pressure in solid-state anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 190, 106-113.
- Chávez, C., y Díaz, MC. (2003). Ensayos de biodegradabilidad anaerobia de efluentes cerveceros con lodo granular y lodo floculante. *Revista de Ingeniería e Investigación*, (52). <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/28643>
- Chernicharo, C. (2007). *Anaerobic reactors*. London: IWA Publishing <https://www.iwapublishing.com/sites/default/files/ebooks/9781780402116.pdf>
- Chiva, S., Berlaga, J., Martinez, R., y Climent, A. (2018). *Depuración de aguas residuales: digestión anaerobia*. Castelló de la Plana. Universitat Jaume I.

- https://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/173363/Chiva_2018_Depuracion.pdf
- Dirección de Sustentabilidad, Medio Ambiente y Cambio Climático. (s.f.). *Manual de biogás*. https://www.gba.gob.ar/sites/default/files/agroindustria/docs/Manual_de_Biogas01.pdf
- Fernández, M., Ábalos, A., Crombet, S., y Caballero, H. (2010). Ensayos de biodegradabilidad anaerobia de aguas residuales generadas en una planta refinadora de aceite de soja. *Interciencia*, 35(8), 600-604.
- Fundamentos de lodos activados y aereación extendida. (s.f.). <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018834/MEMORIAS2004/CapituloII/1Fundamentosdelprocesodelodosactivados.pdf>
- García, M., y Pérez, J. (s.f.). Aguas residuales. Composición. https://cidta.usal.es/cursos/edar/modulos/edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf
- Gonzales, J., Valdés, P., Nieves, G., y Guerrero, B. (1994). Aplicación de la digestión anaerobia a los residuales de industrias lácteas. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 10(1), 37-41. <https://www.redalyc.org/pdf/370/37010104.pdf>
- Herrera, E. (2020). *Definición de las condiciones de operación que maximizan la producción de Ácidos Grasos Volátiles (AGV's), a partir del proceso de digestión anaeróbica, empleando aguas residuales mediante pruebas a escala de laboratorio*. (Trabajo de grado, Universidad Cooperativa de Colombia). Repositorio Universidad Cooperativa de Colombia. <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/a9604fc0-528c-4087-99f4-f38073f720cd/content>
- Hussain, A., y Dubey SK. (2014). Prueba de actividad metanogénica específica para el tratamiento anaeróbico de aguas residuales fenólicas. *Desalinización y Tratamiento de Agua*, 52, 37-39. Doi: 10.1080 / 19443994.2013.823116
- Hussain, A., y Dubey SK. (2015). Specific methanogenic activity test for anaerobic degradation of influents. *Appl Water Sci*, 7, 535–542. <https://doi.org/10.1007/s13201-015-0305-z>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2007, 28 de diciembre). *Demanda química de oxígeno por reflujo cerrado y volumetría*. <https://acortar.link/MEqFKJ>

- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2007). *Biomasa: digestores anaerobios*. Madrid: IDAE. <https://acortar.link/KSn5K1>
- Jiménez González, S. d. M. (2006). *Dimensionamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales en la ciudad de Golfito*. San José, C.R.
- Lorenzo Acosta, Y., y Obaya Abreu, M. C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, XXXIX (1), 35-48.
- Md Huzir, N., Mahmood, N., Muhammad, S., Umor, N., y Ismail, S. (2019). Effect of specific methanogenic activity (SMA) of anaerobic. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology Sludge under High Salinity*, 16(1), 35-49. https://www.akademiabaru.com/doc/ARASETV16_N1_P35_40.pdf
- Mendes, A., Pereira, E., Furigo Jr, A., y Castro, H. (2010). Anaerobic biodegradability of dairy wastewater pretreated with porcine pancreas lipase. *Archivos Brasileños de Biología y Tecnología*, 53(6), 1279-1284. <https://www.scielo.br/j/babt/a/KytD4y5vPxFRjcFLSrXkvWw/?format=pdf&lang=en>
- Merino, V. (2017). *Análisis de la grava como filtro en el tratamiento de aguas residuales provenientes de la procesadora de lácteos “La Clementina” de la provincia de Cotopaxi, cantón Latacunga*. (Trabajo de grado, Universidad Técnica de Ambato). Repositorio UTA. <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/27235/1/Tesis%201218%20-%20Merino%20Mora%20Ver%C3%B3nica%20Jackeline.pdf>
- Ministerio de Energía de Chile. (2011). *Manual de biogás*. <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- Morales, P. (2005). *Digestión anaerobia de lodos de plantas de tratamiento de aguas y su aprovechamiento*. (Tesis profesional, Universidad de la Américas Puebla). Tesis digitales. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leia/morales_r_pm/capitulo_5.html#
- Muralikrishnan, R. (2017). Treatment of dairy wastewater using up flow anaerobic filter. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 2(7), 2456 – 2165. <https://ijisrt.com/wp-content/uploads/2017/08/Treatment-of-Dairy-Wastewater-Using-Up-flow-Anaerobic-Filter-1.pdf>

- Ordoñez, L. (2022). *Digestión anaerobia a bajas temperaturas*. (Tesis de maestría, Universidad Tecnológica de Pereira). <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/4c3ebf01-11eb-40ee-b130-f027ffc15342/content>
- Osorio, H., y Vargas, R. (2005). Diseño del sistema de control automático de pH en la planta de tratamiento de agua residuales de la empresa Termocartagena S.A. E.S.P. (Trabajo de grado, Universidad Tecnológica de Bolívar). Repositorio UTB. <https://repositorio.utb.edu.co/bitstream/handle/20.500.12585/902/0032777.pdf?sequence=1>
- Parra, A. (2010). Digestión anaerobia de lactosuero: efecto de altas cargas puntuales. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 63(1), 1. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0304-28472010000100014
- Reymond, A., y Ferrer, O. (2007). La gestión medioambiental en la industria láctea. *Tecnología Química*, 27(2), 48-54.
- SoCalGas. (s.f.). *Emisiones de Metano*. <https://www.socalgas.com/es/stay-safe/methane-emissions>
- Torres, N. (2008). *Digestión anaerobia en comunidades rurales*. (Trabajo de grado, Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politécnica Superior). https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/11627/PFC_Nadia_deLaTorre_Caritas.pdf
- Universidad Agrícola de Wageningen. (1987). *Arranque y operación de sistemas de flujo ascendente con manto de lodo – UASB*. <https://es.ircwash.org/sites/default/files/341.5-87AR-6473.pdf>
- Universidad Nacional de Colombia. (2002). *Caracterización de lodos anaerobios y aguas residuales*. <https://es.scribd.com/document/446603441/Digestion-anaerobia-Parte-2-pdf>
- Vivanco, E., Yaya, R., y Chamy, R. (s.f.). *Manual técnico sobre tecnologías biológicas anaerobias aplicadas al tratamiento de aguas y residuos industriales*. https://www.cytcd.org/sites/default/files/tratamiento_anaerobio_de_aguas_residuales.pdf