



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**“CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE
BIODIGESTIÓN ANAEROBIA, PARA RESIDUOS
ALIMENTICIOS Y ESTIÉRCOL DE CERDO”**

**TESIS
PARA OBTENER EL GRADO DE**

INGENIERO AMBIENTAL

**PRESENTA
JUAN BAUTISTA MOO TADEO**

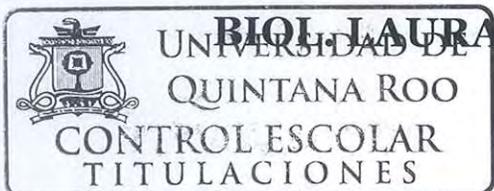
**DIRECTOR DE TESIS
DR. JOSÉ ALFONZO CANCHE UUH**

**ASESORES
DRA. NORMA ANGÉLICA OROPEZA GARCÍA**

M.C. JUAN CARLOS AVILA REVELES

M.I. JOSÉ LUIS GUEVARA FRANCO

BIOL. LAURA PATRICIA FLORES CASTILLO



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, ABRIL DE 2018



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TRABAJO DE TESIS TITULADO

“CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE BIODIGESTIÓN ANAEROBIA, PARA RESIDUOS ALIMENTICIOS Y ESTIÉRCOL DE CERDO.”

ELABORADO POR
JUAN BAUTISTA MOO TADEO

BAJO SUPERVISIÓN DEL COMITÉ DE ASESORÍA Y APROBADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

INGENIERO AMBIENTAL

COMITÉ DE TESIS

DIRECTOR:

DR. JOSÉ ALFONZO CANCHE UUH

ASESORA:

DRA. NORMA ANGÉLICA OROPEZA GARCÍA

ASESOR:

M.C. JUAN CARLOS AVILA REVELES

ASESOR:

M.I. JOSÉ LUIS GUEVARA FRANCO



B.I. LAURA PATRICIA FLORES CASTILLO



Agradecimientos

Al Dr. José Alfonzo Canche Uuh

Mi tutor, por su gran ayuda y soporte en este trabajo de investigación, que siempre se mostró atento a mis dudas y comprometido con la finalización de este trabajo. Así como la confianza que me otorgaba al momento de tomar decisiones y de ser libre de experimentar lo que es la investigación.

A la Dr. Norma Angélica Oropeza García

Por su tiempo, dedicación y tan acertados consejos para dirigir correctamente mis ideas y llevarlas a cabo.

Al M.C Juan Carlos Avila Reveles

Que siempre mostro interés y conocimiento en el tema, que con sus aportaciones el trabajo se hacía más fácil he interesante.

Al M.I. José Luis Guevara Franco

Por sus tan acertadas observaciones y dedicación que le brindo a que este trabajo concluyera.

A la Bióloga Laura Patricia Flores Castillo

Cuyo conocimiento y experiencia aclaro dudas y me hizo pensar en los pros y contras con los que me podría topar.

A Jaime y Rosymar

Encargados del Laboratorio de Química, por su disponibilidad y ayuda en el laboratorio.

A mis profesores, que me formaron académicamente, me inculcaron el deseo de aprender y que a la vez me enseñaron.

A mi madre, Petra Tadeo Poot.

Por haberme apoyado siempre, con sus consejos, su preocupación e interés en mis avances, que me enseñó junto a mi padre, a ser una persona de bien.

A mi padre Santos Mario Salomón Moo Pat.

Por toda la confianza que depósito en mí, por sus enseñanzas, consejos y que se involucró siempre a lo largo de mi investigación, que siempre me dijo que la herencia más grande que podía darme es mi educación.

A ambos por su cariño, sacrificios y que su vida la han dedicado siempre al bienestar y educación de sus hijos.

A mis hermanos, Oscar e Irvin.

Que se esfuercen cada día y por el apoyo que me han brindado siempre, por esos momentos que han creado anécdotas que al ser contadas hacen recordar lo difícil que fue, no solo para mí sino también para ellos este proceso.

A mi familia por siempre mostrarme su apoyo.

A mis amigos, por el apoyo que tuvimos a lo largo de nuestra formación profesional como personal.

En especial a mis “Roomies” **Ángel, Luis, y Alejandro**, por ser mis más grandes amigos, que durante la carrera compartimos estrés, desvelos y la risa que nunca faltó. Que durante la tesis sus consejos, paciencia y apoyo siempre estuvieron ahí.

Y por esas buenas charlas que siempre apreciaré.

Dedicatoria

A mis padres y hermanos.

Porque este no solo fue mi esfuerzo, si no de familia.

En especial a mi gordos, Areli, Carlos y Nubia.

Ustedes que inician su educación, este es el fruto de la educación que nuestros padres, con esfuerzo y dedicación nos otorgan y que deben de valorar.

**“La educación y conocimiento,
son la herencia más grande que nuestros padres
nos pueden heredar”**

Abreviaturas

AGV: Ácidos grasos volátiles.

CDA: Codigestión anaerobia.

DA: Digestión anaerobia.

DQO Final: Demanda Química de Oxígeno final

DQO Inicial: Demanda Química de Oxígeno

DQO Removida: Demanda Química de Oxígeno final

E: Estiércol

RA: Residuos Alimenticios

RI: Residuos inorgánicos

RO: Residuos orgánicos

SF: Sólidos fijos

ST Finales: Sólidos totales finales

ST Removida: Sólidos totales consumidos

ST: Sólidos totales

SV Finales: Sólidos volátiles finales

SV Removida: Sólidos volátiles consumidos

SV: Sólidos volátiles

TRH: Tiempo de retención hidráulico

1. CAPÍTULO I	16
1.1 INTRODUCCIÓN	17
JUSTIFICACIÓN	19
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
OBJETIVOS	22
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	22
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
2 CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	23
2.1 BIOMASA	24
2.2 CONTAMINACIÓN AMBIENTAL ASOCIADA A LOS RESIDUOS ORGÁNICOS	25
2.2.1 RESIDUOS ALIMENTICIOS	25
2.2.2 ESTIÉRCOL	26
2.3 DIGESTIÓN ANAEROBIA (DA)	27
2.3.1 BENEFICIOS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA	29
2.3.1.1 Ambientales	30
2.3.1.2 Economía	31
2.3.2 LIMITACIONES	31
2.3.3 BIOGÁS	32
2.3.3.1 Producción de biogás	33
2.3.4 DIGESTATO	35
2.4 BIOQUÍMICA Y MICROBIOLOGÍA	36
2.4.1 FASES DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA	36
2.4.2 HIDROLISIS	38
2.4.3 ACIDOGÉNESIS	41
2.4.4 ACETOGÉNESIS	42
2.4.5 METANOGÉNESIS	43
2.4.6 MICROORGANISMOS INVOLUCRADOS EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA	44
2.4.6.1 Metanogénesis Acetoclástica	46
2.4.6.2 Metanogénesis Hidrogenoclástica	46

2.5	SUSTRATOS	46
2.5.1	ESTIÉRCOL DE CERDO	49
2.5.2	RESIDUOS ALIMENTICIOS	49
2.5.2.1	Materiales lignocelulósicos	50
2.5.3	CODIGESTIÓN ANAEROBIA	51
2.6	PROPIEDADES QUE DEFINEN A LA BIOMASA.	53
2.6.1	TAMAÑO DE PARTÍCULAS	53
2.6.2	SÓLIDOS TOTALES (ST), VOLÁTILES (SV) Y FIJOS (SF)	53
2.6.3	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)	55
2.6.4	RELACIÓN SÓLIDOS VOLÁTILES Y DQO	57
2.6.5	POTENCIAL DE GENERACIÓN DE BIOGÁS	57
2.6.6	ANÁLISIS FOS/TAC	57
2.7	PARÁMETROS DEL CONTROL EN EL PROCESO DE DIGESTIÓN	59
2.7.1	PH	60
2.7.2	PH Y FOS/TAC	62
2.7.3	TEMPERATURA	62
2.7.4	TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO (TRH)	67
2.7.5	AGITACIÓN	68
2.7.6	NUTRIENTES	68
2.7.7	PROMOTORES E INHIBIDORES	71
2.8	DIGESTORES ANAEROBIOS	72
2.8.1	REACTORES SIN RETENCIÓN DE BIOMASA	74
2.8.1.1	Reactor de mezcla completa (RMC) sin recirculación.	74
2.8.1.2	Reactor de mezcla completa (RMC) con recirculación	75
2.8.1.3	Digestor de flujo pistón	76
2.8.2	REACTORES CON RETENCIÓN DE BIOMASA	77
2.8.2.1	Lecho fijo	77
2.8.2.2	Reactor de filtro anaerobio	78
2.8.2.3	Filtro anaerobio de flujo ascendente	78
2.8.2.4	Filtro anaerobio de flujo descendente	80
2.8.2.5	Filtro anaerobio alimentación múltiple.	82
2.8.2.6	Reactor de lecho de lodo granular (UASB)	83

2.8.2.7	Reactor de lecho fluidizado (RLF).	84
2.8.2.8	Modelos tipo bach por lotes	85
2.8.2.9	Sistema mono etapa	85
2.8.2.10	Sistema multietapa.	86
2.8.3	DIGESTORES DEL MEDIO RURAL	86
2.8.3.1	Digestor discontinuo	88
2.8.3.2	Semi continuos	88
2.8.3.3	Discontinuos o régimen estacionario	89
2.8.4	COMPONENTES DE UN BIODIGESTOR DOMÉSTICO O RURAL	91
2.8.4.1	Reactor	91
2.8.4.2	Trampa de vapor	91
2.8.4.3	Almacenamiento de biogás	91
2.8.4.4	Trampa de ácido sulfhídrico	92
2.8.4.5	Trampa de llama	92
3	CAPITULO III METODOLOGÍA	93
3.1	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN	95
3.1.1	REACTOR	96
3.1.2	TRAMPA DE VAPOR	97
3.1.3	ALMACENAMIENTO DE BIOGÁS (GASÓMETRO)	98
3.1.4	MANÓMETRO	98
3.1.5	TRAMPA DE ÁCIDO SULFHÍDRICO	99
3.1.6	TRAMPA DE LLAMA	100
3.2	RECOLECCIÓN DE RESIDUOS	100
3.2.1	RESIDUOS ALIMENTICIOS	100
3.2.2	ESTIÉRCOL	101
3.2.3	ACONDICIONAMIENTO DE RESIDUOS	101
3.3	EXPERIMENTACIÓN	101
3.3.1	REALIZACIÓN DE MEZCLAS	103
3.3.2	ANÁLISIS	103
3.3.3	CONFIGURACIÓN DE MATRACES KITASATO	104

3.3.4	MONITOREO DE LA DIGESTIÓN	105
3.4	DIGESTIÓN EN EL BIODIGESTOR.	105
3.5	PARÁMETROS ANALÍTICOS DE CONTROL	106
3.5.1	TEMPERATURA	106
3.5.2	PH	106
3.5.3	SÓLIDOS TOTALES (ST), VOLÁTILES (SV)	106
3.5.4	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)	107
3.5.5	RELACIÓN PARÁMETROS	107
3.5.6	ANÁLISIS FOS/TAC	109
3.5.7	PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	110
4	CAPITULO IV ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	111
4.1	BIODIGESTOR	112
4.1.1	SÓLIDOS	114
4.1.2	DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO	115
4.1.3	RELACIÓN FOS/TAC	117
4.2	EXPERIMENTACIÓN	118
4.2.1	SÓLIDOS	118
4.2.2	DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO	122
4.2.3	PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	123
4.2.4	RELACIÓN DE PARÁMETROS	133
5	CAPÍTULO V CONCLUSIONES	134
6	RECOMENDACIONES	136
7	BIBLIOGRAFÍA	137
8	REFERENCIAS Y ANEXOS	141
8.1	FIGURAS	141

Índice de figuras

Figura 1. Proceso de digestión anaerobia, (Alcántar González, 2014).....	28
Figura 2. Equivalencias del biogás con respecto a otras fuentes de energía.....	33
Figura 3. Etapas de la digestión anaerobia	37
Figura 4. Diagrama del efecto de la temperatura y el tiempo de retención hidráulico con respecto a la producción de biogás.	64
Figura 5. Curva de crecimiento bacteriano.....	67
Figura 6. Reactor de mezcla completa (RMC) sin recirculación.....	74
Figura 7. Reactor de mezcla completa (RMC) con recirculación.....	75
Figura 8. Digestor de flujo pistón.....	76
Figura 9. Reactor de lecho fijo.	77
Figura 10. Filtro anaerobio de flujo ascendente	79
Figura 11. Filtro anaerobio de flujo descendente	81
Figura 12. Filtro anaerobio alimentación múltiple.	82
Figura 13. Reactor de lecho de lodo granular (UASB)	83
Figura 14. Reactor de lecho fluidizado (RLF).....	84
Figura 15. Metodología de trabajo.....	94
Figura 16. Diseño en 3D del biodigestor.	95
Figura 17. Reactor del biodigestor y sus componentes.	96
Figura 18. Composición de la trampa de vapor.	97
Figura 19. Almacenamiento de biogás y manómetro.	98
Figura 20. Filtro de ácido sulfhídrico	99
Figura 21. Detalle del diseño de la trampa de llama.....	100
Figura 22. Metodología de la experimentación	102
Figura 23. Proporciones de mezcla de E: RA en porcentaje.	103
Figura 24. Matracas con las mezclas a ser evaluadas por triplicado.	104
Figura 25. Configuración de los matraces kitasato para la recolección del biogás.	104
Figura 26. Monitoreo de la producción de biogás diario.....	105
Figura 27. Biodigestor construido.	113
Figura 28. Generación de biogás de las mezclas.	124
Figura 29. Generación de biogás de la mezcla 1 (M1; 100%E: 0%RA).	125

Figura 30. Generación de biogás de la mezcla 2 (M2; 80%E: 20%RA).	126
Figura 31. Generación de biogás de la mezcla 3 (M3; 60%E: 40%RA).	127
Figura 32. Generación de biogás de la mezcla 4 (M4; 40%E: 60%RA).	128
Figura 33. Generación de biogás de la mezcla 5 (M5; 20%E: 80%RA).	129
Figura 34. Generación de biogás de la mezcla 6 (M6; 0%E: 100%RA).	130
Figura 35. Comparación de la producción diaria de las distintas mezclas.	132
Figura 36. Curva de calibración para el cálculo de la DQO.	141
Figura 37. Metodología para el análisis de los sólidos.	1
Figura 39. Metodología de análisis de la relación FOS/TAC.....	1
Figura 38. Metodología análisis DQO.....	1

Índice de tablas

Tabla 1. 2 principales grupos de biomasa y su subclasificación	24
Tabla 2. Grupos de enzimas hidrolíticas y sus funciones adaptado de (Schnürer & Jarvis, 2009)	41
Tabla 3. Comparación entre los microorganismos de la etapa ácida generadora de productos intermedios y la metanogénica.	45
Tabla 4. Características de algunas materias primas y su rendimiento promedio de metano obtenido a través de su digestión anaeróbica.....	47
Tabla 5. Constantes de ácido de los principales ácidos generados en la DA.	59
Tabla 6. Relación entre la temperatura y la solubilidad en agua de algunos gases ..	66
Tabla 7. Valores promedios aproximados de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos disponibles en el medio rural.	70
Tabla 8. Clasificación del proceso acorde a las características de trabajo.	72
Tabla 9. Interpretación de las relaciones FOS/TAC	110
Tabla 10. Caracterización de sólidos de los residuos y mezclas al inicio de la digestión	114
Tabla 11. Porcentajes de sólidos en las muestras al inicio de la biodigestión.....	115
Tabla 12. Monitoreo semanal de la evolución de los sólidos	115
Tabla 13. Evolución de la DQO	116
Tabla 14. Monitoreo del análisis FOS/TAC	117
Tabla 15. Valores de los sólidos en residuos y mezclas	118
Tabla 16. Clasificación de las digestiones de acuerdo a los sólidos.....	119
Tabla 17. Análisis de la DQO de las mezclas.....	119
Tabla 18. Porcentaje de remoción de sólidos totales	120
Tabla 19. Porcentaje de remoción de sólidos volátiles.....	120
Tabla 20. Sólidos totales consumidos.....	121
Tabla 21. Sólidos volátiles removidos.....	121
Tabla 22. Remoción de la DQO.	122
Tabla 23. Producción diaria de biogás en mL	123
Tabla 24. Producción acumulada de biogás	124
Tabla 25. Rendimiento de biogás por mg SV	133

Tabla 26. Relación DQO/SV 133

1. Capítulo I

1.1 Introducción

La digestión anaerobia tiene la capacidad de estabilizar la materia orgánica, logrando la reducción de volumen, el control de olores, la recuperación de biogás y la obtención de digestato con valor útil en agricultura, debido a los nutrientes que contiene.

En general tiene 2 propósitos que son:

- a) Maximizar la producción de biogás o
- b) Tratar grandes cantidades de materia orgánica.

Mediante la generación de biogás se reduce la compra de combustibles, donde los mayores avances en esta tecnología están enfocados principalmente al tratamiento de aguas residuales, a la digestión de excretas de animales y en menor medida a la digestión de residuos alimenticios, que cuentan con un alto potencial de generación de biogás y con una alta producción de estos residuos.

Posiblemente uno de los factores que influyen a esa situación es la complejidad de realizar su digestión, misma que puede ser mejorada mediante la codigestión anaerobia. La mezcla de dos o más residuos que separados presentan complejidades pero juntos se complementan.

El objetivo de esta tesis fue evaluar la digestión anaerobia del estiércol de cerdo frente a la codigestión anaerobia (la mezcla de dos o más residuos para ser digeridos) en una mezcla de estiércol de cerdo y residuos de frutas-verduras donde la producción de biogás sea máxima para su codigestión en un biodigestor convencional y con experimentación. Aprovechando la sinergia inherente que tienen dichos residuos para la producción de biogás.

Se evalúa la producción de biogás mediante la codigestión de estiércol de cerdo y residuos de frutas y verduras, caracterizando los sustratos en sólidos totales y cuantificando la cantidad de materia orgánica como DQO.

La evaluación de la efectividad se realiza mediante la cantidad de biogás producida por día y el volumen acumulado, así como la remoción en porcentaje de sólidos volátiles y DQO que se encuentran directamente relacionadas a la producción de biogás.

Esta codigestión es realizada de manera convencional con 400 ml de muestra en matraces kitasato de 500 mL, con 5 mezclas: 100% estiércol, 80% estiércol: 20%FV, 60% estiércol: 40%FV, 40% estiércol: 60%FV, 20% estiércol: 80%FV. Encontrando que la mezcla 5 tiene un mayor porcentaje de producción de biogás y mayor remoción de sólidos y DQO.

Justificación

La recuperación de los biorresiduos permite el aprovechamiento del potencial inherente que tienen para generar biogás y digestato en un biodigestor anaerobio.

Existe la teoría necesaria para realizar el diseño, construcción de un biodigestor anaerobio para la codigestión de residuos alimenticios y estiércol de cerdo al igual que se conoce el proceso necesario para realizar la codigestión, además que existen prototipos y equipo que se encuentra en funcionamiento tanto experimentales como comerciales.

La tecnología y los conocimientos necesarios para llevar a cabo la digestión anaerobia se encuentra ampliamente estudiada y aplicada fuera de México, en su mayoría en Europa y Asia, donde existen las mayores empresas que comercializan con esta tecnología. En México los estudios más desarrollados en esta tecnología han sido desarrollados en la UNAM y solo a nivel laboratorio sin la realización de prototipos.

Respecto al diseño, fabricación y aplicación de biodigestores anaerobios, estos se encuentran ampliamente enfocados en el tratamiento de aguas residuales, a la digestión de excretas de animales de ganadería y en menor medida a la digestión de los residuos alimenticios aun sabiendo que los principios de la biodigestión tanto en aguas residuales como en residuos alimenticios son muy similares.

Pese a las similitudes que existen, en el caso de la digestión de residuos alimenticios es poca la importancia que se le ha dado en México, teniendo poca tecnología y bibliografía relativamente amplia referente a diseños de prototipos y sin aplicación de tecnología de digestión anaerobia para el tratamiento de residuos alimenticios en comparación a la Unión Europea o Asia.

Esto es posiblemente debido a que existen métodos más simples para su degradación, obteniendo buenos resultados como el vermicomposteo y el composteo por mencionar algunos.

La tecnología más avanzada y actual se centra en la digestión a gran escala, principalmente en Europa, y parte de Asia como se había mencionado, con digestores de capacidades que van desde 10,000 t/año, hasta 150,000 t/año mencionados por ROS ROCA. (2008).

En la actualidad en lo que respecta a la digestión anaerobia “la investigación enfocada al mejor entendimiento del proceso anaerobio, así como de la bioquímica y microbiología en que está sustentada, así como estrategias de optimización del proceso han tomado gran importancia” (Martínez, 2013).

1.2 Planteamiento del problema

Los residuos sólidos urbanos (**RSU**, coloquialmente conocidos como basura), representan un grave problema para la sociedad y el ambiente, debido a los manejos inadecuados que se le han proporcionado y a la alta tasa de consumo de la sociedad actual.

Compuesta por residuos orgánicos e inorgánicos, el Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (**PNPGIR**) (2009-2012) reportó la generación de 94,800 toneladas diarias de RSU, lo que significa 34.6 millones de toneladas anuales, cuya composición aproximada es: 53% de residuos orgánicos y 47% de inorgánicos; de estos últimos, 28% es potencialmente reciclable y 19% corresponde a residuos no aprovechables. Se estima que, para 2015, se generará 22% más de RSU, sin considerar el aumento poblacional (Ramírez Castillo & Cuatutle Tecanhuey, 2013).

Los residuos inorgánicos en los que se incluyen los residuos alimenticios compuestos por restos de comida, frutas y vegetales generados en distintos establecimientos, así como en hogares, son aprovechados en mayor cantidad y aun así no es suficiente.

El **PNPGIR** reporta una recuperación de residuos inorgánicos del 3.92%, dejando a los residuos inorgánicos fuera, siendo estos de mayor cantidad en generación.

Actualmente en México, diversos establecimientos como supermercados, restaurantes y mercados además de hogares disponen de sus residuos orgánicos al sistema de recolección de residuos municipal, donde rara vez se encuentran clasificados por lo que están mezclados con residuos inorgánicos. Aun así, cuando se encuentran clasificados estos depositados en un tiradero a cielo abierto, representado una fuente de emisión de contaminantes importante y otorgando vectores a la sociedad.

En el diseño de los rellenos sanitarios se necesita de tubos recuperadores de biogás (generado por los residuos orgánicos (RO)), además del control de lixiviados que son

producidos por la lluvia y por la degradación de los RO presentes, logrando en los lixiviados altas cargas orgánicas.

La fuente principal de ingresos en Quintana Roo es un referente a nivel mundial en turismo con mayor impacto en la zona sur, la denominada Riviera maya, isla mujeres y Cozumel. Siendo la principal fuente de ingresos en el estado con el impacto turístico viene el consumismo y las grandes generaciones de residuos.

La restauración sustentable tiene tres principales enemigos en la Riviera Maya (Alvelais, 2017) :

- 1) una cultura culinaria en desarrollo,
- 2) el precio alto de los alimentos,
- 3) el clima y la dificultad de la tierra para la agricultura.

La cantidad de turistas que visitan Q. Roo va ligado a grandes cantidades de residuos generados, en el caso de los residuos orgánicos, como restos de bufets, frutas y verduras, o restos de alimentos existe un consumo excesivo, sumado al tamaño inmenso de los hoteles de la región y a su nivel de consumo, generan un desperdicio de alimentos desproporcionado.

Por increíble que parezca, no existe hoy en la Riviera Maya un sistema de manejo de residuos alimenticios adecuado. Los restaurantes sirven lo que los clientes esperan comer y lo que los dueños consideran mejor para los menús de sus negocios (Alvelais, 2017).

Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Construir un prototipo de biodigestor anaerobio, para obtener biogás y digestato.

1.2.2 Objetivos específicos

- Construir un biodigestor anaerobio.
- Estabilizar el biodigestor anaerobio.
- Medir los parámetros (Base húmeda y base seca, sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), SV/ST) del sustrato a digerir.
- Determinar la cantidad de biogás producido y digestato obtenido.
- Calcular el rendimiento del biodigestor en función del biogás y digestato producido.

2 Capítulo II Marco teórico

2.1 Biomasa

Según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC por sus siglas en inglés) la biomasa se define como:

“Material orgánico no fosilizado y biodegradable originario de plantas, animales y microorganismos”.

Esto se refiere a toda la materia orgánica consecuencia de un proceso biológico natural que proviene de animales, plantas, así como las fracciones orgánicas no fosilizadas y biodegradables.

Tabla 1. 2 principales grupos de biomasa y su subclasificación

Biomasa virgen o natural	Biomasa terrestre	Biomasa forestal
		Pastos
		Cultivos energéticos
		Cosechas cultivadas
	Biomasa acuática	Algas
		Plantas acuáticas
Biomasa de residuos	Desechos municipales	Desechos sólidos municipales
		Biosólidos, aguas residuales
		Gas de rellenos sanitarios (vertederos)
	Residuos agropecuarios	Ganadería y estiércoles
		Residuos de cultivos agrícolas
	Residuos forestales	Cortezas, hojas, residuos orgánicos del suelo
		Madera de demolición, aserrín
	Residuos industriales	Aceite usado/ grasa

Fuente 1. Adaptado de Arrieta Palacios, 2016.

2.2 Contaminación ambiental asociada a los residuos orgánicos

2.2.1 Residuos alimenticios

Según cifras reveladas por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (2014), un tercio de los alimentos producidos, equivalentes a aproximadamente 1.300 millones de toneladas por año, se pierden o se desperdician en todo el mundo.

La gestión inadecuada del desperdicio de alimentos crea problemas de salud humana y del medio ambiente. Por lo tanto, es necesario mitigar los problemas aplicando métodos de tratamiento adecuados para manejar el desperdicio de alimentos. En la actualidad, se utilizan comúnmente varios métodos de tratamiento de residuos de alimentos, incluidos el compostaje, la incineración, el vertido y la digestión anaeróbica (DA).

La DA es una tecnología tradicional utilizada en la estabilización de residuos orgánicos. Debido a la creciente preocupación por la crisis energética en las últimas décadas, la DA ha atraído más intereses ya que puede generar energía renovable al recuperar el biogás producido (Lo & Chiu, 2016).

Los desechos sólidos orgánicos generados en los mercados tienen contenidos de humedad alrededor del 86 %, así como un pH predominantemente ácido. Estas dos características sugieren que la digestión anaerobia es el proceso de fermentación más idóneo (Buenrostro, Cram, Bernache, & Bocco, 2000).

2.2.2 Estiércol

Las excretas de cerdo consisten en una mezcla de orines y excremento. La composición química de las excretas se ve influida por diversos factores, entre ellos la alimentación del animal, y la calidad del alimento. Los animales sólo retienen aproximadamente el 15 por ciento de los nutrientes contenidos en la materia convirtiéndolos en producto animal, el 85 por ciento restante se excreta (Medrano Róldan, 2006).

De lo anterior se entiende que las excretas de los animales contienen cantidades significativas de nutrientes, y que excreción corresponde a la proporción de nutrientes que el animal no retuvo en su organismo, por lo que su tratamiento no solo evita la contaminación, si no que conlleva a la recuperación y aprovechamiento de nutrientes que el animal no retuvo en su organismo.

Por lo general las excretas se aprovechan en las granjas esparciéndolas en los campos para fertilizar la tierra, esto conlleva a que se encuentren al aire libre, logrando la volatilización de sus componentes como el nitrógeno en forma de amoníaco y genera la presencia de olores molestos.

Son necesarios grandes extensiones de terreno para la deposición de los residuos con esto se puede determinar que la contaminación asociada a las excretas de cerdo es muy variable. Su degradación en espacios libres también genera metano, dióxido de carbono. Gases de efecto invernadero que contaminan el aire al microambiente (la granja en sí misma) y el ambiente en general.

Es un residuo de gran potencial económico, en el que su recuperación y disposición responsable evita la contaminación del ambiente y se aprovecha al máximo los nutrientes que contiene.

2.3 Digestión anaerobia (DA)

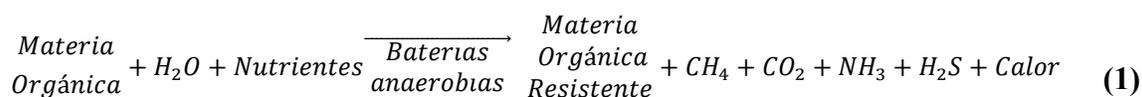
Es un proceso bioquímico complejo, principalmente porque involucra a microorganismos que degradan y transforman la materia orgánica, y que requieren de cierto ambiente para poderse desarrollar plenamente.

La digestión anaerobia ¹ es una fermentación microbiana en ausencia de oxígeno que da lugar a una mezcla de gases (principalmente metano y dióxido de carbono), conocida como "biogás" y a una suspensión acuosa o "lodo" que contiene los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica (Lorenzo Acosta & Obaya Abreu, 2005).

Esta existe de manera natural formando parte del ciclo biológico. Como algunos ejemplos se puede encontrar en el sistema digestivo de animales y humanos, así como en pantanos, aguas estancadas sedimentos marinos, ríos, lagos y yacimientos de gas natural.

Principalmente su uso y aplicación se ve motivado por cuestiones medioambientales más que por aprovechamiento energético, aunque se puede aplicar perfectamente a ambas cuestiones, buscando el máximo aprovechamiento energético con la producción de biogás o para el tratamiento de efluentes con altas cargas orgánicas. Independientemente del objetivo su uso y aplicación conlleva múltiples beneficios.

La tecnología de la digestión anaeróbica es un proceso ampliamente aplicado a nivel mundial, y por más de 100 años, para convertir residuos biomásicos en energía renovable. Se ha utilizado, principalmente en países europeos, como Alemania, Bélgica y Dinamarca, en Estados Unidos de América y países de Asia como China, India y Taiwán, para el tratamiento de sustratos orgánicos como aguas residuales y efluentes industriales, lodos municipales y en la digestión de residuos orgánicos tanto de hogares como de granjas (estiércoles animales, cultivos energéticos, residuos agrícolas y desechos de alimentos) (Como cita Alcántar González, 2014).



¹ También llamada biometización.

La **Ecuación (1)** muestra que la materia orgánica junto con el agua en una reacción biológica bajo condiciones anaeróbicas produce metano y dióxido de carbono. Adicionalmente a esta reacción se forman otros gases en bajas concentraciones como amoníaco y ácido sulfhídrico, a la vez que células nuevas y materia orgánica resistente que no es degradada en su totalidad y calor (Salamanca Tamayo, 2009).



Figura 1. Proceso de digestión anaerobia, (Alcántar González, 2014).

Lorenzo et al. (2005) hacen mención de los productos que se obtienen de la digestión anaerobia, siendo estos: biogás y una suspensión acuosa o "lodo". Martínez (2013) menciona los beneficios de los procesos anaerobios siendo los más importantes, la reducción del volumen, producción de biogás y la recuperación de un efluente ya sea lodo o una suspensión acuosa.

2.3.1 Beneficios de la digestión anaerobia

Por lo que respecta a las excretas. “Al usar un biodigestor se utilizan los nutrientes contenidos en ella y además, se reduce la contaminación ambiental, ya que convierte las excretas que contienen microorganismos patógenos como bacterias, protozoos, larvas, huevos, pupas de insectos, etc., en residuos útiles y sin riesgo de transmisión de enfermedades” (Soria Fregoso, y otros, 2001).

El aprovechamiento de la materia orgánica es optimizado al hacerse uso totalmente de ella, generando biogás con valor calorífico y el digestato para el aprovechamiento como fertilizante.

La materia orgánica necesaria para llevar a cabo la digestión anaerobia es muy variable, y dependiendo del origen de estas, son las condiciones requeridas y las características de los efluentes. Entre la materia orgánica más usada se encuentran los desechos animales, como las excretas, orinas, residuos alimenticios, residuos de la industria alimentaria, aguas residuales o incluso la fracción orgánica de residuos sólidos (FORSU).

Aunque tienen características similares, la digestión anaerobia ha sido más usada para el tratamiento de aguas residuales, que para el tratamiento de excretas.

“Los residuos orgánicos obtenidos después de la biodegradación anaerobia (efluente) tienen mayor riqueza nutricional que los obtenidos en la biodegradación aerobia” (Soria Fregoso, y otros, 2001). Esto debido a que los nutrientes como el fósforo, azufre, y nitrógeno se encuentran en su forma elemental y no en grandes cadenas de biopolímeros, por lo que su aprovechamiento como nutriente es directo.

Estos efluentes se denominan “estabilizados”, entendiendo la estabilización como a la materia orgánica que ha pasado por las etapas de la degradación anaerobia y ha sido degradada de las largas cadenas poliméricas a sus componentes esenciales obteniendo nuevas características, como una significativa reducción de olores de hasta un 80%, con un digestato sin olor y algunos olores remanentes como el amoníaco, desaparecen rápidamente después de aplicarlo como fertilizante (Al Seadi, y otros, 2008).

Resumiendo, las ventajas descritas por Agrowaste (2014) y con lo mencionado por Martínez (2013) podemos determinar que:

- El biogás generado contiene un alto poder calorífico, que puede ser aprovechado.
- Cumple como energía renovable.
- El digestato resultante se encuentra bien estabilizado y puede servir como un digestato muy efectivo en jardinería como recurso importante para la agricultura y recuperación de suelos con nutrientes limitados.
- No existe generación de olores en los efluentes.
- Disminución del volumen del material a digerir.

Las ventajas genéricas del proceso de digestión son bien conocidas y las líneas de investigación y desarrollo se dirigen a conocer mejor el proceso a nivel microbiológico, a aumentar la velocidad de proceso, a aumentar la capacidad de control, a incrementar el potencial de producción de biogás, a mejorar el balance energético, a integrar el proceso en un tratamiento completo y, en definitiva, a mejorar el balance económico.

2.3.1.1 Ambientales

Desde el punto de vista “ambiente”, la recuperación de los residuos que aparentemente no tiene un valor más que como residuo, resulta conveniente la implementación de un digestor debido a los efluentes obtenidos el biogás como uso energético y el digestato de valor nutricional para agricultura. Por lo tanto, el digestor anaerobio puede verse como un sistema tecnológico integrado con múltiples beneficios.

Al igual que el gas natural, el biogás tiene una amplia variedad de usos, pero al ser un derivado de la biomasa, constituye una fuente de energía renovable.

Otro beneficio ambiental involucra la reducción de los residuos en los rellenos sanitarios, logrando mayores tiempos de vida útil en ellos y obteniendo energía de los residuos.

La digestión anaeróbica elimina el problema de emisión de olores molestos, como, por ejemplo, el olor a amoníaco, producto de la acumulación de excretas y orina sin tratar, al igual que fomenta la protección de las aguas subterráneas al evitar la lixiviación.

2.3.1.2 Economía

La presión económica sobre los productos agrícolas convencionales se encuentra en continuo aumento. Muchos agricultores se ven obligados a renunciar a su producción, principalmente debido a que sus tierras no presentan rendimientos rentables. Sin embargo, en muchos países la producción de biogás se encuentra subvencionada o presenta incentivos económicos proporcionando a los agricultores un ingreso adicional. Por lo tanto, en el sector agrícola, la implementación de tecnologías de digestión anaeróbica puede permitir obtener importantes beneficios económicos, ambientales y energéticos. Por otra parte, permite una gestión mejorada de nutrientes, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y a la captura y uso de biogás (Gobierno de Chile, (PNUD), (FAO), & (GEF), 2011).

En comparación a la DA, en la digestión aerobia se generan compuestos de bajo poder energético como CO₂ y H₂O. Gran parte de la energía se pierde y se libera a la atmósfera. Por el contrario en la DA debido a sus etapas, se generan compuestos que se requieren en las siguientes para el buen desarrollo del proceso, y al final generar el biogás.

Se estima que la pérdida de energía de un proceso aeróbico es aproximadamente veinte veces superior al de un proceso anaeróbico (Gobierno de Chile, (PNUD), (FAO), & (GEF), 2011).

2.3.2 Limitaciones

Existen diversas limitaciones para llevar a cabo los objetivos, la mayoría de estos derivados directamente del funcionamiento del biodigestor y las características de los sustratos.

1. Propiedades físicas desfavorables.

La digestión tiende a estar en dos fases una sólida y otra líquida, en la que, si no realiza una agitación, puede llevar a una digestión incompleta con distribución de microorganismos desigual. Por ello en el diseño se instala un agitador manual para evitar este problema.

- a. El tamaño de la partícula es importante debido a que a mayores tamaños los microorganismos necesitarán mayores tiempos para degradar. Además, que cuando

existen partículas grandes la homogeneidad del sustrato a digerir no es óptima, al llevar a cabo una molienda el sustrato adquiere un estado que tiende a líquido y hasta cierto nivel homogéneo.

2. Digestión por parte de los microorganismos.

- a. Es necesario que el sustrato a digerir cuente con las características necesarias en relación a nutrientes, para que las cuatro etapas de la digestión anaerobia (Hidrolisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis) se lleven a cabo. Son estrictamente necesarias que sean llevadas a cabo en ese orden, sí algunas etapas no se llevan a cabo, todo el proceso se verá afectado. La codigestión anaerobia soluciona en gran medida este problema, haciendo uso de sustratos que se complementan, y que como se mencionó antes en estudios se presentan buenos resultados de codigestión.
- b. La biodigestión es realizada por bacterias especializadas y la presencia de sustancias tóxicas o sustrato que no pueda ser digerido como plástico, arena y huesos pueden afectarles, en su crecimiento y en el acceso al sustrato orgánico logrando mayores tiempos de degradación y por lo tanto, tiempos de retención hidráulico más largos, la presencia de cítricos tales como limón, naranja y toronja, realizan un cambio drástico del pH afectando a las etapas de la digestión. Al procesar los residuos en la muestra se eliminarán estos residuos.

2.3.3 Biogás

Es una mezcla gaseosa formada principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) y con pequeñas trazas de otros gases como monóxido de carbono (CO), ácido sulfhídrico (H_2S), amoníaco (NH_3), entre otros.

La cantidad presente de metano en el biogás varía, según el tipo de materia orgánica digerida y de las condiciones del proceso, con porcentajes entre el 50% a un 70% aproximadamente. Su composición depende directamente del sustrato digerido y de diversos parámetros que influyen directamente en el proceso. “Esta proporción está en función del tipo de sustrato y en función de las sustancias digeribles como hidratos de carbono, las grasas y las proteínas, las fibras no son digeribles” (renac: renewables academy, s.f).

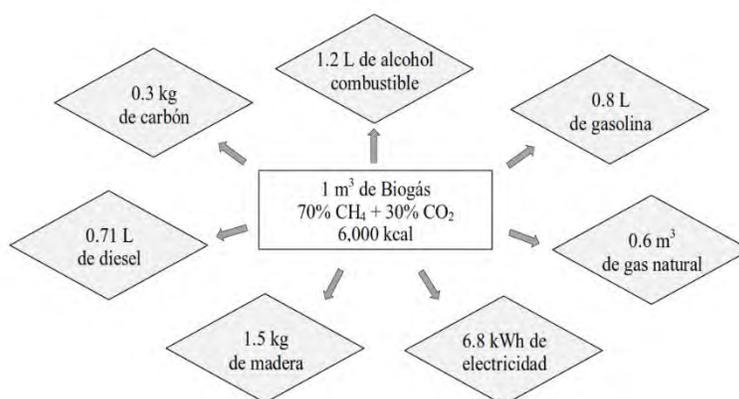


Figura 2. Equivalencias del biogás con respecto a otras fuentes de energía. Citado en Martínez (2013)

Mayormente se busca una riqueza superior al 60% de metano, debido a que este es el único con valor calorífico, siendo el dióxido de carbono despreciable para esta tarea.

Debido a su contenido en metano, el biogás, también llamado gas pobre o de baja energía, tiene características similares al gas natural, pero con un poder calorífico inferior un poco mayor a la mitad del poder calorífico de este combustible fósil (Arrieta Palacios, 2016).

Sobre el rendimiento teórico de biogás este varía en el contenido de carbohidratos, proteínas y lípidos. Los lípidos proporcionan el mayor rendimiento de biogás, pero requieren un tiempo de retención prolongado debido a su lenta biodegradabilidad, mientras que los carbohidratos y las proteínas muestran tasas de conversión más rápidas pero menores rendimientos de gas (Esposito, y otros, 2012).

2.3.3.1 Producción de biogás

Arrieta (2016), que la cantidad de biogás y su calidad dependen del tipo de sustrato usado y en las condiciones en la que se procesa, es decir:

En primer lugar, la cantidad de biogás y metano que se obtiene estará en función del potencial o rendimiento último que se puede obtener de determinada materia prima, con un tiempo de digestión que se aproxima al infinito.

Éste a su vez guarda relación con el potencial teórico de metano, de acuerdo a su composición química (proporción de proteínas, carbohidratos, lípidos, etc.).

En segundo lugar, la cantidad real de biogás obtenido (siempre menor que la producción última) depende de la manera en que se lleve a cabo el proceso de digestión anaerobia; es decir, que para una misma materia prima (igual composición y rendimiento último de metano), la cantidad y calidad de biogás obtenido dependerá de la temperatura del proceso, el Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) de la relación sustrato-agua, etc. Todos estos parámetros determinados por la configuración del digester.

Por tanto, aunque el potencial teórico y rendimiento último de metano otorga una idea de la calidad del desecho y del potencial de producción de biogás o metano, el rendimiento que en la práctica se alcanza en un biodigester no es igual a la producción última, porque obviamente no se puede trabajar con un TRH infinito para lograr la degradación máxima de la materia orgánica bajo condiciones anaeróbicas.

De acuerdo con Angelidaki y Sanders (2004), el rendimiento real obtenido en un reactor de biogás será siempre menor debido a factores como:

- Una fracción del sustrato es utilizado para sintetizar (formar) la masa bacteriana, típicamente del 5% al 10% del material orgánico degradado.
- La lignina no se degrada anaeróbicamente. Compuestos que contienen lignina se degradaran en un grado limitado.
- En un tiempo de retención finito una fracción del material orgánico se perderá en el efluente, típicamente el 10%.
- Usualmente, una parte del material orgánico es inaccesible debido a la unión de partículas o materia orgánica estructural. Esta condición y la anterior son las principales causas de diferencia entre la producción última y la real.
- La inhibición del proceso biológico por inhibidores como amoníaco y ácidos grasos volátiles (AGV) es otro factor que contribuye a que el rendimiento real de metano sea menor que el rendimiento teórico o último (controlado para evitar la inhibición), el cual se obtendría si la inhibición no estuviera presente.

2.3.4 Digestato

El digestato es el sustrato degradado, resultado de la producción de biogás. (Al Seadi, y otros, 2008). Se presenta como una mezcla sólido-líquida que igual que el biogás, su composición depende directamente del sustrato a digerir y de los diferentes parámetros involucrados.

En el proceso de digestión anaeróbica se remueve solo la masa volátil que puede generar el biogás (CH_4 , CO_2 , H_2S) que representa entre 5 al 10% del volumen total de la carga. Es por ello que en el efluente del biodigestor se conservan nutrientes originales (N, P, K) contenidos en su materia prima (biomasa o sustrato), que son esenciales para los cultivos (Salamanca Tamayo, 2009).

Gracias a ello tiene alto valor como fertilizante, esto debido a que es rico en nutrientes tales como nitrógeno, fósforo, potasio y demás micronutrientes (Dependiendo del tipo de biomasa, temperatura de trabajo y TRH), provenientes de la descomposición de las grandes cadenas poliméricas que conforman la materia orgánica, estabilizado químicamente, prácticamente libre de microorganismos patógenos y de sencilla utilización.

Su eficiencia como fertilizante de suelos es mayor en comparación a las excretas ya que es una mezcla homogénea con un acceso directo a nutrientes esenciales. Con una proporción carbono/nitrógeno (C/N) significativa y con la reducción de olores.

Para que su uso como fertilizante sea seguro, el digestato debe de contar con ciertas características para evitar una infección por su manejo. Independientemente del sustrato a utilizar este contiene patógenos que, con un debido tiempo de retención hidráulico, así como temperaturas consideradas termófilas, puede sanitizar el digestato al salir del digestor, o someterse a un tratamiento a su salida.

Como cita, Salamanca Tamayo (2009) el bioabono se caracteriza en base a sus propiedades y al sustrato del cual proviene, de tal manera que las principales características son las siguientes:

- Menor tamaño de partículas y homogenización.
- Reducción de malos olores.
- Reducción de microorganismos patógenos, larvas.
- Se mantiene la concentración de los nutrientes (NPK) del sustrato.

- Menor viscosidad.
- Mayor mineralización y disponibilidad para el cultivo

2.4 Bioquímica y microbiología

2.4.1 Fases de la digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso complejo. Esta complejidad se debe a las múltiples reacciones bioquímicas que realizan los microorganismos, que como más adelante se explica, dichas reacciones son simultáneas sin una separación clara entre las fases.

A lo largo de los años los diversos estudios bioquímicos y microbiológicos en relación a la digestión anaerobia, han caracterizado el proceso bioquímico de la degradación anaerobia.

Foster (2005) y Arrieta (2016) identifican cuatro fases o etapas:

1. Etapa hidrolítica o hidrólisis
2. Etapa de fermentación o acidogénesis
3. Etapa acetogénica o acetogénesis
4. Etapa de fermentación metanogénica o metalogénesis

Cuando se acumula materia orgánica (Carbohidratos, proteínas, lípidos, celulosa, etc.) en un medio acuoso, los microorganismos consumen el oxígeno presente tratando de alimentarse de la materia orgánica, cuando el oxígeno se ha consumido, se dan las condiciones necesarias para el desarrollo de microorganismos anaerobios y el inicio de las etapas antes mencionadas (Arrieta Palacios, 2016).

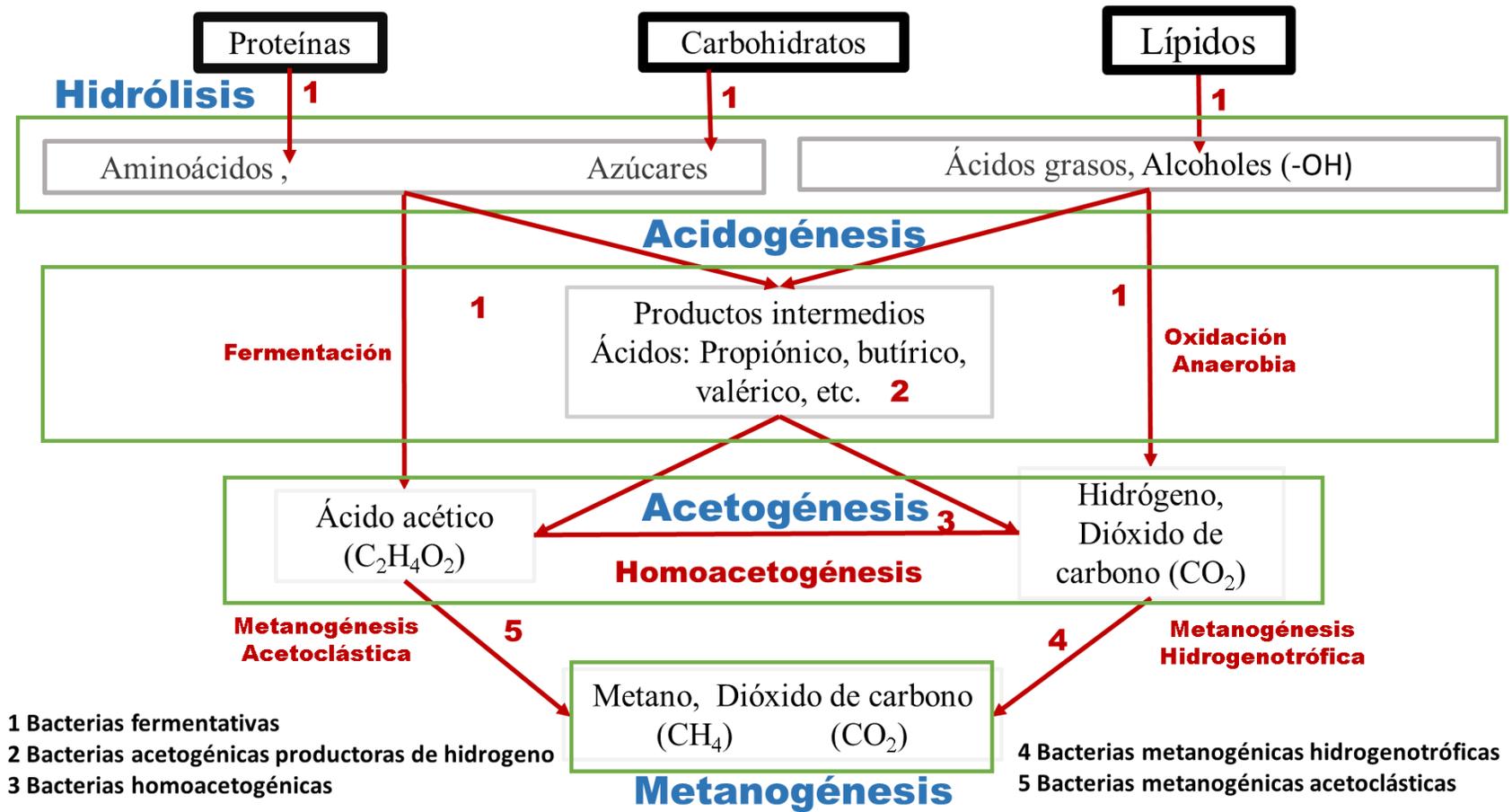


Figura 3. Etapas de la digestión anaerobia

Las cuatro etapas de la degradación anaerobia se aprecian en la Figura 3 . Estas etapas que conllevan a la degradación de la materia orgánica y producción de biogás, se dan por múltiples pasos ligados unos a otros y que a su vez ocurren paralelos en tiempo y espacio en el reactor del biodigestor, sin una separación clara entre las fases.

Los microorganismos presentes en cada etapa se caracterizan por tener diferentes velocidades de crecimiento y diferente sensibilidad a cada compuesto intermedio como inhibidor (por ejemplo, el hidrógeno, ácido acético o amoníaco proveniente de la acidogénesis de aminoácidos). Esto implica que cada etapa presentará diferentes velocidades de reacción de acuerdo a la composición del sustrato, por lo que la estabilidad del proceso global requerirá de un equilibrio que evite la acumulación de compuestos orgánicos intermedios que lo pueden detener o inhibir (por ejemplo, la acumulación de ácidos grasos volátiles que puede producir la disminución del pH).

Arrieta (2016) y Campos (2001) explican que la velocidad del proceso de digestión anaeróbica está limitada por la velocidad de la etapa más lenta, la cual depende de la composición de cada residuo.

Cualquier sustrato se compone de tres tipos básicos de macromoléculas: hidratos de carbono, proteínas y lípidos (Gobierno de Chile, (PNUD), (FAO), & (GEF), 2011).

2.4.2 Hidrolisis

La hidrolisis es teóricamente el primer paso de la digestión anaerobia, en ella las moléculas orgánicas complejas de largas cadenas de estructura carbonada (polímeros como proteínas, carbohidratos y lípidos) son degradadas (mono y oligómeros) por medio de enzimas extracelulares producidas por microorganismos acidogénicos o fermentativos. Dan lugar a compuestos solubles más sencillos como: aminoácidos, ácidos grasos de cadena larga y azúcares (Arrieta Palacios, 2016).

Las proteínas constituyen un sustrato muy importante en el proceso de digestión anaeróbica debido a que además de ser fuente de carbono y energía, los aminoácidos derivados de su hidrólisis tienen un elevado valor nutricional. Las proteínas son hidrolizadas en péptidos y aminoácidos por la acción de enzimas proteolíticas llamadas proteasas.

Parte de estos aminoácidos son utilizados directamente en la síntesis de nuevo material celular y el resto son degradados a ácidos volátiles, dióxido de carbono, hidrógeno, amonio y sulfuro en posteriores etapas del proceso.

La degradación de los lípidos en ambientes anaeróbicos comienza con la ruptura de las grasas por la acción de enzimas hidrolíticas denominadas lipasas produciendo ácidos grasos de cadena larga y glicerol.

Estos compuestos atraviesan la pared celular y en el interior se transforman en compuesto más simples como, acetato, propionato, butirato, amoníaco, alcoholes, etc. (Foster Carneiro, 2005).

Los compuestos solubles (Oligosacáridos, azúcares, alcoholes, aminoácidos y ácidos grasos) constituyen las principales fuentes de carbono y energía para las células.

Durante la hidrólisis polímeros como carbohidratos, lípidos, ácidos nucleicos y proteínas son convertidos en glucosa y glicerol (Al Seadi, y otros, 2008).

Los microorganismos hidrolíticos excretan enzimas hidrolíticas, convirtiendo biopolímeros en componentes simples y solubles (Ecuación 1) (Al Seadi, y otros, 2008).

Lípidos Ácidos → *lipasas* → *Ácidos Grasos y glicerol*

Polisacáridos → *Celulasa Celobiasa Xilanasa Amilasa* → *Monosacáridos*

Proteínas → *Proteasas* → *Aminoácidos*

Ecuación 1. Compuestos, enzimas y productos

La velocidad de degradación de los materiales lignocelulósicos compuestos principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa, es tan lenta que suele ser la etapa limitante del proceso de hidrólisis.

Esto es debido a que la lignina es muy resistente a la degradación por parte de los microorganismos anaeróbicos afectando también a la biodegradabilidad de la celulosa, de la hemicelulosa y de otros hidratos de carbono.

Los principales productos de la hidrólisis de la celulosa son celobiasa y glucosa, mientras que la hemicelulosa produce pentosas, hexosas y ácidos urónicos. La tasa de hidrólisis, en general, aumenta con la temperatura. La tasa de hidrólisis depende, también, del tamaño de las partículas, debido fundamentalmente a la disponibilidad de superficie para la adsorción de las enzimas hidrolíticas.

Los pretratamientos físico-químicos, cuyo principal efecto es la reducción del tamaño de las partículas, producen un aumento en la tasa de hidrólisis, y si esta fase es la limitante del proceso anaerobio, supone un beneficio para el proceso general, produciendo menores tiempos de retención y tamaños de reactor menores.

Campos (2001) resume los parámetros decisivos para el grado de hidrolisis y la velocidad del proceso en:

- pH
- Temperatura: La tasa de hidrolisis aumenta con la temperatura independientemente del sustrato (Foster Carneiro, 2005).
- Concentración de biomasa hidrolítica
- Tipo de materia particulada
- El tamaño de partículas: Como se cita en Campos (2012) Hills y Nakano (1984), demostraron que la tasa de hidrolisis depende, además de la temperatura de la disponibilidad de superficie para la adsorción de las enzimas hidrolíticas.

Las conclusiones de Campos (2001) para los parámetros físico-químicos anteriores en la hidrolisis son idénticos a los de Foster (2005) tienen como principal efecto, la reducción de las partículas, produciendo un aumento en la tasa de hidrolisis, siendo esta etapa limitante en la digestión anaerobia, supone tiempos de retención menores y tamaños de reactor menores. Cuanto mayor es la velocidad de solubilización de la materia orgánica, mayor es la velocidad de producción de biogás.

La etapa hidrolítica puede ser el proceso limitante de la velocidad global del proceso sobre todo cuando se tratan residuos con alto contenido de sólidos (Gobierno de Chile, (PNUD), (FAO), & (GEF), 2011).

2.4.3 Acidogénesis

Ocurre la fermentación de las moléculas orgánicas solubles (Azúcares, aminoácidos y ácidos grasos, producidas en la hidrólisis) en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico, H₂) y compuestos orgánicos más reducidos (láctico, etanol y propiónico, butírico). La fermentación es la conversión de compuestos orgánicos, sin un aceptor específico de electrones, para producir compuestos oxidados o reducidos. Los mayores grupos sujetos a la fermentación en condiciones anaerobias son los azúcares y aminoácidos (Alcántar González, 2014)

La formación de un tipo de ácido u otros ácidos dependerá de la de concentración de hidrógeno, si esta concentración es pequeña se formara principalmente ácido acético y si la concentración de hidrógeno es elevada se formaran ácidos de mayor tamaño.

Tabla 2. Grupos de enzimas hidrolíticas y sus funciones adaptado de (Schnürer & Jarvis, 2009)

Enzima	Sustrato	Productos finales
Proteinasa	Proteínas	Aminoácidos
Celulasa	Celulosa (Componentes importantes de plantas, se encuentran en frutas, granos, vegetales, etc.)	Celobiosa y glucosa
Hemicelulolasa	Hemicelulosa (Componentes importantes de plantas, se encuentran en frutas, granos, vegetales, etc.)	Azúcar (Glucosa, xilosa, manosa y arabinosa)
Amilasa	Almidón	
Lipasa	Grasas	
Pectinasa	Pectina (Se encuentra principalmente en frutas, tienen una estructura compleja)	

En estas etapas no existe una reducción significativa de la Demanda Química de Oxígeno del sustrato, puesto que las cadenas orgánicas complejas se transforman en cadenas más cortas (Salamanca Tamayo, 2009).

En esta etapa se encuentran activos más organismos en comparación con el resto de las etapas (Schnürer & Jarvis, 2009), aproximadamente un 90% del total de los microorganismos involucrados en el proceso son acidogénicos (Alcántar González, 2014)

Las bacterias en esta etapa son obligadas o facultativas, muy abundantes en la naturaleza y bacterias proteolíticas (Alcántar González, 2014). Las bacterias involucradas en esta etapa transforman los ácidos grasos volátiles de la etapa anterior en ácido acético, CO₂ y H₂. “Además de producir el alimento para las bacterias metanogénicas, necesitan oxígeno y carbono para la producción de ácido acético, eliminando cualquier traza de oxígeno disuelto en el reactor, propiciando las condiciones anaerobias” (Arrieta Palacios, 2016).

En la fermentación de los lípidos se encuentran como principales productos se encuentran ácidos grasos volátiles, H₂ y CO₂. La fermentación de los aminoácidos es considerado un proceso rápido, ya que no limita la velocidad de la degradación de compuestos proteicos. Los principales productos de su fermentación, y de otras moléculas nitrogenadas son ácidos grasos de cadena corta, succínicos, aminovalérico y H₂.

2.4.4 Acetogénesis

Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicas (H₂ y acetato), otros (valeriato, butirato, propionato, algunos aminoácidos, etc.) necesitan ser transformados en productos más sencillos, acetato e hidrógeno, a través de las bacterias acetogénicas. Como principales productos se obtienen ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono que, posteriormente, pueden ser aprovechados por las bacterias metanogénicas.

Alcántar (2014) y Foster (2005) identifican que la acetogénesis, puede desarrollarse a partir de dos rutas:

- a) Deshidrogenación acetogénica: como producto de la fermentación de ácidos grasos volátiles o lactato y alcoholes, esta ruta requiere de la concentración de hidrogeno existente, por lo tanto, es necesario que el hidrogeno generado en el digestor anaerobio sea utilizado y consumido con igual velocidad.

Cuando la producción de hidrógeno en el gas es muy baja (5-50 ppm), las reacciones que ocurren son termodinámicas favorables, existirá mayor formación de acético y su energía libre será suficiente para permitir la síntesis de ATP y el crecimiento bacteriano.

De modo contrario, cuando la eliminación de hidrógeno es lenta, aumenta su concentración y, por lo tanto, la proporción de ácidos grasos de cadena corta, como el ácido propiónico, butírico, valérico, isovalérico, heptanóico, etc., lo que puede llevar a una acidificación de reactores anaerobios, llevando a una desestabilización del reactor.

- b) Hidrogenación acetogénica: Algunos autores admiten la existencia de otras bacterias denominadas homoacetogénicas (Alcántar González, 2014) que pueden crecer autótroficamente a partir del hidrógeno y dióxido de carbono sintetizan acetato cuando las bacterias metanogénicas utilizadoras de H_2 , están inhibidas debido a un pH bajo.

2.4.5 Metanogénesis

Los microorganismos de esta etapa son bacterias procariontas (Organismos celulares muy simples) (Arrieta Palacios, 2016). **Y** pueden ser considerados los más importantes, debido a que son estos los que forman el metano (Gas de mayor importancia en el biogás) consumiendo los productos generados en la acidogénesis.

Estas bacterias son estrictamente anaeróbicas (La presencia de oxígeno molecular las elimina). Descomponen los compuestos de bajo peso molecular, como el hidrógeno, dióxido de carbono y ácido acético, formando metano y dióxido de carbono, compuestos que conforman el biogás en mayor proporción, que va desde 60% o hasta 90% de metano (en digestores industriales), seguido de dióxido de carbono y en una proporción mínima otros gases como el ácido sulfhídrico y monóxido de carbono.

Las más importantes son las que transforman los ácidos propiónico y acético, denominadas bacterias metanogénicas acetoclásticas. El otro grupo de bacterias metanogénicas son las hidrogenoclasticas que consumen el hidrógeno generado y lo convierten con dióxido de carbono en biogás (Salamanca Tamayo, 2009).

En la Ecuación (2) se presenta como es dividido el ácido acético, formando metano y dióxido de carbono. En la Ecuación (3) se observa cómo es reducido el dióxido de carbono que junto al hidrógeno forma metano y agua.

Se ha demostrado que un 70% del metano producido en los reactores anaeróbicos se forma partir de la descarboxilación² de ácido acético. El metano restante proviene de los sustratos como el ácido carbónico, el ácido fórmico y el metanol. De estos últimos, el más importante es el carbónico, el cual es reducido por el hidrógeno (Arrieta Palacios, 2016).



2.4.6 Microorganismos involucrados en la digestión anaerobia

Los microorganismos que intervienen en cada fase tienen propiedades distintas (como la velocidad de crecimiento, la sensibilidad a cierto compuesto y a la temperatura, etc.) (Arrieta Palacios, 2016).

Se dice que las tasas de crecimiento de las bacterias metanogénicas son cinco veces menores que las acetogénicas, además de presentar mayor sensibilidad a las variaciones de la temperatura (Como se cita en Arrieta Palacios, 2016).

En la **Tabla 3** se realiza una comparación entre los dos grupos de bacterias más importantes debido a que muestran grandes diferencias, se puede concluir que un cambio en los parámetros de funcionamiento influye más en los microorganismos metanogénicos que en los acidogénicos.

² Es una reacción química en la cual un grupo carboxilo o grupo (-COOH) es eliminado de un compuesto en forma de dióxido de carbono (CO₂).

Tabla 3. Comparación entre los microorganismos de la etapa ácida generadora de productos intermedios y la metanogénica.

Microorganismos acidogénicos	Microorganismos metanogénesis
Bacterias facultativas (pueden vivir en presencia de bajos contenidos de oxígeno)	Bacterias anaeróbicas estrictas (no pueden vivir en presencia de oxígeno)
Alta tasa reproductiva	Baja tasa reproductiva
Poco sensible a los cambios de acidez y temperatura.	Muy sensible a los cambios de acidez y temperatura
Principales metabolitos, ácidos orgánicos	Principales productos finales, metano y dióxido de carbono

Nota 1. Fuente (Arrieta Palacios, 2016) página 44

Como se explicó anteriormente, idealmente los compuestos producidos por los microorganismos acidogénicos deben ser consumidos por los microorganismos metanogénicos. Sin embargo una alta producción de ácidos (Principalmente ácidos grasos volátiles) debido a la alta tasa de reproducción de los microorganismos acidogénicos (que es más alta que la de los microorganismos metanogénicos) puede ocasionar que en algunos casos se acidifique el medio.

Entre las bacterias más comunes para la formación de metano en la fase metanogénica tenemos a la *Metanosarcina* la cual tiene un crecimiento rápido y tiene la capacidad de convertir hidrógeno, CO y metanol en metano. Por otro lado tenemos a *Metanothix* que tiene un crecimiento lento y con la capacidad de convertir al ácido acético en metano, entre muchas más bacterias existente en el sustrato (Salamanca Tamayo, 2009).

2.4.6.1 Metanogénesis Acetoclástica

Esta es la fase final de todo el proceso de digestión anaerobia debido a que se llega a la transformación de la materia orgánica a biogás, especialmente a metano. Por medio de la metanogénesis acetoclástica se convierte el ácido acético en metano, es por ello que es la vía principal de la producción de metano, ya que corresponde al 70% de la producción total (Salamanca Tamayo, 2009).

2.4.6.2 Metanogénesis Hidrogenoclástica

Esta fase compite con la acetogénesis hidrogenoclástica debido a la capacidad que poseen las bacterias metanogénicas para transformar el hidrógeno con dióxido de carbono a metano.

Estas bacterias realizan con la ayuda de la acetogénesis la labor de mantener el nivel del hidrógeno en el sistema (Salamanca Tamayo, 2009).

2.5 Sustratos

El sustrato es la biomasa o material orgánico que ingresa al biodigestor para su degradación anaeróbica, para que esta tecnología sea realmente barata y una excelente fuente de energía, normalmente se ocupa los desechos orgánicos, es decir materiales que no tengan otra aplicación y que son contaminantes orgánicos y se les da valor agregado al convertirlos en materia prima.

La calidad del sustrato es un factor importante en la producción de biogás ya que dependiendo de la cantidad de grasas, proteínas, hidratos de carbono y nutrientes que tenga la biomasa es la cantidad y calidad del biogás producido. El material orgánico se puede dividir en dos grupos: materias primas ricas en nitrógeno y materias primas ricas en carbono, el nitrógeno es utilizado como constituyente para la formación celular y el carbono es utilizado como fuente de energía (Como se cita en Salamanca Tamayo, 2009).

Se consideran clave propiedades del sustrato como: solubilidad, granulometría, biodegradabilidad, concentración (relacionada a las condiciones de operación del digester) y su composición química (Arrieta Palacios, 2016).

De ahí la importancia del sustrato a usar para la digestión anaerobia, sus características, como composición química, física influye en su degradación y formación de biogás.

Entre las características básicas que debe de cumplir el sustrato que se desee degradar están:

- Sustrato no podrido o fermentado, ya que este ingresa con un pH inferior al pH óptimo para la DA.
- Una vez iniciado la degradación de un tipo de sustrato, el cambio de este debe ser progresivo y no de forma brusca (Moncayo Romero, 2013).
- Evitar sustratos con un pH ácido como los cítricos.

Tabla 4. Características de algunas materias primas y su rendimiento promedio de metano obtenido a través de su digestión anaeróbica

Tipo de biomasa	Contenido orgánico	Relación C/N	ST (%)	SV (% de ST)	Producción de Metano (CH ₄ kg SV)
Desechos animales y subproductos					
Purín de cerdo			5	80	0.3
Estiércol de cerdo (sólido)		7	20	80	0.3
Purín de vaca			8	80	0.2
Estiércol de vaca (sólido)	Carbohidratos, proteínas, lípidos	13	20	80	0.2
Gallinaza		7	20	80	0.2
Estiércol de gallina		4	5	80	0.4
Contenido de estómago/ intestinos de ganado		4	20	80	0.46
Desechos de plantas y subproductos					

Paja		90	70-90	80-90	0.15 - 0.35
Desechos de jardín	Carbohidratos y	125	60-70	90	0.2. - 0.5
Hierba o pasto	lípidos	18	20-25	90	0.3 – 0.55
Desechos de frutas		35	15-20	75	0.25 – 0.5
Desechos orgánicos de industrias					
Suero	75-80% lactosa, 20-	-	5	90	0.33
Suero concentrado	25 % proteínas	-	10	90	0.54
Lodos de flotación	65-70% proteínas, 30-35% lípidos	-	5	80	0.54
Lodos de aguas residuales	-	-	5	75	0.4
Lodos concentrados de aguas residuales	-	-	10	75	0.4
Pulpa de aceituna	-	-	24	96	0.18
Restos de comida	-	-	10	80	0.5 – 0.6
Cultivos energéticos					
Ensilado de hierba					
Ensilado de maíz		17	15-40	90	< 0.45
Ensilado de remolacha forrajera					

Nota 2. Fuente (Arrieta Palacios, 2016) (Wellinger, Jerry, & David, 2013)

El porcentaje de sólidos volátiles respecto al de sólidos totales (% de sólidos volátiles o SV) suele variar entre el 70-95%. Los residuos que tienen un porcentaje inferior al 60% no suelen considerarse buenos sustratos para la digestión anaerobia. Una buena biodegradabilidad es clave para obtener un alto rendimiento de biogás (ainia (Departamento de Calidad y Medio Ambiente), 2018).

2.5.1 Estiércol de cerdo

Las excretas de cerdo consisten en una mezcla de orines y excremento. La composición química de las excretas se ve influida por diversos factores, entre ellos la alimentación del animal, y la calidad del alimento. Los animales sólo retienen aproximadamente el 15 por ciento de los nutrientes contenidos en la materia convirtiéndolos en producto animal, el 85 por ciento restante se excreta (Medrano Róldan, 2006).

“Un aspecto de beneficio económico de las excretas, a diferencia de otros sustratos, es que es un buen abono agrícola, lo que implica que el estiércol líquido de cerdo puede ser utilizado como un recurso con un potencial, agronómico y ambiental, económicamente sostenible” (Cómo cita Sosa Espinoza, 2015).

“El proceso de digestión anaerobia aplicado a purines de cerdo ha demostrado, su viabilidad técnica y versatilidad para adaptarse a diferentes condiciones de trabajo, desde grandes instalaciones de gestión centralizada; plantas en granjas individuales, instalaciones sencillas de recuperación de gas en balsas cubiertas, tratando la fracción líquida, o la fracción sólida” (Flotats, Campos, Palatsi, & Bonmatí, 2001).

La utilización de excretas tanto líquidas como sólidas de animales para la DA tiene algunas ventajas debido a sus propiedades (Al Seadi, y otros, 2008).

- El contenido natural de bacterias anaerobias, provenientes del estómago de los animales.
- Un producto barato ya que se considera como residuo.
- La accesibilidad que se tiene para su recolección.

Con lo anterior se puede afirmar que, el estiércol presenta una composición adecuada para la digestión anaeróbica, de acuerdo a las características mencionadas.

2.5.2 Residuos alimenticios

Los residuos alimenticios suelen contener altas concentraciones de materia orgánica fácilmente degradable (lípidos, carbohidratos, y proteínas), por lo que presentan un mayor potencial para la generación de biogás, que los residuos ganaderos de 30 a 500 m³/ton (Cómo se cita en Foster, 2001, p.72), sin embargo “antes de la carga de éste se debe someter a este tipo de sustratos a tratamientos previos como cortado, macerado y compostaje, a fin de poder liberar las sustancias factibles de ser transformadas” (Arrieta Palacios, 2016).

Estos residuos pueden presentar problemas para su digestión, como deficiencia en nutrientes necesarios para el desarrollo de los microorganismos anaerobios, baja alcalinidad, o excesivo contenido de sólidos.

Un ejemplo de los problemas que se pueden encontrar en la digestión de estos residuos es la lignina, un componente presente en las frutas y vegetales altamente refractario a la degradación anaerobia y afecta la biodegradación de la celulosa, hemicelulosa y otros polímeros, su degradación en el proceso es el limitante de la velocidad de la hidrólisis, y por tanto, de la degradación anaerobia de determinados sustratos (Campos Pozuelo, 2001)

2.5.2.1 Materiales lignocelulósicos

Componente principal de los residuos ganaderos contiene principalmente:

- Lignina
- Celulosa: Durante la hidrólisis produce celobiasa y glucosa
- Hemicelulosa: produce pentosas, hexosas y ácidos urónicos

La lignina es muy resistente a la degradación anaerobia y afecta la biodegradación de la celulosa, hemicelulosa y otros polímeros, su degradación en el proceso es el limitante de la velocidad de la hidrólisis y por tanto, de la degradación anaerobia de determinados sustratos.

En biomasas con alto contenido de lípidos y bajo contenido en compuestos hemicelulósicos (como los aceites usados, estiércol de gallinas, etc.) se obtienen mayores producciones de biogás (Arrieta Palacios, 2016).

Esta afirmación haría pensar en alimentar al digestor solamente con este tipo de biomasas, y así producir más biogás. Sin embargo, el proceso microbiológico, además de las fuentes de carbono, hidrógeno y nitrógeno (materia orgánica), requiere de ciertas sales minerales como azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros en menor proporción.

Como se explicó en la acidogénesis un exceso de grasas conlleva a una alta producción de AGV, inhibiendo el proceso por la acumulación de ácidos dentro del digestor los cuales descenderían el pH.

La digestión de lípidos, aunque tienen mayor potencial de generación de biogás, esto no quiere decir que no presente problemas como la acumulación de AGV, muy común en este tipo de digestiones.

2.5.3 Codigestión anaerobia

Si la digestión es de una mezcla homogénea de dos o más tipos de sustratos el proceso es llamado codigestión (Al Seadi, y otros, 2008). El sustrato con mayor contenido se considera el sustrato principal, mientras que el sustrato con menor contenido se considera el cosustrato, en función de su contenido de sólidos volátiles (VS) (Lo & Chiu, 2016).

La CDA puede dar como resultado un importante aumento del potencial de biogás cuando la mezcla de los sustratos se prepara con los porcentajes adecuados de los diferentes sustratos orgánicos que se van a digerir.

El efecto beneficioso de la codigestión se debe principalmente a la optimización del equilibrio de nutrientes en la mezcla de sustratos cuando codigieren sustratos ricos en nitrógeno con sustratos ricos en carbón (Esposito, y otros, 2012).

Los potenciales de producción de biogás a partir de excretas de cerdo son relativamente bajos, debido al bajo contenido en materia orgánica de los mismos, comparados con otros tipos de residuos, y la baja biodegradabilidad de la misma.

De acuerdo a Campos (2001) una mezcla de residuos ganaderos como lo son excretas de animales y residuos orgánicos en sistemas de mezcla completa es una metodología exitosa tanto en régimen termófilo como en el mesófilo.

Debido a la sinergia de la mezcla, que compensa carencias de cada uno de los sustratos, se logra una digestión más eficiente que realizando las digestiones de esos sustratos por separado.

Aunado a ello dado que diferentes sustratos tienen diferentes características, el efecto sinérgico de codigestión anaerobia se ve afectado por la relación de los sustratos codigeridos.

La elección de un cosustrato adecuado con una proporción de mezcla adecuada es importante para lograr una mejor producción de biogás (Lo & Chiu, 2016).

Por ejemplo los residuos alimenticios tienen un alto contenido en nutrientes que le otorga un potencial de generación de biogás alto, en comparación de las excretas de cerdo, sin embargo no cuenta con los microorganismos necesarios para llevar a cabo la digestión anaerobia, microorganismo que se encuentran en las excretas, provenientes del sistema digestivo.

En los resultados encontrados por Martínez (2013) de los efectos de la codigestión anaerobia de residuos orgánicos, se hace mención como surgió un incremento en la tasa de producción de metano de más de 100% con respecto a lo obtenido durante una digestión individual de residuos orgánicos que con la codigestión de lodos activados y estiércol de cerdo.

Igual hace mención de cómo es factible la combinación de estiércol de cerdo con frutas y verduras, en la que la sinergia se da ya que cuentan con características complementarias como el contenido de alcalinidad y nitrógeno orgánico por parte del estiércol de cerdo, los cuales ofrecen una solución a la deficiencia de nitrógeno, y al potencial de generación de acidez de los residuos de frutas y verduras, conferido por su alto contenido de azúcares totales.

En 2001 Flotats, X; Campos, E; Palatsi, J; Bonmatí, A, en su monografía “Digestión anaerobia de purines de cerdo y codigestión con residuos de la industria alimentaria” remarcan que el proceso de digestión anaerobia aplicado a purines de cerdo ha demostrado, su viabilidad técnica y versatilidad para adaptarse a diferentes condiciones de trabajo, desde grandes instalaciones de gestión centralizada; plantas en granjas individuales, instalaciones sencillas de recuperación de gas en balsas cubiertas, tratando la fracción líquida, o la fracción sólida.

En el presente trabajo se busca la codigestión anaerobia en una instalación sencilla, y con lo expresado anteriormente por Flotas, et al. (2001), se puede afirmar la viabilidad de la investigación.

Con lo mencionado por Martínez (2013) y Campos (2001) así como también Esposito et al (2012) coinciden en mencionar la viabilidad de la codigestión así como los múltiples beneficios que esta aporta, de ello podemos afirmar que es viable la codigestión de excretas

de cerdo y residuos alimenticios. De ahí que para producción de biogás, la codigestión anaeróbica se está adoptando cada vez más para tratar el desperdicio de alimentos debido a la mayor producción de biogás sobre digestión anaerobia, con un solo sustrato (Lo & Chiu, 2016).

2.6 Propiedades que definen a la biomasa.

2.6.1 Tamaño de partículas

Es necesario que el tamaño de los residuos sea el mínimo posible ya que “el pre tratamiento mecánico desintegra las partículas sólidas en partículas más pequeñas para aumentar el área superficial de las partículas del sustrato” (Lo & Chiu, 2016).

Para degradar diferentes sustancias orgánicas contenidas en residuos alimenticios, como la hemicelulosa, celulosa y lignina que son difíciles de degradar por las bacterias, debido a que no pueden ingresar en la pared celular, la molienda reduce este problema y las fibras que no se degradan se hacen presentes en el digestato resultante

2.6.2 Sólidos totales (ST), volátiles (SV) y fijos (SF)

“La biomasa se compone principalmente de agua y materia sólida (materia seca) o también conocida como sólidos totales” (Arrieta Palacios, 2016). Los sólidos totales son los residuos que quedan después de eliminación del agua de una muestra por medio de evaporación y secado, en un horno a una temperatura superior a los 105 °C hasta un peso constante.

Si los sólidos totales son sometidos a una combustión superior a 550°C a cierto tiempo, una proporción de la materia seca se volatiliza obteniendo cenizas, denominadas sólidos fijos. La diferencia entre los sólidos totales y fijos son la cantidad de sólidos volátiles presentes en la muestra de materia orgánica. El porqué de las temperaturas se basa en que la mayoría de los compuestos orgánicos se queman a esta temperatura (550°C) mientras que los compuestos inorgánicos requieren de mayores temperaturas.

La determinación de los sólidos volátiles y fijos por ignición no es la mejor medida para la distinción entre el material orgánico e inorgánico debido a que, por ejemplo, la pérdida de masa durante la combustión no se limita al material orgánico pudiendo también incluir la descomposición o volatilización de algunas sales minerales.

Los métodos más apropiados para la caracterización de la materia orgánica incluyen el COT, la DBO y la DQO (Arrieta Palacios, 2016).

El conocer la cantidad de sólidos totales es importante, debido a que representa con bastante cercanía el contenido de materia orgánica disponible en la biomasa, y mucho más importante es el conocer la cantidad de sólidos volátiles ya que esta cantidad es inversamente proporcional a la generación de biogás, ya que es la materia que se convierte a biogás. “Desafortunadamente, la concentración inicial de materia prima digerible (la que tiene capacidad de producir biogás) es muy difícil de medir (Arrieta Palacios, 2016)”.

Basado en el porcentaje de sólidos totales (ST) contenido en la mezcla la biodigestión se puede clasificar en 3 procesos distintos:

- Húmeda: 10% ST
- Semi-seco: 10–20% ST
- Seco: 20% ST, tiene la ventaja de hacer uso de menos agua, por tanto volúmenes de digestores más pequeños.

(Abbassi-Guendouz, y otros, 2012).

La digestión húmeda es recomendada para biodigestores donde se usen bombas, mezclas de biomasa y agua con niveles de ST superiores al 15% son difíciles de bombear por las tuberías de alimentación al digestor, además de ser difíciles de agitar, por lo que se requieren grandes cantidades de energía para agitar y lograr la homogeneidad de la mezcla dentro del digestor.

El realizar una digestión seca tiene la ventaja de hacer uso de menos agua, que algunas veces no está disponible en grandes volúmenes y además se reduce el volumen, debido a que el agua no produce biogás, sin embargo, es importante para el proceso de hidrólisis.

A medida que aumenta el contenido en sólidos del sustrato (alimentación muy concentrada) la movilidad de las bacterias metanogénicas se ve crecientemente afectada, por lo que se va reduciendo la capacidad de degradación de éste debido a que se dificulta el acceso de las bacterias a su fuente de alimentación y se da la formación de burbujas de biogás atrapadas en el sustrato, aumentando el volumen. En cambio, si la alimentación es muy diluida, los microorganismos no tendrán el alimento suficiente para sobrevivir.

Para digestores operados con estiércol de ganado, se recomienda un valor óptimo de operación entre 10 y 12% de ST, con lo que se lograría un mejor contacto entre las bacterias y el sustrato. Entonces, para mantener la una buena concentración de sólidos, la cantidad de agua y biomasa mezclados deben ser los adecuadamente.

Mediante experimentación se ha demostrado que, para asegurar el buen funcionamiento del proceso, una carga debe tener un contenido en ST entre 8% y 12% para digestores semicontinuos y entre 40% y 60% para digestores operados en modo discontinuo (Arrieta Palacios, 2016).

2.6.3 Demanda química de oxígeno (DQO)

Los parámetros o indicadores que se utilizan para medir el grado de contaminación o de materia orgánica, presente en el agua se basan en la cantidad de oxígeno necesario para descomponer u oxidar los productos orgánicos. Entre éstos se encuentran la Demanda Bioquímica o Biológica de Oxígeno (DBO), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y el Carbono Orgánico Total (COT).

La DQO describe la cantidad de oxígeno que se necesita para oxidar completamente el desecho (tanto de la parte orgánica biodegradable como otros compuestos presentes en la

muestra susceptibles a ser oxidados), convirtiéndolo en dióxido de carbono y agua. Se determina experimentalmente reteniendo la muestra en una solución fuertemente ácida con un exceso conocido de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$). La cantidad consumida de este agente químico oxidante se expresa en términos de su equivalencia en oxígeno.

La demanda biológica o bioquímica de oxígeno (DBO) mide la cantidad de materia susceptible de ser degradada biológicamente; es decir, la cantidad de oxígeno que los microorganismos, como las bacterias (aerobias o anaerobias facultativas) y hongos, consumen durante la degradación de las sustancias orgánicas contenidas en una muestra.

Como este proceso de descomposición varía con la temperatura y el tiempo, el análisis de la DBO se realiza, generalmente, en forma estándar durante cinco días a 20 °C, lo que se indica como DBO₅.

Esta medida es menor que la DQO (cantidad de materia susceptible de ser degradada por agentes químicos) ya que existe una fracción de la DQO que es oxidable químicamente pero no biológicamente, la cual se denomina DQO no biodegradable. Sin embargo, aunque durante la digestión anaeróbica ocurre una degradación biológica del sustrato, esta degradación será más elevada que la expresada por un análisis de la DBO₅ debido a que la temperatura y el tiempo de residencia de la materia orgánica dentro de un digestor son más elevados, siendo la DQO la medida más adecuada y rápida de ser realizada (Alcántar González, 2014).

Por el principio de conservación de la materia, la cantidad eliminada de demanda química de oxígeno, DQO, es una medida indirecta de la concentración de materia orgánica en el residuo que se degrada y se convierte en biogás, su disminución, indica la degradación del sustrato y la generación de biogás. “La cantidad máxima de metano producible es de 0.35 m³ CH₄/kg. DQO eliminada, en condiciones normales de presión y temperatura” (Salamanca Tamayo, 2009).

2.6.4 Relación sólidos volátiles y DQO

Como se explicó anteriormente los sólidos así, como la DQO son maneras de cuantificar la cantidad de materia presente en diversas muestras, siendo la DQO un análisis con mayor precisión que los sólidos. En el caso de los sólidos el parámetro que representa la producción de biogás son los sólidos volátiles.

La digestión anaerobia inicia con la materia orgánica compleja, siendo los valores iniciales de sólidos volátiles y DQO, el 100% de materia orgánica. Durante el proceso de la biodigestión la materia orgánica es transformada a biogás y por lo tanto los parámetros de sólidos volátiles y DQO disminuyen.

La diferencia entre los valores iniciales y finales en porcentaje, indican la eficiencia del método utilizado para la biodigestión. De ahí la importancia de estos análisis.

2.6.5 Potencial de generación de biogás

“Toda la biomasa tiene potencial para producir biogás, así sea en mínima proporciones” (Salamanca Tamayo, 2009).

Se pueden realizar estimaciones teóricas del potencial de producción de biogás con base en un análisis del contenido de carbono, nitrógeno e hidrógeno del sustrato, aun así solo sería una estimación teórica, ya que como se ha venido explicando son varios los factores que influyen en la producción de biogás.

2.6.6 Análisis FOS/TAC

El Centro Federal Alemán de Investigación Agrícola (Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft/FAL) desarrolló el análisis de FOS/TAC a partir de un test de valoración (Método Nordmann), con el fin de determinar el cociente de la concentración ácida y la capacidad compensadora del sustrato de fermentación.

FOS: significa Flüchtige Organische Säuren, es decir, ácidos orgánicos volátiles y, se mide en mg Ac.Acético/l.

TAC: significa Totales Anorganisches Carbonat, carbonato inorgánico total (capacidad de compensación alcalina) y, se mide en mg CaCO₃/l.

Esta relación FOS/TAC es reconocida como valor guía para evaluar los procesos de fermentación. Permite detectar a tiempo los problemas del proceso, hasta el inminente vuelco de la fase biológica del digester, con lo que pueden tomarse contramedidas inmediatamente.

Su determinación es sencilla, pero rinde información significativa para evaluar las condiciones y desarrollo del proceso de degradación anaerobia en una planta de biogás relacionando dos variables de medición entre sí.

En sistemas anaeróbicos, el valor de pH sólo puede mantenerse estable si hay un sistema de amortiguación³ disponible. La capacidad de amortiguación se produce principalmente como tampón de carbonato expresada como mgCaCO₃/l.

Aparte de formar el sistema tampón de carbonato, hay otros sistemas de amortiguación, dependiendo del valor de pH. Para plantas de biogás, por ejemplo, existe el sistema tampón de nitrógeno, en el que el amoníaco sirve como receptor de protones.

Los ácidos orgánicos juegan un papel importante en el sistema anaerobio, ya que el ácido acético de cadena corta (CH₃COOH)- junto con el dióxido de carbono CO₂ y el nitrógeno N- es la única fuente disponible para la producción de biogás (metano (CH₄) y (CO₂).

Aparte del ácido acético, el sistema produce un gran número de otros ácidos orgánicos⁴, de los cuales sólo son importantes los ácidos de cadena corta y fácilmente volátiles como el ácido propiónico (C₂H₅COOH), el ácido láctico (C₂H₅COOOH), el ácido butírico (C₃H₇COOH) y el ácido valérico (C₄H₉COOH).

En su camino hacia el biogás, todos estos ácidos fácilmente volátiles deben ser metabolizados primero en ácido acético por microorganismos.

La **Tabla 5** muestran los ácidos orgánicos que aparecen más frecuentemente en la DA, estas constantes de ácido se encuentran en un rango de pH comprendido entre 5.0 y 4.4 y son desplazados por el ácido sulfúrico con constante de ácido de pK_s-3.9. Por lo tanto, es

³ Absorción de protones libres (iones de H⁺)

⁴ Acidogénesis

posible realizar ensayos cualitativos sobre los contenidos de ácidos orgánicos (FOS), rendidos como equivalentes de ácido acético.

La estabilidad del proceso anaeróbico se puede evaluar a través del conocimiento de los parámetros individuales (ácidos orgánicos volátiles y capacidad tampón) o a través de la relación de estos parámetros entre sí. Si, por ejemplo, la relación de ácidos orgánicos es muy alta (por ejemplo > 10 g / L), esto indica que el metabolismo es incompleto, lo que puede conducir a la inhibición del proceso. Sin embargo, este efecto no es como mercado si al mismo tiempo hay una capacidad tampón adecuada en el sistema.

El consumo de H₂SO₄ hasta el valor pH 5 refleja la capacidad tampón del sistema tampón de carbonato como reserva de cal, que hoy también se conoce como TAC, entre pH 5 y pH 4.4, los protones son absorbidos por los ácidos orgánicos.

Tabla 5. Constantes de ácido de los principales ácidos generados en la DA.

Nombre	Ion	Pk_a
Ácido carbónico	HCO ₃ ⁻	6.35
Ácido acético	CH ₃ COO ⁻	4.76
Ácido propiónico	C ₂ H ₅ COO ⁻	4.86
Ácido valérico	C ₄ H ₉ COO ⁻	4.84
Ácido butírico	C ₃ H ₇ COO ⁻	4.82

2.7 Parámetros del control en el proceso de digestión

Debido a la intervención de diversos grupos de microorganismos, especialmente, los metanogénicos que, por su mayor sensibilidad, representan una etapa limitante; el proceso de la digestión anaeróbica para la producción de biogás (desde la hidrólisis hasta la metanogénesis) puede ser afectado por diversos factores, tales como: tipo de biomasa o materia prima, temperatura, nivel de acidez (pH), presencia de inhibidores, etc (Arrieta Palacios, 2016).

De acuerdo con Moncayo (2013) debido a que cada grupo de bacterias que intervienen en las distintas etapas del proceso responde de manera diferente a la influencia de estos factores, no es posible dar valores cualitativos para medir de manera precisa su influencia en la producción de biogás. Además, “el grado de influencia de cada factor sobre el proceso de

digestión anaeróbica está en función de otro u otros parámetros bajo los cuales se lleva a cabo” (Arrieta Palacios, 2016).

2.7.1 pH

El pH como la temperatura es uno de los parámetros de control más importantes, es un método donde se evalúa de manera rápida la alcalinidad o acidez del medio donde se desarrollan los microorganismos. Es “un indicador importante de la salud del reactor o digestor” (Hamilton, (s.f)), saber que el medio se encuentra ácido o alcalino permite inferir si el proceso se encuentra en las condiciones óptimas para su desarrollo o, si no está en las condiciones necesarias, tomar medidas para evitar la inactivación del proceso.

En cada una de las fases los microorganismos presentan una máxima actividad para un pH diferente, la medición del pH del proceso es una variable indicadora de su desarrollo.

Un pH óptimo está alrededor de la neutralidad (7), donde diferentes familias bacterianas de las cuatro etapas tienen un buen crecimiento (Aunque las acidogénicas son significativamente menos sensibles a valores extremos de pH (Arrieta Palacios, 2016). “Se puede operar en el intervalo 6.5 a 7.5” (Salamanca Tamayo, 2009).

“Si el pH desciende por debajo de 4.5-5 o aumenta por encima de 8, puede producirse una inhibición de la actividad microbiana que afecta a las bacterias fermentativas disminuyendo la velocidad de digestión” (Ferro & Sanz, 2012). De acuerdo Arrieta & Winston (2016) el proceso anaeróbico puede ser alterado por pequeños cambios en los niveles de pH que se encuentren fuera de cierto rango. Los organismos metanogénicos son los más afectados con estos cambios.

El pH influye en la cantidad de biogás generado, así como en su proporción, por lo tanto, un descenso debido a varias causas como una carga orgánica excesiva, amplias variaciones de temperatura, acumulación de costra en el digestor o la presencia de sustancias no deseables, afectará su generación. Es un factor que debe de ser supervisado y controlado.

El pH es también un parámetro que permite diagnosticar el proceso de digestión, pues muchos fenómenos tienen influencia sobre el mismo. Por ejemplo, una sobrecarga de materia

orgánica puede producir desequilibrios entre la producción y consumo de ácidos grasos volátiles, y consecuentemente provocar el descenso del pH y la acidificando el reactor.

En función de la alcalinidad del sustrato, este efecto será más o menos acusado. (PALAU ESTEVAN, 2016). En caso de que esto ocurra, una solución es detener la alimentación de digestor y dejar que las bacterias metanogénicas asimilen las AGV, o una solución más rápida sería la adicción de sustancias alcalinas como el bicarbonato de sodio (NaHCO_3) o de amonio (NaH_4HCO_3).

Los cambios en el pH no siempre son rápidos, muchas veces es demasiado lenta como para diagnosticar problemas en el funcionamiento, como más adelante se explica, un análisis óptimo para este parámetro es el FOS/TAC⁵.

En un proceso discontinuo o por cargas el pH experimenta al principio un descenso hasta un valor mínimo comprendido entre 4,5 y 6,0 según el tipo de alimento utilizado, iniciando a continuación un ascenso hasta los valores estables en donde se sitúa el óptimo (CARO & GARCÍA, 2015). A partir de que el pH se ha estabilizado en el intervalo óptimo se puede iniciar una alimentación continua o semicontinua con cargas periódicas, e ir incrementándola gradualmente hasta un valor máximo que no provoque un descenso del pH.

Un descenso del pH a valores inferiores a 6, genera un biogás muy pobre en metano (Gobierno de Chile, (PNUD), (FAO), & (GEF), 2011).

El descenso del pH se da cuando las bacterias metanogénicas no alcanzan a degradar los ácidos grasos volátiles (AGV), principalmente acetato, a medida que éstos son producidos por las bacterias acetogénicas, por lo que se van acumulando dentro del digestor. Las posibles causas de la alteración del pH son el aumento repentino de la carga orgánica, el aumento súbito de la temperatura o la presencia de sustancias tóxicas en la carga (Gobierno de Chile, (PNUD), (FAO), & (GEF), 2011).

⁵ Revisar análisis FOS/TAC 2.7.6

2.7.2 pH y FOS/TAC

Un ambiente de pH bajo inhibe el crecimiento de las bacterias metanogénicas, por lo que las condiciones de pH óptimas deben de ser alcalinas con un óptimo pH de 8, hallado por Saucedo (2007) en digestiones de residuos alimenticios a nivel laboratorio.

En la etapa de acidogénesis la creación de un exceso de ácidos grasos volátiles, acidifica el medio, inactivando el proceso y no logrando llegar la biodigestión a la etapa de metanogénesis.

La relación FOS/TAC es reconocida desde hace tiempo como valor guía para evaluar los procesos de fermentación. Permite detectar a tiempo los problemas del proceso, como la acidificación, y permite tomar medidas para evitar la inactivación de los microorganismos.

Esta estima el contenido de ácidos grasos volátiles (AGV, FOS), y la capacidad tampón (TAC) con un análisis individual de cada uno de estos. La medición del pH, en conjunto con el análisis FOS/TAC, indica condiciones óptimas en el medio para el pleno desarrollo de los microorganismos.

2.7.3 Temperatura

Las temperaturas para el crecimiento bacteriano en el reactor van desde los 10°C hasta los 60°C. “La temperatura de operación de los digestores es considerada como uno de los principales parámetros de diseño” (Arrieta Palacios, 2016), ya que afecta directamente la DA por ejemplo altas temperaturas conllevan a altas tasas de reacciones químicas y biológicas así como reacciones más rápidas, que disminuyen los TRH. La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos, que a su vez depende de la temperatura.

El rango de temperaturas puede dividirse en tres rangos:

Existen tres rangos de temperatura en los que los microorganismos anaerobios pueden digerir la MO.

Psicrofílico: En el cual la temperatura se encuentra por debajo de 25°C. TRH de más de 100 días (Gobierno de Chile, (PNUD), (FAO), & (GEF), 2011).

Mesofílico: Se encuentra entre 25 y 45 °C, Por lo general en digestores que operan dentro de los límites de temperatura mesofílica, la digestión óptima se obtiene a 35 °C, ya que como se observa en la Figura 4, la temperatura está íntimamente relacionada con el tiempo de residencia de la biomasa en el interior del biodigestor para completar su degradación, “con un aproximado de TRH de 30 a 60 días” (Gobierno de Chile, (PNUD), (FAO), & (GEF), 2011). “Existe una eliminación de 99% de patógenos a una temperatura de 37°C” (Couturier, 2002).

Termofílico: Donde la temperatura está entre 45-60°C, “de 10 a 15 días de TRH” (Gobierno de Chile, (PNUD), (FAO), & (GEF), 2011), en este rango se aseguran tasas superiores de destrucción de patógenos, con una eliminación del 99.99% de patógenos a 55°C (Couturier, 2002).

Las bacterias metanogénicas son más sensibles a cambios de temperatura (especialmente al descenso) que cualquier otro microorganismo dentro del digestor, como consecuencia que dicho grupo crece más lento que otros como las acetogénicas, incluso a bajas temperaturas. Es por esto que se afirma que el rango termofílico suele ser el más inestable y el que presenta mayores problemas de inhibición del proceso debido a la mayor toxicidad de determinados compuestos a elevadas temperaturas, como el nitrógeno amoniacal o los ácidos grasos de cadena larga (Gobierno de Chile, (PNUD), (FAO), & (GEF), 2011).

Este rango de temperatura conlleva a una mayor generación de biogás en menos tiempo, aunque este tipo de temperatura no es recomendada en plantas sencillas, debido a las complicaciones para mantener la temperatura debido a que no se genera calor en el proceso de DA, teniendo que hacer uso de consumo energético externo o con la misma quema del biogás.

Como se puede observar a mayores temperaturas se tienen TRH menores y por lo tanto volúmenes de reactores menores. Mientras mayores sean las temperaturas de trabajo, mayores serán las complicaciones que se tienen para el mantenimiento del biodigestor. Se puede entender a la temperatura como la energía requerida para DA.

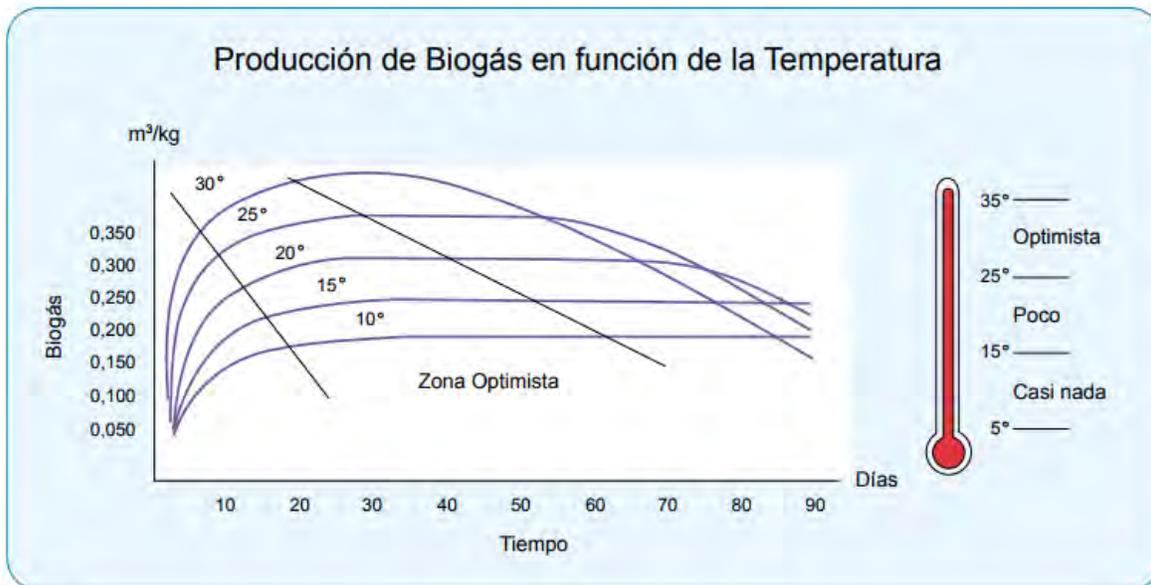


Figura 4. Diagrama del efecto de la temperatura y el tiempo de retención hidráulico con respecto a la producción de biogás.

Nota. Fuente (Gobierno de Chile, (PNUD), (FAO), & (GEF), 2011)

Por ello a mayores temperaturas, mayor eficiencia, pero aunado a ello los costos de instalación, construcción y mantenimiento, son mayores y se vuelven más complejos.

La sensibilidad a cambios de temperatura en el proceso depende de diversos factores, principalmente del grado de adaptación de las bacterias, del modo de operación y del tipo de biodigestor. En el rango termofílico, un incremento de temperatura brusco por lo general provoca un importante descenso en la producción de biogás, mientras que una baja puede suponer un descenso completamente reversible en la producción de biogás, o puede no mostrar diferencias (Salamanca Tamayo, 2009).

Es necesario que sea supervisada continuamente para detectar los cambios de temperatura que no deben de ser de $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ya que con esos cambios bruscos la población bacteriana se perdería.

Algunos aspectos físico-químicos también se ven influenciados por la temperatura de operación, Foster Carneiro (2005) identifica los siguientes:

Viscosidad: Con el aumento de la temperatura la viscosidad del medio disminuye, favoreciendo la sedimentabilidad de los sólidos y menores requerimientos energéticos para la mezcla (agitación).

Equilibrio químico: El aumento de la temperatura favorece la disolución de elevadas cantidades de compuestos, principalmente de sales. Además, favorece la disociación de distintos compuestos como por ejemplo los ácidos grasos volátiles y el amonio, aumentando el efecto tóxico del amoníaco.

Solubilidad⁶ de los gases: El aumento de temperatura disminuye la solubilidad de los gases (H_2S , H_2), favoreciéndose la transferencia líquido-gas y, por lo tanto, desapareciendo más rápidamente del medio acuoso. Esto supone un efecto positivo, dada la toxicidad sobre el crecimiento de los microorganismos anaerobios de los citados compuestos.

Al disminuir la solubilidad, más gases presentes en la solución acuosa (aquella que está experimentando el proceso de digestión anaeróbica) serán liberados, por lo que el biogás será más rico en éstos.

En la **Tabla 1** se presentan algunos cambios en la solubilidad de los gases que componen el biogás. De ésta se puede deducir que al pasar del rango mesofílico ($35^{\circ}C$) al termofílico ($50^{\circ}C$) es, por una parte, beneficioso porque aumentará el volumen de biogás producido (más % de CH_4 y CO_2), pero también disminuye su calidad por la presencia de gases no deseables como el CO_2 y H_2S , debido a que su solubilidad disminuye en mayor grado con respecto a la del metano (Arrieta Palacios, 2016) .

⁶ Cualquier gas es soluble en cualquier líquido en alguna proporción. La velocidad a la que se disuelva, depende de factores como la temperatura, presión y la superficie del área de la interface gas-líquido. Una medida de la solubilidad de un gas en un líquido a una temperatura y presión fija es el coeficiente de Bunsen.

Tabla 6. Relación entre la temperatura y la solubilidad en agua de algunos gases

Gas	Temperatura (°C)	Solubilidad (mol/l agua)	Cambio en solubilidad 50°C-35°C
H ₂	35	0.749	3.3%
	50	7.725	
CO ₂	35	26.6	36%
	50	19.6	
H ₂ S	35	82.2	31%
	50	62.8	
CH ₄	35	1.14	19%
	50	0.962	

Nota 3. Fuente: (Al Seadi, y otros, 2008)

La temperatura afecta a la velocidad global del proceso, la actividad de los microorganismos, la constante de equilibrio, la solubilidad de los gases y al tipo de microorganismos presente en el medio (Foster Carneiro, 2005).

Como cita Foster Carneiro (2005) la temperatura puede controlar el proceso de digestión anaerobia, ya que por una parte selecciona los microorganismos preponderantes en el mismo y, por otra, controla la velocidad de crecimiento de los mismos, por lo que pequeñas oscilaciones del orden de 2°C, pueden ocasionar el desequilibrio de las velocidades de producción y de utilización de un determinado producto, conduciendo a grandes distorsiones del proceso.

Los principales parámetros de eliminación de agentes patógenos⁷ son los tiempos y la temperatura (Couturier, 2002).

Existen diferencias respecto a los rangos de temperatura, pudiéndose encontrar resultados muy variables de eliminación de patógenos en los diferentes rangos. También se han encontrado diferencias en la eficacia en función del TRH, para lo cual se está adoptando el concepto de Tiempo de Retención Mínima Garantizada (TRMG), que es más representativa que el TRH en términos de reducción de agentes patógenos (Couturier, 2002).

⁷ Los estiércoles animales contienen agentes patógenos que causan enfermedades como la Salmonella, E. coli, Cryptosporidium, y coniformes fecales, que en excretas humanas pueden estar hasta 100 veces más concentrados.

2.7.4 Tiempo de retención hidráulico (TRH)

Es el tiempo de permanencia de la biomasa en el interior del reactor, hasta su descarga. Si este es demasiado corto las bacterias no tienen tiempo de formarse y crecer.

Se requieren por lo menos 10 días como mínimo para la producción de bacterias.

Teniendo alimento, espacio y sin depredación, todas las comunidades de organismos, como los metanógenos, crecen en un patrón similar al que se muestra en la Figura 5.

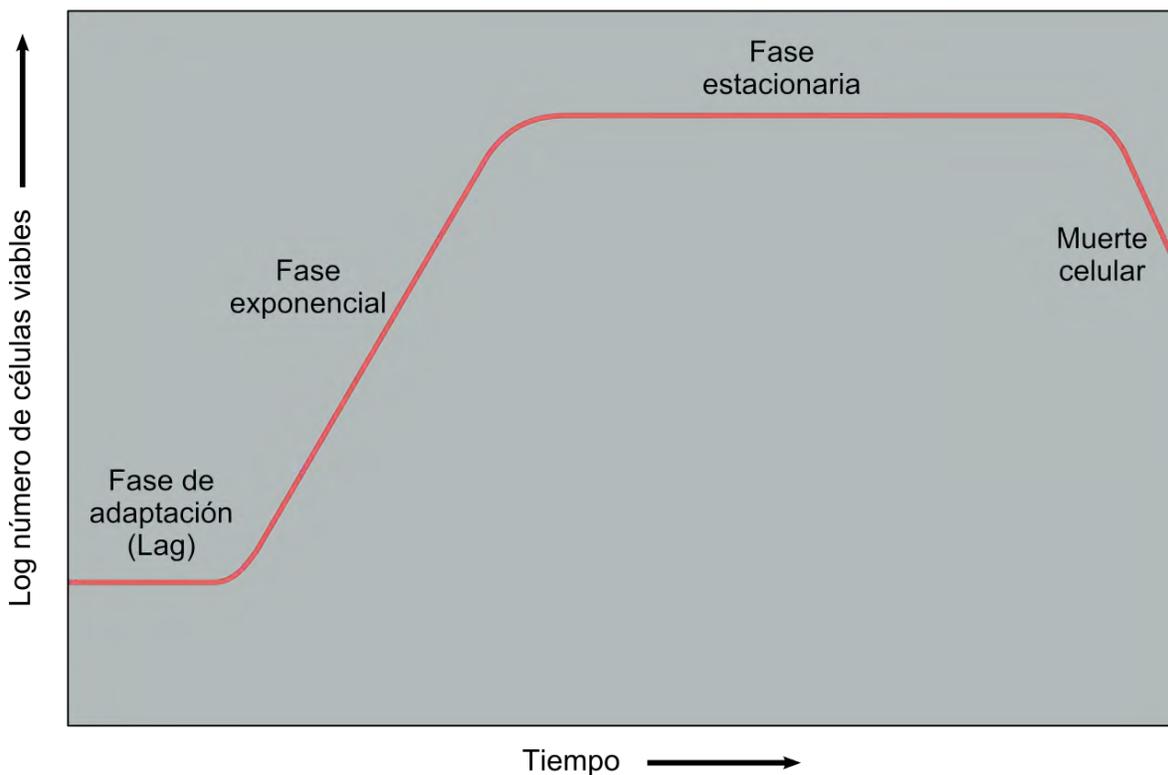


Figura 5. Curva de crecimiento bacteriano

Fuente: Recuperado de http://laenciclopediagalactica.info/wp-content/uploads/2016/11/Curva_de_crecimiento_svg.svg.png

El tiempo de retraso (*lag time* en inglés) se produce cuando los organismos se están aclimatando a su entorno. Durante la fase de crecimiento exponencial, la comida no es un limitante y la población se expande rápidamente. Durante la fase estacionaria, la comunidad de microorganismos ha llegado a los límites de su fuente de alimento. En este punto el número de células se mantiene casi constante, lo que no quiere decir necesariamente que la reproducción se ha detenido, sino que la tasa de muerte se aproxima a la tasa de reproducción.

“La belleza de la digestión anaeróbica es que es obra de una comunidad mixta de organismos. El producto tóxico final de una comunidad es el suministro de alimentos de otro. Las bacterias formadoras de ácido consumen los azúcares simples que podrían inhibir las comunidades hidrolíticas”. Los metanógenos utilizan los ácidos formados durante la fermentación para producir CH_4 y CO_2 (Hamilton, (s.f)).

2.7.5 Agitación

Es importante mantener una homogeneidad adecuada de los **fangos**, esta tiene diversos propósitos como resume Everardo (2013):

- Une el influente con la población bacteriana, elimina metabolitos producidos por las bacterias metanogénicas al favorecer la salida de gases, proporcionando una densidad uniforme de la población bacteriana.
- Evita la formación de espacios muertos que disminuirán el volumen efectivo del reactor y la formación de caminos preferenciales en función de la hidráulica del sistema.
- Evita gradientes de temperatura pronunciada, manteniendo una temperatura uniforme en todo el reactor.
- Favorece la transferencia de gases, que pueden ser atrapados en forma de burbujas en el sustrato.
- Evita la formación de espumas o la sedimentación en el reactor.

Arrieta (2016) concluye que para que la agitación del digestor sea beneficiosa posiblemente esta debe realizarse constantemente, o más de una vez al día y por largos periodo, después de un análisis del estudio de Kounnavongsa y Preston en el 2009, donde se estudió el efecto de la agitación con cuerda de digestores taiwaneses de 2 m de longitud y 0.6 m de diámetro y un TRH de 30 días frecuencia, en la que se encontró que la agitación no presenta ventajas en la producción de biogás.

Lo que da a entender que la agitación manual no es adecuada, pues demanda gran cantidad de tiempo y energía para que llegue a ser eficiente.

2.7.6 Nutrientes

La producción de biogás (manteniendo las mismas condiciones de funcionamiento del digestor) depende, principalmente, de la composición del sustrato, es decir, del tipo de biomasa con la que se alimenta a éste (Arrieta Palacios, 2016).

Para que exista actividad y crecimiento bacteriano, se requiere el aporte de nutrientes a bacterias y células que se encuentran en el interior del reactor. Entre los nutrientes se encuentran carbono, nitrógeno, fósforo, azufre y algunas sales minerales, que deben estar presentes en cantidades suficientes en los desechos orgánicos utilizados como sustrato (Salamanca Tamayo, 2009).

“El carbono (en forma de carbohidratos) y el nitrógeno (como proteínas, amoníaco, etc.), son el principal alimento para las bacterias anaeróbicas” (Salamanca Tamayo, 2009).

De acuerdo a (Gobierno de Chile, (PNUD), (FAO), & (GEF), 2011) se afirma:

“El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno se utiliza para la formación de nuevas células.

Estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango de 30:1 hasta 20:1”.

De manera general, las biomásas con mayor proporción de carbono contenido (relación C/N mayor a 35), como los materiales celulósicos, son más resistentes a la degradación y demandan mayores tiempos de permanencia dentro del digestor para completar su digestión, por otro lado, el período de producción de biogás es más prolongado.

Los sustratos que presentan relaciones C/N menores a ocho harán que la actividad bacteriana durante su digestión anaeróbica se inhiba debido a la formación excesiva de amonio durante el proceso (Gobierno de Chile, (PNUD), (FAO), & (GEF), 2011).

Tabla 7. Valores promedios aproximados de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos disponibles en el medio rural.

Residuos	% C	% N	C:N
Residuos animales			
Bovinos	30	1.30	25:1
Equinos	40	0.80	50:1
Ovinos	35	1.0	35:1
Porcinos	25	1.50	16:1
Caprinos	40	1.0	40:1
Conejos	35	1.50	23:1
Gallinas	35	1.50	23:1
Patos	38	0.80	47:1
Pavos	35	0.70	50:1
Excretas humanas	2.5	0.85	3:1
Residuos vegetales			
Paja de trigo	46	0.53	87:1
Paja cebada	58	0.64	90:1
Paja arroz	42	0.63	67:1
Paja avena	29	0.53	55:1
Rastrojos maíz	40	0.75	53:1
Leguminosas	38	1.50	28:1
Hortalizas	30	1.80	17:1
Tubérculos	36	1.50	20:1
Hojas secas	41	1.00	41:1
Aserrín	44	0.06	730:1

Nota 4. Fuente (Gobierno de Chile, (PNUD), (FAO), & (GEF), 2011)

2.7.7 Promotores e inhibidores

Los promotores son materiales que ayudan a la degradación de la materia orgánica y a la vez influyen positivamente en la producción del biogás. Por lo contrario los efectos inhibidores pueden ser razones operativas o de mantenimiento o, pueden ser ocasionados por sustancias inhibidoras la cuales se consideran cuando ésta “causa un cambio adverso en la población bacteriana o se inhibe su crecimiento, por lo que se produce un descenso en la tasa (en estado estacionario) de producción de gas metano y la acumulación de ácidos orgánicos (Cheng, Cheng, & Creamer, 2008).

Pueden provenir del exterior del digester en la mezcla de la biomasa y agua con la que se le alimenta, tales como: amoníaco, metales pesados, cianuro, fenoles, desinfectantes, etc.; o también producirse internamente como subproductos de la actividad metabólica de las bacterias, tales como: hidrógeno, sulfuro y ácido sulfhídrico, amoníaco y ácidos grasos volátiles” (Arrieta Palacios, 2016).

Cuando se está trabajando con estiércol animal se deben tener presente los siguientes cuatro componentes (Hamilton, (s.f)):

- **Antibióticos:** Los antibióticos son comúnmente añadidos a las dietas de los animales para mejorar su producción o para controlar enfermedades. Éstos pueden alterar las comunidades de microorganismos, aunque su efecto se puede minimizar dándole el debido tiempo a las bacterias para que se aclimatén.

- **Amoníaco:** El ión amonio (NH_4^+) y el amoníaco gaseoso (NH_3) pueden ser tóxicos para las bacterias, especialmente este último a altos pH, por ejemplo, cuando se está tratando estiércol de pollo.

- **Sulfato y sulfuro:** La presencia de sulfatos (SO_4^-) puede reducir la producción de CH_4 . El sulfuro (S^-), último producto de la reducción del sulfato, puede ser muy tóxico para la digestión anaeróbica, dependiendo de los niveles de pH.

Otro factor que puede ser desfavorecedor en la DA es la concentración de la biomasa, en la que el exceso afecta el proceso, como más adelante se explica en los sólidos totales y volátiles.

La producción de biogás depende de la proporción de grasas, proteínas, carbohidratos y otros nutrientes que contenga la biomasa.

2.8 Digestores anaerobios

El proceso de degradación anaerobia es posible replicarlo, colocando materia orgánica en un depósito herméticamente cerrado, que con el paso del tiempo obtendrá las condiciones necesarias para el desarrollo de microorganismos encargados de la degradación de la materia orgánica. Estos depósitos son llamados digestores, biodigestores o reactores anaerobios, al que le son acondicionados diferentes dispositivos para la recolección del biogás generado al igual que su tratamiento.

Existe una gran variedad de biodigestores, por lo que se puede hacer una clasificación de acuerdo a diferentes criterios como: modo de operación, llenado y vaciado, volumen, número de tanques de proceso, orientación de los mismos o los sistemas de movilización de biomasa (Agencia Andaluza de la Energía. Consejería de economía, innovación y ciencia, 2011). En la Tabla 8 se muestra un tipo de clasificación de acuerdo a las características de trabajo de los biodigestores.

Tabla 8. Clasificación del proceso acorde a las características de trabajo.

Criterio	Características distintivas
Materia seca contenida en el sustrato	Digestión húmeda
	Digestión seca
Tipo de alimentación	Intermitente
	Semi continuo
	Continuo
Temperatura de trabajo	Psicrofílico
	Mesofílico
	Termofílico

Nota 5. Fuente: Adaptado de (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 2010)

Las características de diseño debe ser tal que, “asegure la homogeneidad entre los componentes del sistema y condiciones óptimas necesarias para el crecimiento microbiano y la obtención del producto deseado” (García Rodríguez & Gómez Franco, 2016).

Existen dos tipos de biodigestores principalmente según se dispongan o no de sistemas de retención de biomasa (García Rodríguez & Gómez Franco, 2016).

Antes de la construcción de una planta de biogás se deben analizar en una prueba de laboratorio y/o en una planta piloto parámetros como (Deublein & Steinhauser, 2008):

- Temperatura.
- Valor de pH y potencial redox.
- Materia seca y contenido de agua.
- Contenido de materia orgánica seca (pérdida por ignición o incineración), es decir la cantidad de SV.
- Degradabilidad del contenido total de ácidos orgánicos e inhibidores.

2.8.1 Reactores sin retención de biomasa

2.8.1.1 Reactor de mezcla completa (RMC) sin recirculación.

En la Figura 6 se observa el RMC que consiste básicamente en un digestor con un sistema de agitación (García Rodríguez & Gómez Franco, 2016), que mantiene una distribución uniforme de concentraciones, tanto de sustrato como de microorganismos.

Ésta puede ser mecánica (agitador de hélice o palas, de eje vertical u horizontal) o neumática (recirculación de biogás a presión), y se realiza a baja velocidad. Esta tipología de reactor no ofrece problemas de diseño y es el más utilizado para residuos.

Comparativamente a otros reactores, el tiempo de retención necesario es alto⁸, debido a que la concentración de cualquier especie, que se mantiene en el reactor en régimen estacionario, es la misma que la que se pretende en el efluente (Gobierno de Chile, (PNUD), (FAO), & (GEF), 2011).

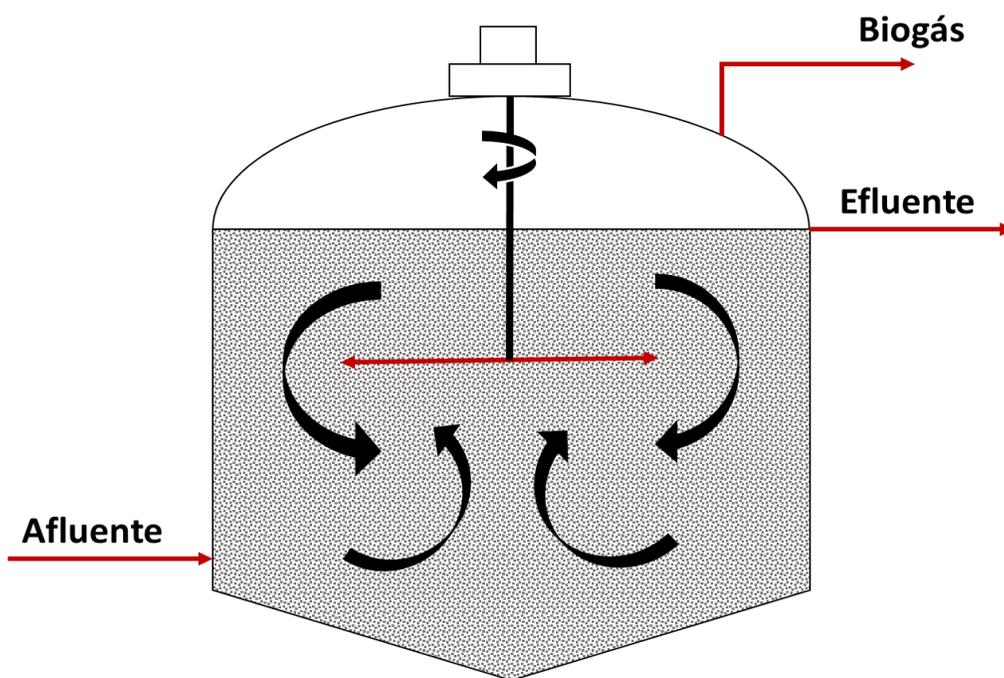


Figura 6. Reactor de mezcla completa (RMC) sin recirculación.

⁸Si la velocidad de reacción depende de la concentración, como es el caso de los procesos biológicos, la velocidad será baja, y la forma de compensarla es aumentando el tiempo de reacción.

2.8.1.2 Reactor de mezcla completa (RMC) con recirculación

También llamado reactor anaerobio de contacto, “sería equivalente al sistema de lodos activos aerobios para el tratamiento de aguas residuales” (Gobierno de Chile, (PNUD), (FAO), & (GEF), 2011). En él se presenta una recirculación por lo que es posible conseguir tiempos de retención hidráulica más bajos comparados con un reactor simple de mezcla completa (García Rodríguez & Gómez Franco, 2016).

Esto es a costa de aumentar el tiempo de retención de los microorganismos, gracias a su confinamiento en el sistema, que como se observa en la Figura 7 se logra mediante la separación en el decantador y re-circulación.

Debido a la necesaria separación de microorganismos en el decantador, este sistema sólo es aplicable a aguas residuales de alta carga orgánica (aguas residuales de azucareras, cerveceras, etc.), para las que sea posible una separación de fases líquido-sólido, con la fracción sólida consistente básicamente en flóculos biológicos. Antes del decantador se debe disponer de un sistema de desgasificación, sin el cual la decantación se puede ver impedida (Gobierno de Chile, (PNUD), (FAO), & (GEF), 2011).

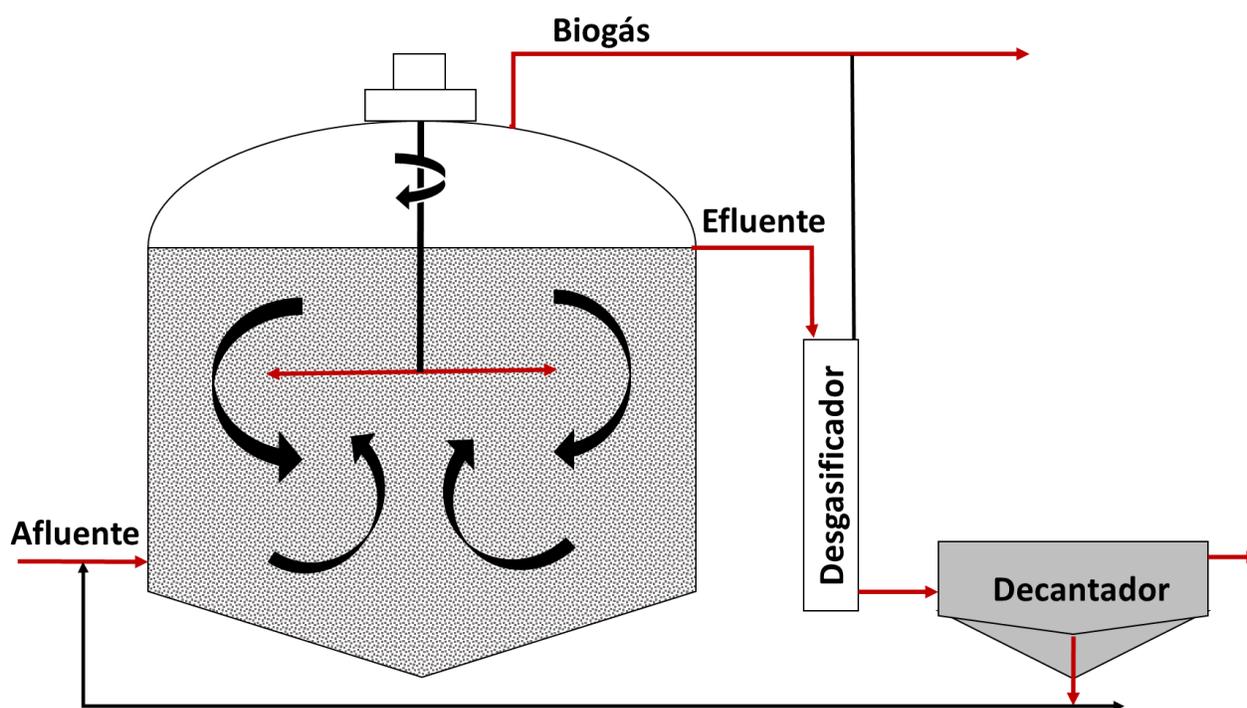


Figura 7. Reactor de mezcla completa (RMC) con recirculación

2.8.1.3 Digestor de flujo pistón

Este se observa en la Figura 8 en donde el flujo se logra mediante el desplazamiento horizontal de la carga orgánica, mezclándose mínimamente.

En este sentido las secciones presentan estados fermentativos diferentes, debido a esto presenta problemas de homogeneidad. “También presenta tiempos de retención más bajos que el equivalente a una mezcla completa, lo que implica menores volúmenes en el reactor, reduciendo la inversión, por otra parte presenta una complejidad en la operación, reduciendo así su implementación en volúmenes pequeños de reacción” (García Rodríguez & Gómez Franco, 2016).

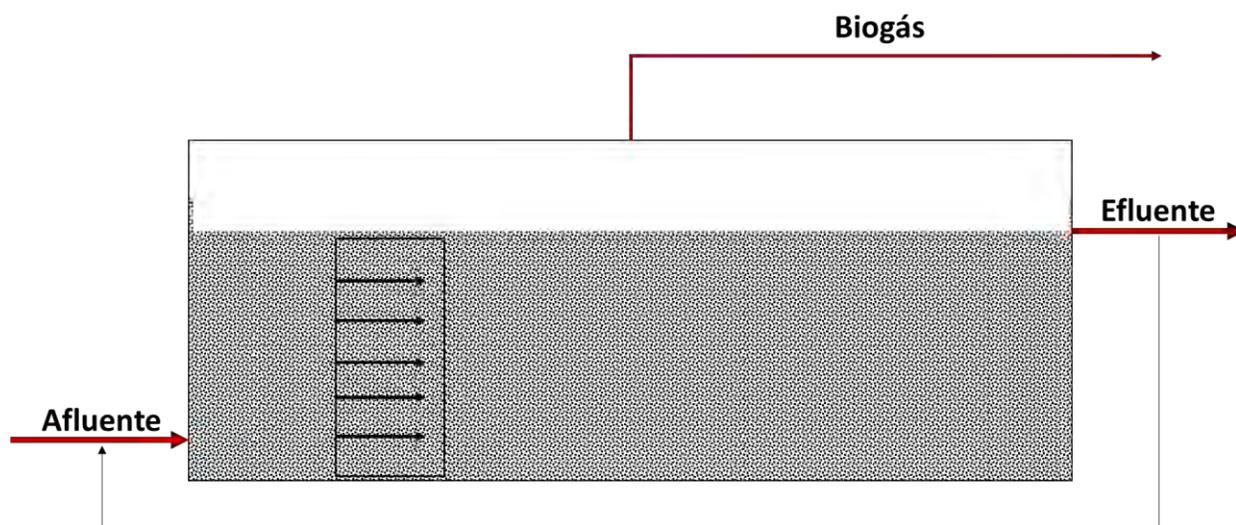


Figura 8. Digestor de flujo pistón

2.8.2 Reactores con retención de biomasa

2.8.2.1 Lecho fijo

Este tipo de reactores son apropiados para tratar biomasa con elevada materia en suspensión, como en el caso del tratamiento de aguas residuales, para este reactor el flujo puede ser ascendente o descendente y también presentan un manto de material inerte en donde gran parte de los microorganismos quedan retenidos en el manto y el flujo del líquido por este manto genera la mezcla afluyente-biomasa.

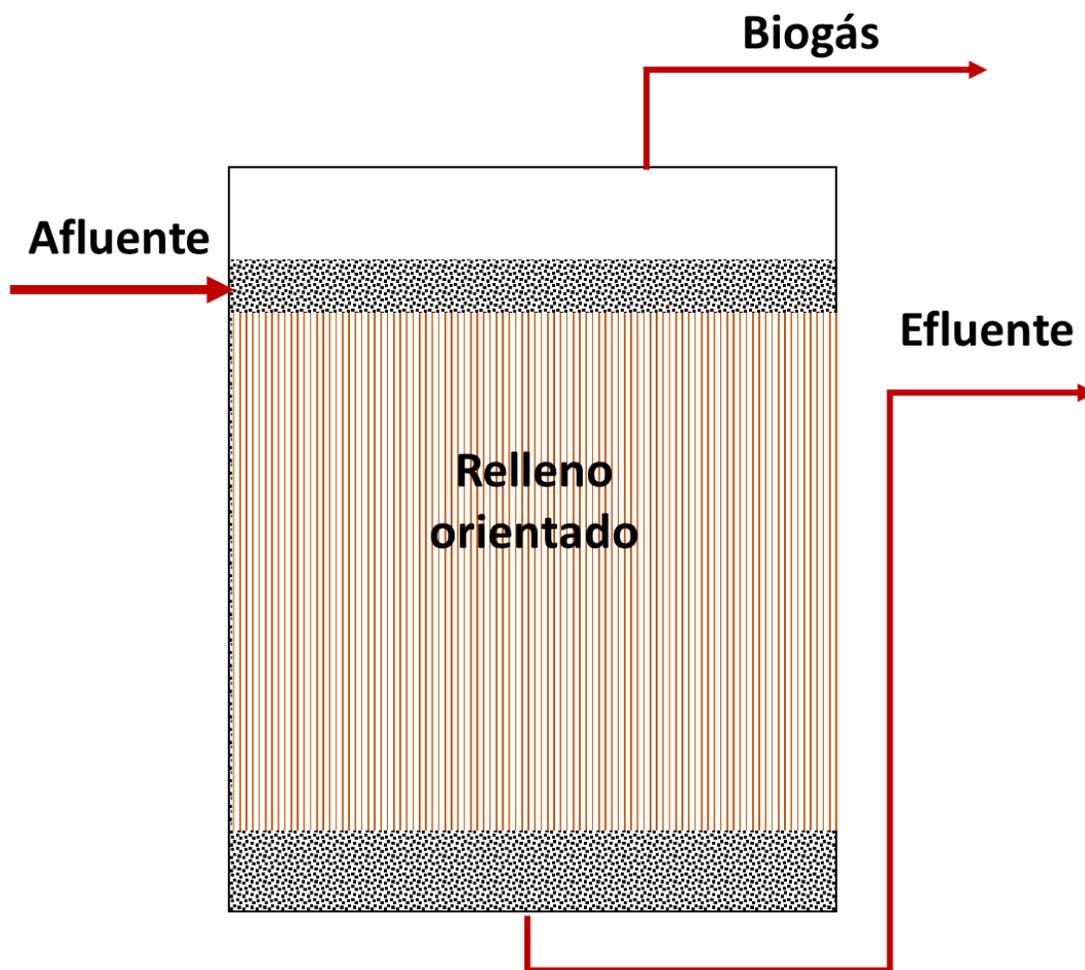


Figura 9. Reactor de lecho fijo.

2.8.2.2 Reactor de filtro anaerobio

“Dependiendo de la forma de alimentación, un filtro anaerobio puede clasificarse de manera ascendente (FAA) y descendente (FAD), así como también de alimentación múltiple (FAM)” (Gobierno de Chile, (PNUD), (FAO), & (GEF), 2011).

2.8.2.3 Filtro anaerobio de flujo ascendente

El reactor de flujo ascendente corresponde a un tipo de reactor anaeróbico tubular que opera en régimen continuo. Como se observa en la Figura 10 en esta, la alimentación ingresa por la parte inferior y atraviesa todo el perfil longitudinal a través de un lecho de piedras, plástico u otro material rígido no biodegradable, para finalmente salir por la parte superior del reactor.

Originalmente, las piedras se utilizaban como medio de relleno en filtros anaeróbicos pero debido al bajo volumen de poros (40 – 50%), se producían severos problemas de obstrucción. En la actualidad, el medio que se usa con más frecuencia es el plástico sintético o cerámicas con diferentes configuraciones.

El volumen poroso del plástico se encuentra entre 80 y 95% y proporciona una elevada área superficial específica, típicamente de 100 m²/m³ o mayor, que favorece el crecimiento de la biopelícula⁹. En estos reactores los microorganismos se agrupan formando gránulos. Estos densos agregados poseen unas buenas cualidades de sedimentación y no son susceptibles al lavado del sistema bajo condiciones prácticas del reactor. La retención de lodo activo, en forma de gránulos o flóculos, permite la realización de un buen tratamiento incluso a altas tasas de cargas orgánicas.

La turbulencia natural causada por el propio caudal del afluente y de la producción de biogás provoca el buen contacto entre agua residual y lodo en el sistema.

En estos los sistemas pueden aplicarse mayores cargas orgánicas que en los procesos aeróbicos. Además, se requiere un menor volumen de reacción y de espacio, y al mismo tiempo, se produce una gran cantidad de biogás, y por tanto de energía.

⁹ Biopelícula, biofilm, tapiz bacteriano o tapete microbiano es un ecosistema microbiano organizado, conformado por uno o varios microorganismos asociados a una superficie viva o inerte, con características funcionales y estructuras complejas.

Por otra parte, la elevada concentración de biomasa de este sistema, lo hace más tolerante a la presencia de tóxicos.

Los gases, producidos bajo condiciones anaerobias provoca la recirculación interna, lo que ayuda en la formación y mantenimiento de las partículas biológicas, sobre las cuales algunas partículas de gas se adhieren. El gas libre y el gas adherido a gránulos se retienen en el colector de gas en la parte alta del reactor. El líquido que ha pasado a través del manto contiene algunos sólidos residuales y gránulos biológicos que pasan a través del sedimentador donde los sólidos se separan del futuro efluente. Los sólidos retornan por tanto al caer a través del sistema de baffle en la parte alta del manto de lodos. (Gobierno de Chile, (PNUD), (FAO), & (GEF), 2011).

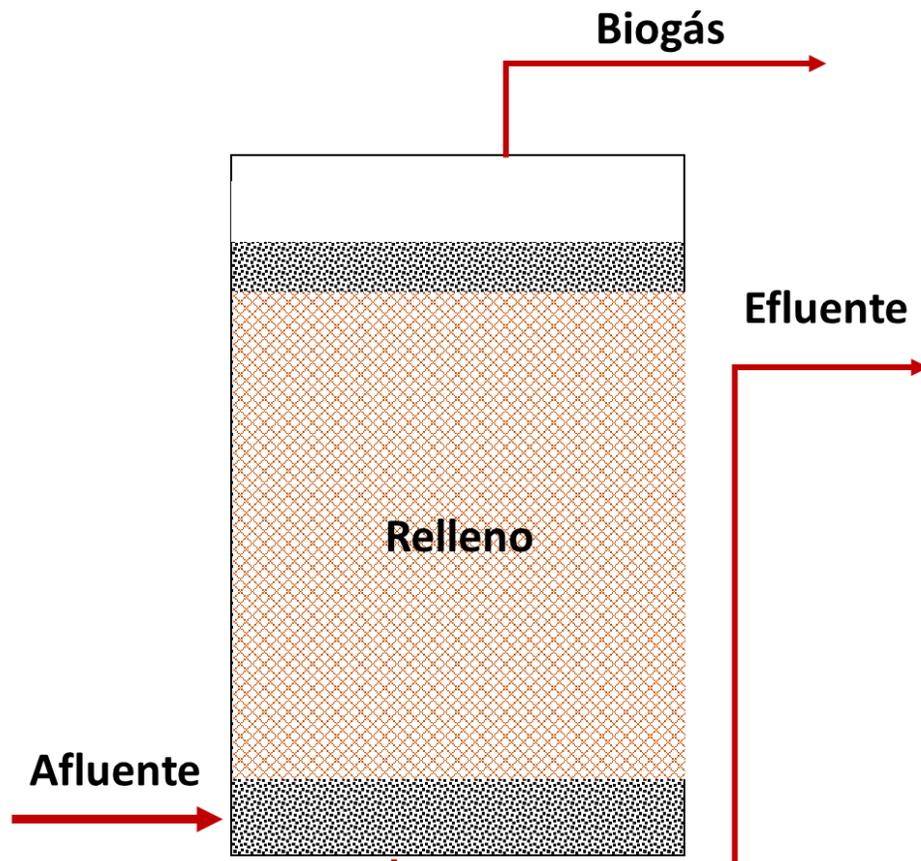


Figura 10. Filtro anaerobio de flujo ascendente

2.8.2.4 Filtro anaerobio de flujo descendente

En el reactor de flujo descendente la biomasa está verdaderamente adherida al medio, y “en este sistema la alimentación se lleva a cabo por diversos puntos y tiene una utilización efectiva de todo el lecho del filtro con un volumen de trabajo de 87%, comparado con el 65% de un punto de alimentación simple” (García Rodríguez & Gómez Franco, 2016).

La biomasa no adherida es lavada del reactor. En este proceso el soporte bacteriano es acoplado al reactor formando canales verticales o tubos. La alimentación baña al relleno desde arriba hacia debajo de la columna del reactor, para su eliminación o bien para su recirculación.

Al operar el reactor con un flujo descendente, parte de la biomasa adherida se arrastra, debido a las fuerzas de fricción del líquido, lo que evita problemas de obstrucción de los canales, y permite además la utilización de la contracorriente entre la fase líquida y gaseosa.

La contracorriente gas-líquido aumenta la mezcla y la homogenización del sistema impidiendo concentraciones localizadas de ácidos grasos volátiles (AGV) y otros inhibidores en determinadas zonas del reactor. La combinación de flujo hacia abajo y de los canales verticales minimiza la acumulación de sólidos en suspensión en el reactor. Por lo tanto, estos reactores son capaces de tratar compuestos solubles e insolubles.

La pérdida de sólidos en suspensión incluye la pérdida de biomasa activa en suspensión. De este modo, el TRS es igual al TRH. Cuando existen TRH inferiores a uno o dos días, las metano bacterias no pueden crecer en suspensión, mientras que las bacterias acidogénicas tienen tiempo suficiente para crecer en el líquido del reactor (Gobierno de Chile, (PNUD), (FAO), & (GEF), 2011).

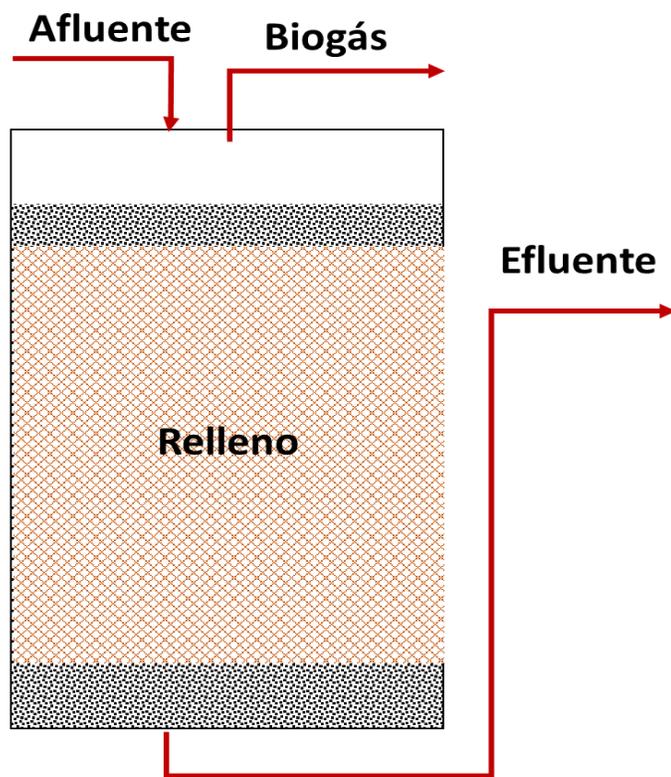


Figura 11. Filtro anaerobio de flujo descendente

2.8.2.5 Filtro anaerobio alimentación múltiple.

En estos sistemas, la alimentación al reactor entra por diversos puntos a través del filtro, Figura 12 . Permitiendo una distribución homogénea de la biomasa a través del lecho, a diferencia de la estratificación de los grupos hidrolíticos, acidogénicos y metanogénicos en un sistema de alimentación simple.

Dentro del reactor se mantiene un régimen de mezcla completa lo cual previene obstrucciones y la acumulación de ácidos grasos volátiles. Existe una concentración uniforme del sustrato en todo el reactor, lo cual previene el crecimiento desmedido de biomasa en el fondo del reactor, minimizando así la obstrucción del lecho del filtro.

La utilización efectiva de todo el lecho del filtro con un volumen de trabajo de 87%, comparado con el 65% de un punto de alimentación simple.

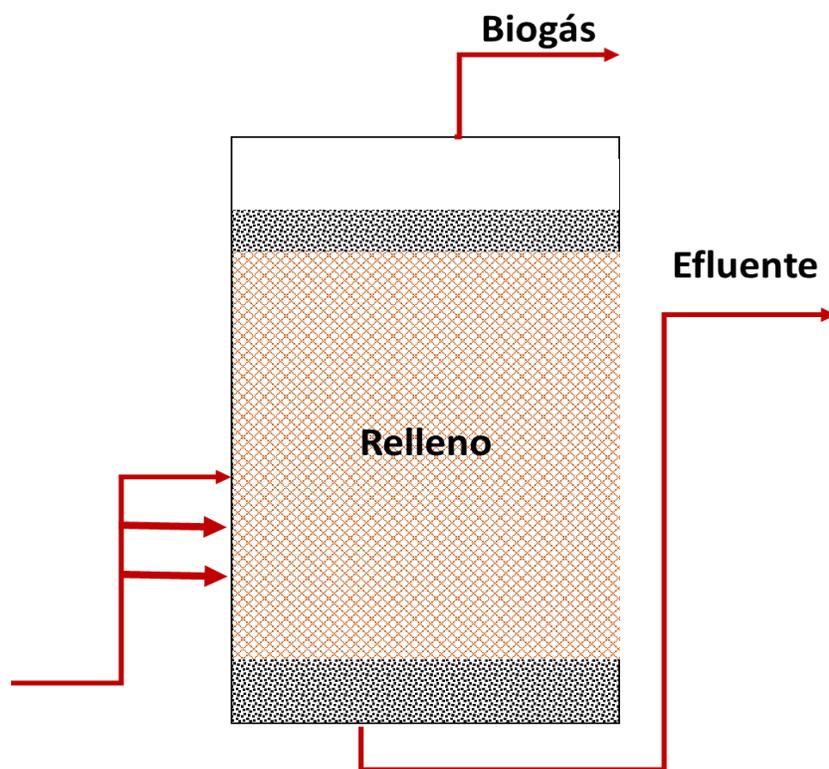


Figura 12. Filtro anaerobio alimentación múltiple.

2.8.2.6 Reactor de lecho de lodo granular (UASB)

“Es un sistema trifásico de alta carga que opera como un sistema de crecimiento en suspensión, su funcionamiento consiste en una columna abierta, a través de la cual el líquido residual se pasa a una baja velocidad ascensional”, Cuenta con un separador de gases, sólido-liquido, en la parte superior del reactor para retener lodo, también cuenta con un sistema de auto mezclado mediante el movimiento ascendente de las burbujas de gas y del flujo del líquido.

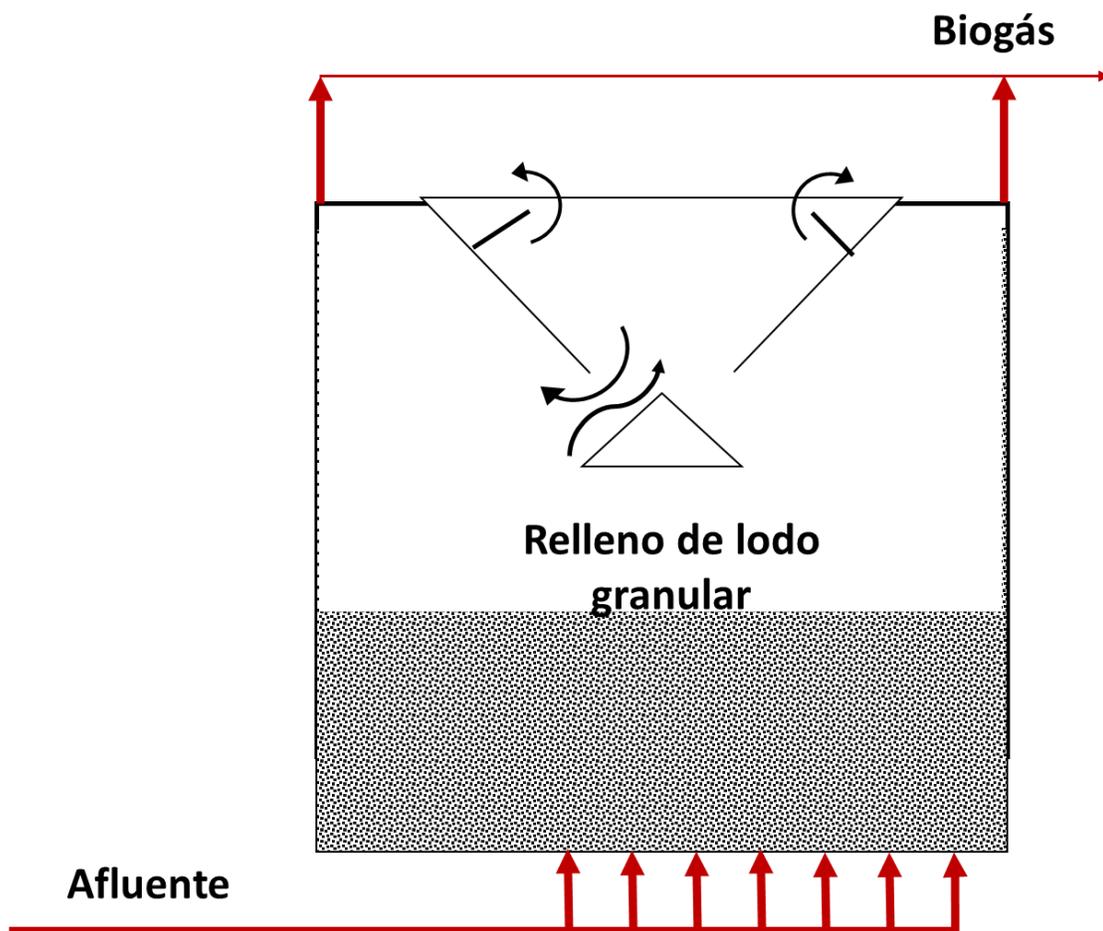


Figura 13. Reactor de lecho de lodo granular (UASB)

2.8.2.7 Reactor de lecho fluidizado (RLF).

En este sistema las bacterias se encuentran fijadas, formando una biopelícula sobre pequeñas partículas de material mediante el flujo ascendente del fluido. Para mantener el caudal adecuado, que permita la expansión y fluidización del lecho, se recurre a la recirculación.

El RLF es un reactor de película fija, puesto que la biomasa suspendida tiende a lavarse del sistema debido a la alta velocidad del flujo ascendente. La expansión del lecho es del orden de 25 al 30% del volumen del lecho sedimentado en el RLF. Este requiere una velocidad de flujo ascendente mucho mayor de 10-25 m/hr. Los soportes se sostienen completamente por la velocidad del flujo ascendente y por ende pueden moverse libremente en el lecho. El RLF no presenta problemas de obstrucción y proporciona una mejor difusión del sustrato dentro de la biopelícula.

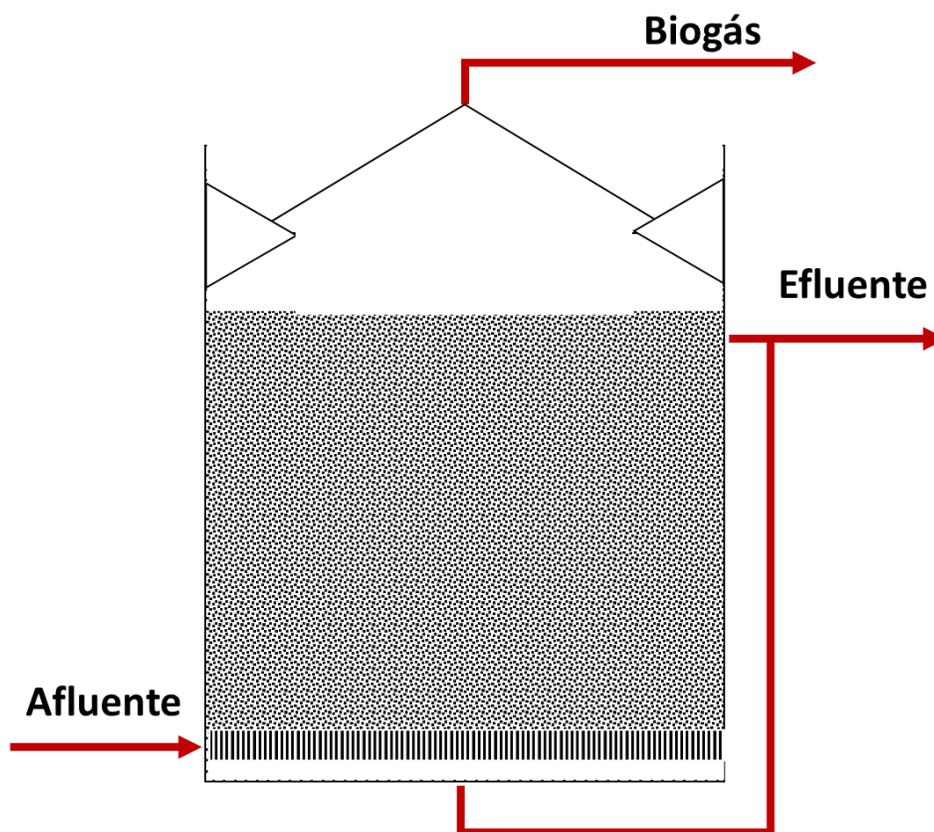


Figura 14. Reactor de lecho fluidizado (RLF).

2.8.2.8 Modelos tipo batch por lotes

Estos tipos de digestores se caracterizan principalmente porque el sustrato se carga o alimenta una sola vez, es utilizado para degradar materias primas sólidas, como restos vegetales y desechos sólidos orgánicos. El rendimiento volumétrico de gas para este tipo de digestores es superior a cualquier digestor continuo debido al contenido de sólidos totales, así mismo tiene una producción eficiente y económica del metano.

Otra clasificación es la que se explica a continuación.

2.8.2.9 Sistema mono etapa

En este sistema se lleva a cabo las cuatro fases del proceso de digestión anaerobia simultáneamente en un único reactor.

- **Características:** Este sistema es considerado “tradicional” de realizar el proceso de digestión anaerobia, debido a que las tres fases correspondientes a la degradación de materia orgánica se llevan a cabo en el mismo equipo. Funciona con un reactor en el cual se mantiene una mezcla homogénea del sustrato- microorganismos mediante un sistema de agitación, el cual puede ser mecánico o neumático (recirculación de biogás a presión).

- **Ventajas:** Este tipo de reactor y sistema no presenta problemas en el diseño y es implementado frecuentemente para la degradación de residuos.

- **Limitaciones:** A diferencia de otros reactores el tiempo de retención necesario para el proceso tiene que ser alto según lo evaluado en el informe del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía “la concentración de cualquier especie, que se mantiene en el reactor en régimen estacionario, es la misma que la que se pretende en el efluente”. También otra condición importante es la estabilidad del proceso, ya que este está limitado por el pH, debido a que estos sistemas suelen presentar acumulación de ácido propiónico, causando la disminución del pH, y de esta manera siendo relevante en la fase metanogénica, esta se debe llevar a cabo en un pH entre 6.8 y 7.2, si no se cumple estas condiciones se inhibe esta fase.

2.8.2.10 Sistema multietapa.

En este sistema se dividen las fases presentes en el proceso.

- Características: A través del tiempo se ha venido intensificando la innovación en la tecnología implementada en los sistemas anaerobios, presentando una separación de las fases representativas de este proceso, se realiza La separación de la fase metanogénica de las fases de hidrólisis y acidificación ya que permite un manejo por aparte de los principales grupos microbianos involucrados de tal manera que facilita la operación del sistema y confiere una mayor estabilidad al proceso.

- Ventajas: “Si la primera etapa consiste en un reactor discontinuo, el líquido tratado en la segunda es el obtenido por percolación en la primera una vez recirculado el efluente de la segunda. Este sistema permite mantener fácilmente la temperatura en el reactor discontinuo, controlando la temperatura del efluente del segundo reactor”

. La principal aplicación de este tipo de sistemas de biodigestión se encuentra en el aprovechamiento de residuos de frutas, verduras, ganado vacuno, entre otros.

- Limitaciones: El modo de funcionamiento está dado por un primer reactor con elevado tiempo de retención, en el cual se favorece la hidrólisis, debido a que es el tiempo medio de permanencia del influente en el reactor, sometido a la acción de los microorganismos. Después pasa a un segundo reactor en el cual se tiene un de bajo tiempo de retención que digiere la materia orgánica disuelta y los ácidos producidos en la primera etapa. En cuanto a las condiciones de operación son más fáciles de controlar a comparación de un proceso mono etapa, debido a que se puede realizar un seguimiento más detallado en cada fase, este parámetro permite llevar a cabo el proceso eficientemente.

2.8.3 Digestores del medio rural

Los más pequeños se han utilizado a lo largo de la historia de la Humanidad, son los digestores del biogás doméstico. Se caracterizan por su bajo costo de construcción y operación simple, “de baja “velocidad” por lo general utilizada en zonas rurales y son típicamente diseñados para manejar estiércol animal” (Tauseef, Premalatha, Abbasi, & Abassi, 2013).

De acuerdo a Gobierno de Chile, PNUD, FAO, & GEF, (2011) los biodigestores varían ampliamente de acuerdo con su complejidad y utilización. Los más sencillos caen dentro de la clasificación de digestores discontinuos o de cargas por lotes y los más complejos se caracterizan por poseer dispositivos que permiten alimentarlos, proporcionándoles calefacción y agitación.

Este tipo de sistema se ha utilizado durante siglos en regiones aisladas de países como China, India, Sri Lanka, Kenia y otros países hemisferio sur, utilizando sustratos de pequeñas actividades agrícolas y desechos humanos (estiércol y desechos sanitarios). Otro tipo de soluciones de bajo costo son los sistemas de cuencas. Aunque este tipo de sistemas de biogás es a gran escala, sus costos específicos son relativamente bajo en comparación con otros tipos de plantas de biogás más industrializadas.

En ellos “No hay un suministro continuo de contenido del digestor sino que se hace por gravedad y normalmente de manera intermitente (una vez al día), por lo que la digestión avanza lentamente con tiempos de retención que van de 40 a 45 días (Tauseef, Premalatha, Abbasi, & Abassi, 2013).

De acuerdo a (Tauseef, Premalatha, Abbasi, & Abassi, 2013), las limitaciones básicas de estos digestores se caracterizan la lentitud de estas plantas de biogás, son las siguientes:

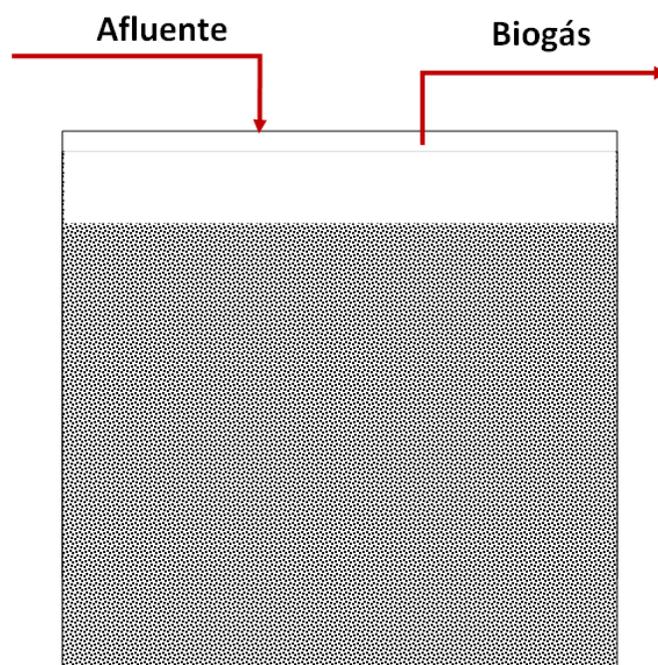
- No existe ninguna disposición para la agitación o mezcla del contenido del digestor.
- Debido a que no cuentan con los denominados sistemas de retención de biomasa que permita retener a los microorganismos por más tiempo, cuando sale el contenido del digestor por la tubería de salida; parte de la población microbiana atrapada en la suspensión también es retirada. Por consiguiente, la salida de la suspensión causa un “lavado” o *wash out* de parte de las bacterias activas, lo que disminuye el rendimiento del digestor.
- El proceso de digestión anaeróbica en este tipo de biodigestores se opera en una misma cámara bajo un mismo proceso.

Estas plantas de biogás aún son ampliamente usadas en India y en otros países en desarrollo debido a su mínimo coste, facilidad de operación y su correcta adecuación al medio rural (Tauseef, Premalatha, Abbasi, & Abassi, 2013).

Resulta conveniente clasificarlos según su modo de operación con relación a su alimentación o carga en los siguientes tipos:

2.8.3.1 Digestor discontinuo

En este tipo de biodigestores la materia orgánica se mantiene dentro del digestor por largos periodos de tiempo y se cargan una sola vez hasta finalizar el proceso. En cuanto a la descarga se lleva a cabo al momento que ha dejado de producir gas, y para conseguir una producción de biogás cercana a la continuidad, estos digestores deben combinarse con otros digestores cuya puesta en marcha en lapsos de tiempos posteriores, y a diferencia de los digestores continuos, presentan mayor eficiencia en el tratamiento de materiales lignocelulósicos, evitando taponamientos en el proceso (García Rodríguez & Gómez Franco, 2016).



2.8.3.2 Semi continuos

Cuando la primera carga que se introduce al digestor consta de una gran cantidad de materias primas. Posteriormente, se agregan volúmenes de nuevas cargas de materias primas (afluente), calculados en función del tiempo de retención hidráulico (TRH) y del volumen total del digestor. Se descarga el efluente regularmente en la misma cantidad del afluente que se incorporó. Este proceso es usado en el medio rural, cuando se trata de sistemas pequeños para uso doméstico. Los diseños más populares son el digestor indio y chino.

2.8.3.3 Discontinuos o régimen estacionario

Los digestores se cargan con las materias primas en una sola carga o lote. Después de un cierto período de fermentación, cuando el contenido de materias primas disminuye y el rendimiento de biogás decae a un bajo nivel, se vacían los digestores por completo y se alimentan de nuevo dando inicio a un nuevo proceso de fermentación. Esto se conoce también como digestores Batch o Batelada.

Plantas industriales de biogás

En este caso, el biogás se producirá en instalaciones industriales que consisten en reactores grandes y sistemas auxiliares tales como tuberías, mezcla, circulación, purificación y tratamiento de gas, así como monitoreo y control, “principio idéntico, pero más sofisticado tecnológicamente” (Renac: renewables academy, s.f).

- Espacio requerido debajo del sistema de biogás cubierto de un estanque.
- Utilizado principalmente en países industrializados

Un ejemplo clásico de este tipo de planta de biogás es una planta de biogás (para residuos agrícolas y cultivos energéticos), una planta de conversión de residuos energía (para residuos orgánicos sólidos digestibles) o un sistema de biogás para lodo de alcantarillado en plantas de tratamiento de aguas residuales.

El biogás se produce a partir de diferentes sustratos de biomasa, ya que el gas en sí se usa generalmente en cogeneración para generar electricidad y calor.

Las plantas industriales de biogás son plantas de biogás con un alto estándar de calidad para el proceso, así como también para los materiales utilizados, los equipos y las tecnologías utilizadas. Por lo general, las plantas industriales de biogás tienen equipos y sistemas de control y medidas más sofisticados, y están construidas con requisitos muy superiores en términos de calidad. Las plantas industriales de biogás son normalmente más intensivas en capital que otros tipos de instalaciones. Además, este tipo de sistema normalmente está diseñado para tratar ciertas corrientes de desechos como sustrato para la digestión anaeróbica. En este sentido, el objetivo principal del sistema es el tratamiento de los desechos, al tiempo que se aprovecha el proceso para extraer el potencial de energía almacenado en él. En las plantas de biogás industrial, se aplican los mismos principios que

en las plantas de biogás agrícola. Pueden tener una o más fases, y dependiendo del sustrato utilizado necesitan o no pre tratamiento. Del mismo modo, las opciones para usar la energía generada o el biogás son varias. Las diapositivas muestran una planta convencional de biogás multifase diseñada con pre tratamiento (térmico y mecánico), hidrólisis, fermentación y tanques de almacenamiento. Aquí, el gas desulfurado se inyecta en la planta de cogeneración que suministra electricidad a la red; el calor se envía a una red de calefacción urbana con varios consumidores, incluido un enorme estadio de fútbol. En general, están conectados directamente a la corriente de desechos de una industria específica, por ejemplo, mataderos, fábricas de papel, etcétera.

En este caso, las plantas de biogás no solo convierten los subproductos de bajo valor en energía, sino que también eliminan los residuos potencialmente peligrosos para el medio ambiente. Este último aspecto también genera ingresos, ya que el operador de la planta de biogás puede beneficiarse de los costos de eliminación que debe pagar el productor de los desechos. Las plantas industriales de biogás basadas en corrientes de residuos de subproductos agrícolas pueden utilizarse, por ejemplo, para fábricas de cerveza, producción de alcohol, producción de biocombustibles, producción de almidón a base de patatas o trigo, o para la producción de azúcar.

En la actualidad, la mayoría de estas corrientes de desechos se utilizan en la industria de alimentos para el ganado. Pero con una gran demanda de electricidad y calor industrial, y una corriente de residuos paralela existente, el uso de estos residuos para la generación de energía en el sitio es cada vez más interesante.

Debido a sus altos estándares de calidad y costos mucho más altos, este tipo de sistema de biogás generalmente solo es rentable a gran escala.

2.8.4 Componentes de un biodigestor doméstico o rural

2.8.4.1 Reactor

El reactor corresponde al dispositivo principal donde ocurre el proceso bioquímico de degradación de la materia orgánica. Pueden tener forma cilíndrica, cúbica, ovoide o rectangular, aunque la mayor parte de los tanques que se construyen en la actualidad son cilíndricos (Gobierno de Chile, (PNUD), (FAO), & (GEF), 2011).

Los digestores modernos tienen cubiertas, fijas o flotantes, cuya misión es impedir que escapen olores, conservar la temperatura, evitar la entrada de oxígeno y recoger el gas producido. Pueden estar contruidos de distintos materiales desde una piscina cubierta de HDPE, concreto hasta acero inoxidable.

2.8.4.2 Trampa de vapor

El biogás generado sale del reactor saturado con vapor de agua, vapor no deseado en el biogás debido a que, al ser incinerado, el vapor de agua disminuiría el poder calorífico. “Junto con el vapor de agua se arrastran partículas sólidas las cuales resultan perjudiciales en el aprovechamiento del biogás” (Salamanca Tamayo, 2009).

Buscando el máximo poder calorífico del biogás generado, es común hacer uso de filtros como los de silicato de silicio, silica gel o condensadores, como las trampas de agua.

Este constituye un accesorio de seguridad que cumple con dos objetivos: coleccionar el vapor generado dentro del reactor, liberando el biogás de este vapor indeseado y como un accesorio de seguridad que libera la presión en dado caso que exista una sobrepresión del sistema.

2.8.4.3 Almacenamiento de biogás

El gasómetro es el dispositivo donde se almacena el biogás producido.

Existe una amplia variedad en el diseño de gasómetros buscando siempre materiales livianos en caso de biodigestores convencionales, e incluso en biodigestores industriales principalmente en Europa se hace uso de membranas plásticas, se aplica en biodigestores de volumen mayor a 30 m³, llegando a almacenar hasta 5000 m³.

Un ejemplo de materiales livianos son los gasómetros de biodigestores tipo bolsa que hace uso de otro recinto del mismo material para almacenar el biogás.

2.8.4.4 Trampa de ácido sulfhídrico

En el biogás se halla frecuentemente ácido sulfhídrico (H_2S), “un gas altamente venenoso” (Salamanca Tamayo, 2009) que es generado por la reducción de sulfatos por las bacterias anaerobias. Se conoce que este ácido se genera en pequeñas cantidades en la digestión anaerobia y otorga un olor desagradable al biogás.

Entre los sistemas de tratamiento físico-químico para la reducción de H_2S en el biogás tenemos la absorción (filtros de carbón activado), la adsorción (limaduras de hierro), la oxidación química, etc. Estos tipos de sistemas son mucho más costosos que los tratamientos biológicos. Además, los procesos físico-químicos generan casi siempre compuestos que son mucho más contaminantes que los mismos compuestos que se requiere eliminar. En cuanto a eficiencia estos tratamientos son excelentes siempre y cuando se cumpla con las condiciones óptimas y con los requerimientos de productos químicos que automáticamente elevan los costos del tratamiento. (Salamanca Tamayo, 2009).

2.8.4.5 Trampa de llama

La última es una trampa de llama, su principal función es la de evitar que cuando el biogás sea encendido y el reactor pierda presión, la llama ingrese al reactor y pueda ocurrir un accidente.

3 Capítulo III Metodología

Se realizó el diseño y construcción de un biodigestor anaerobio convencional, para la codigestión anaerobia de estiércol de cerdo y residuos alimenticios, en el que la eficiencia de la codigestión fue evaluada con la producción de biogás, la remoción de la DQO y de los sólidos volátiles.

Siguiendo el diagrama metodológico de la Figura 15.

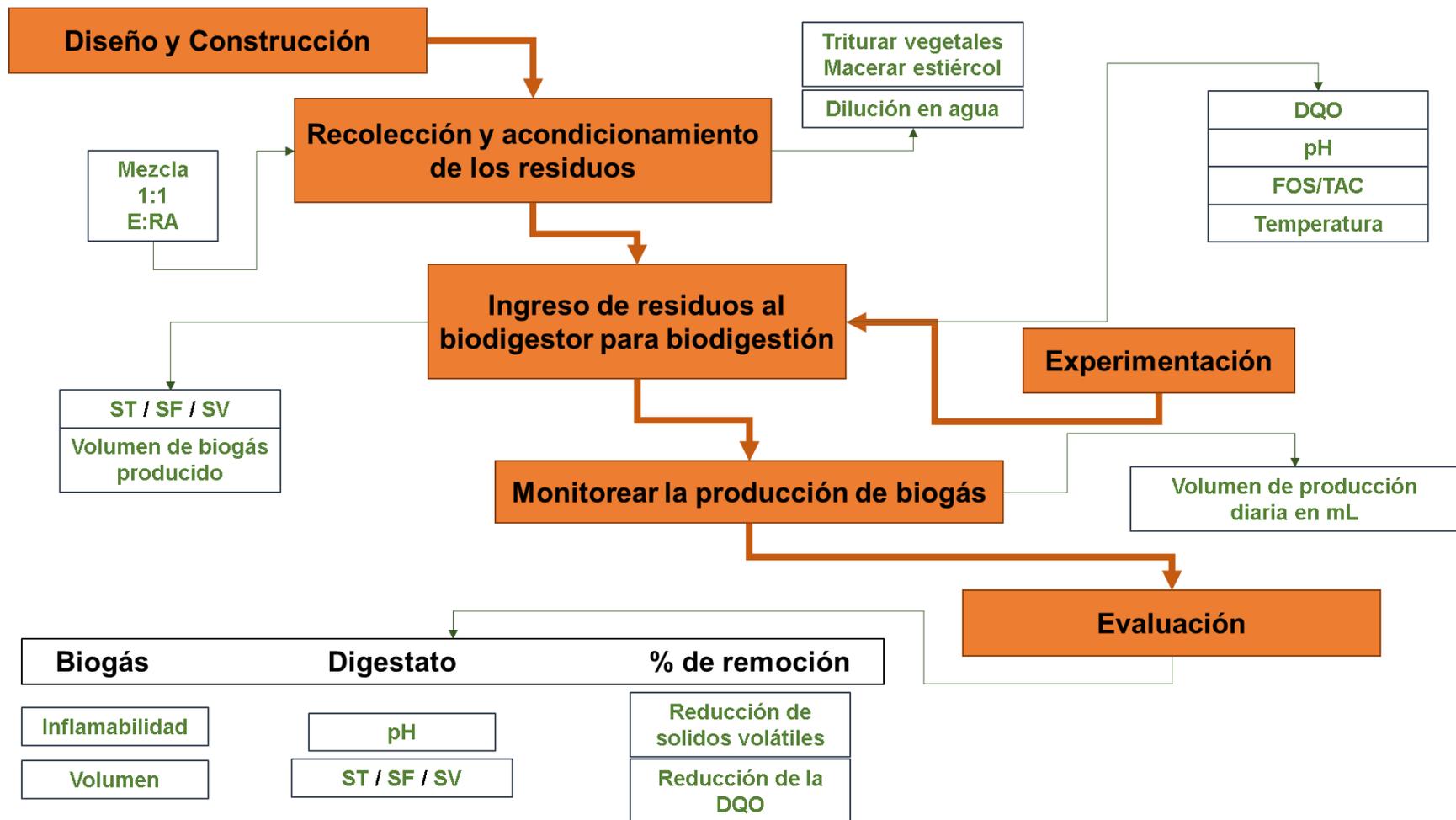


Figura 15. Metodología de trabajo

3.1 Diseño y construcción

La metodología empleada para determinar la configuración del biodigestor, tomó en cuenta los siguientes aspectos: Materiales convencionales y asequibles, inicialmente con la elección de la forma del reactor que limitaría los componentes a instalar.

El biogás es dirigido desde la salida del reactor por todas las trampas por una tubería de CPVC de ½”, que en el trayecto cuenta con llaves de paso de bola y coples unión para un mejor manejo del biodigestor, en caso de necesitar remplazar un dispositivo o pieza, he incluso para poder ser transportado.

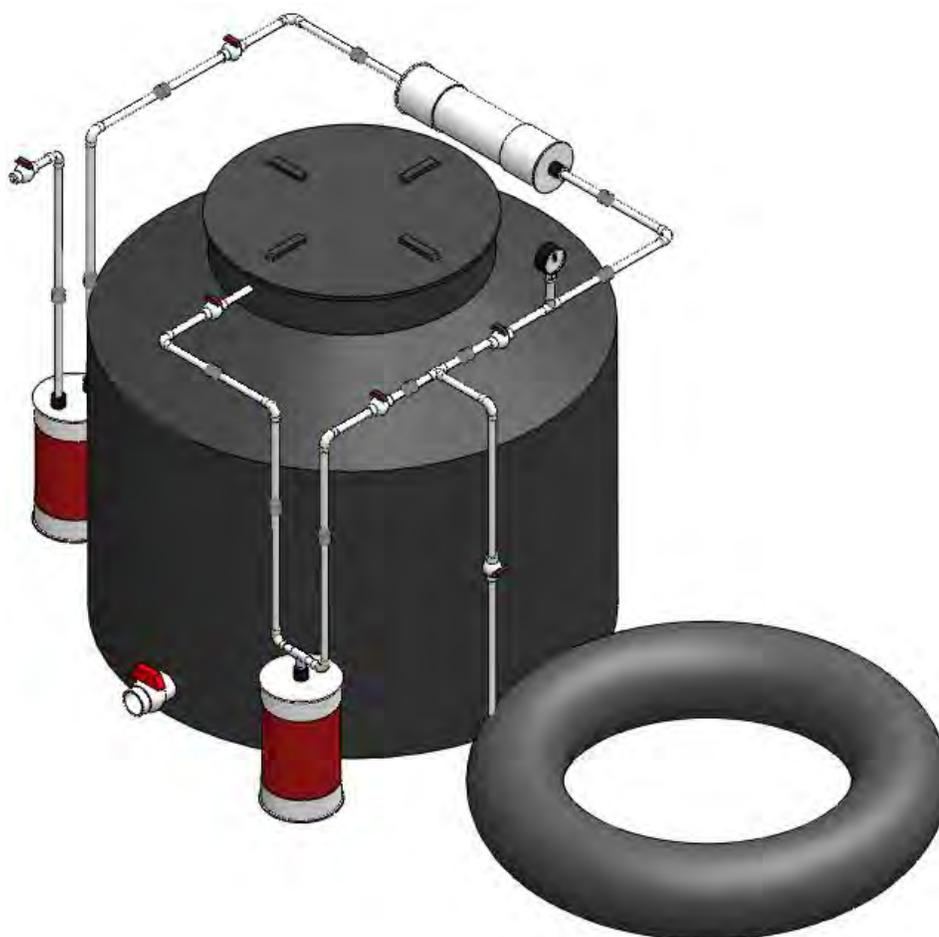


Figura 16. Diseño en 3D del biodigestor.

3.1.1 Reactor

El reactor constituye el “alma mater” del biodigestor, en él ocurre la biodegradación anaerobia de los residuos.

En la Figura 17 se observa el diseño del reactor del biodigestor, diseñado en un recipiente de la marca Rotoplas® de un volumen de 700 litros. Al que se le adaptó a la salida una llave de bola de 2” para la purga de los residuos ya digeridos.

Se hace uso de la tapa original del Rotoplas®.

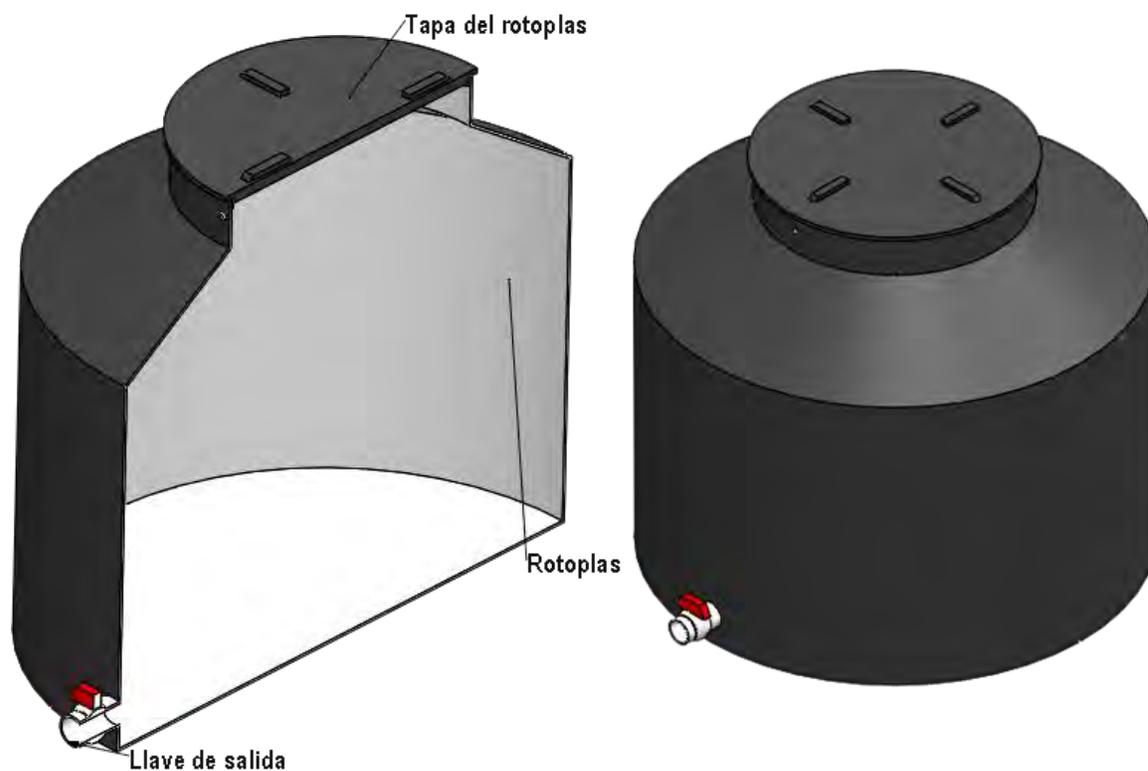


Figura 17. Reactor del biodigestor y sus componentes.

3.1.2 Trampa de vapor

Se diseña iniciando con un tubo de PVC de 6" de diámetro, de 30 cm de longitud al que se le colocan 2 tapas, y se agrega una columna de 20 cm de agua, el cual servirá para condensar el vapor de agua que salga junto con el biogás al igual para liberar la sobrepresión del sistema en dado caso que esta exista.

Esta liberación de la presión ocurre de la siguiente manera: en la tapa superior se realiza un agujero y se coloca una brida de 1/2" por el cual se ingresa un tubo de 1/2" que ingresa a la trampa y se sumerge en una columna de agua, al igual que en la tapa superior se realiza un pequeño agujero. Una vez que se exceda la presión el biogás escapara por el tubo de 1/2" ingresada en la columna de agua, esta desplazara la columna y liberara la presión.

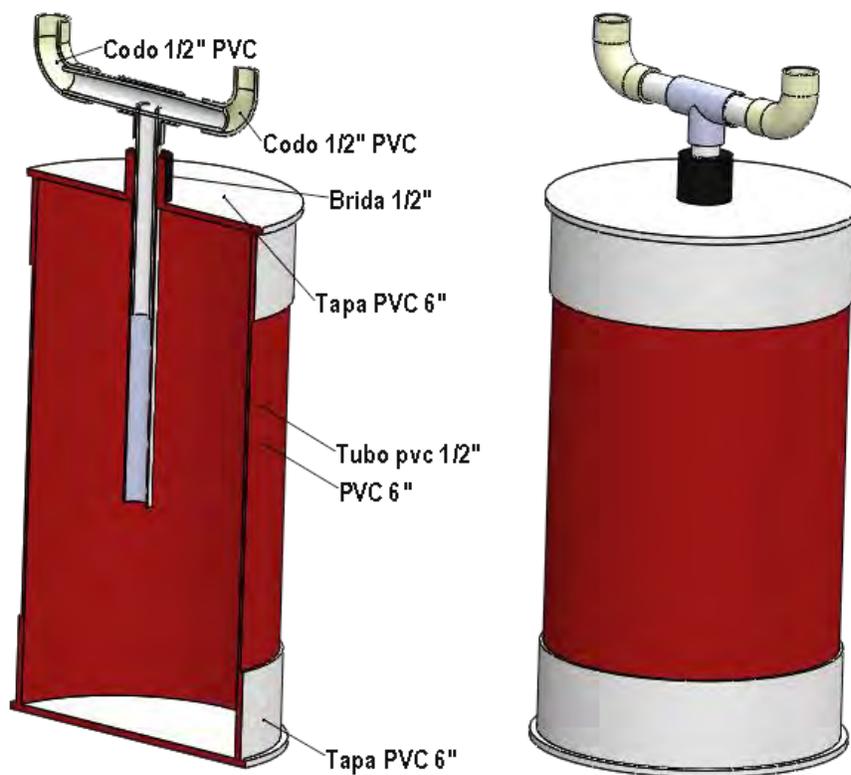


Figura 18. Composición de la trampa de vapor.

3.1.3 Almacenamiento de biogás (Gasómetro)

Se hizo uso de una cámara de aire de automóvil, de aproximadamente 400 cm³, al que se le retira la válvula para conectar una manguera que dirige el biogás para su almacenamiento.

3.1.4 Manómetro

Se instaló un manómetro para el monitoreo de la presión en el sistema.

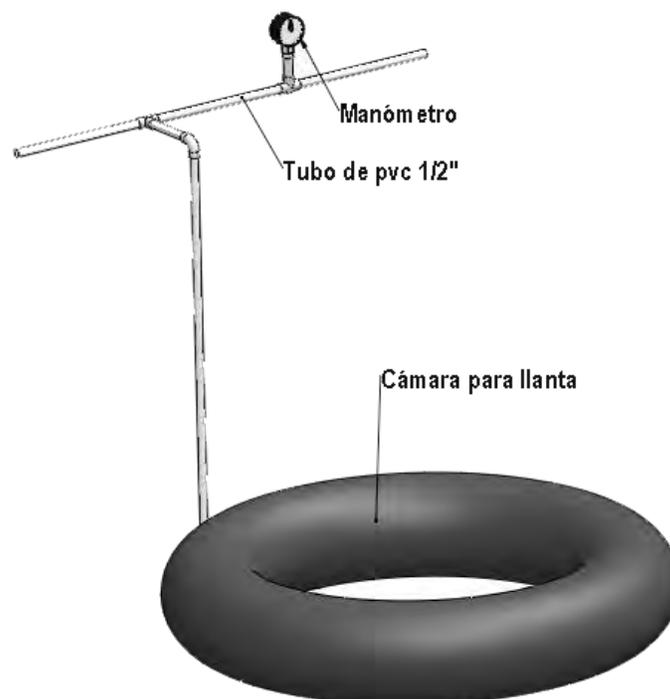


Figura 19. Almacenamiento de biogás y manómetro.

3.1.5 Trampa de ácido sulfhídrico

El filtro de ácido sulfhídrico se observa en la Figura 20 este consiste en un tubo de PVC de 4" de diámetro, llena de tiras de alambre recocido.

El biogás es conducido desde su almacenamiento por la tubería a la trampa en donde el ácido reaccionará con el hierro para ser depositado en el lecho del tubo y el biogás continuará hasta la trampa de llama.

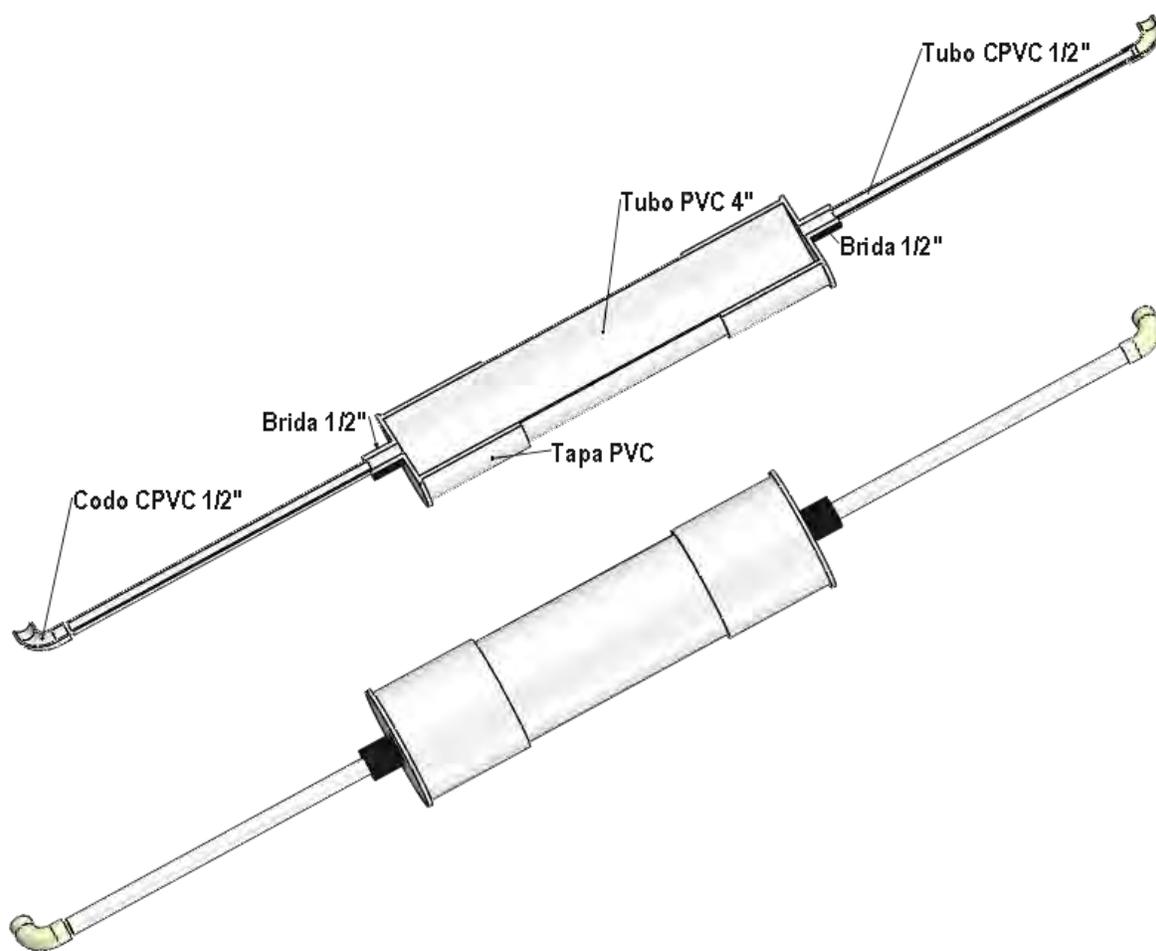


Figura 20. Filtro de ácido sulfhídrico

3.1.6 Trampa de llama

Fue hecha en un tubo de 6" de diámetro de 20 cm de altura con 2 tapas y 2 entradas. A las que se agregaron 2 bridas y se conectaron tubos de 1/2".

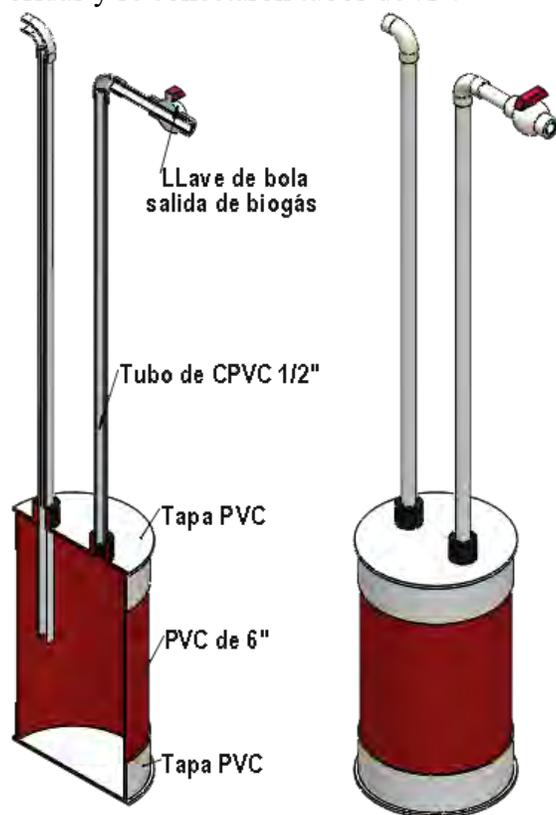


Figura 21. Detalle del diseño de la trampa de llama.

3.2 Recolección de residuos

3.2.1 Residuos Alimenticios

Debido a la complejidad de la alimentación de las personas, los residuos alimenticios que se generan también son complejos, la variación de la alimentación, de la temporada, y la alimentación de las personas, los residuos orgánicos constituyen un residuo que es difícil de homogenizar por tanto, los residuos alimenticios usados fueron recolectados del bote de donde son desechados, sin hacer una elección de ellos más que evitar el tomar cítricos, que podrían acidificar el medio y no lograr las condiciones para la codigestión anaerobia.

Fueron recolectadas del mercado municipal Lázaro Cárdenas del Río, una mezcla homogénea de frutas: piñas, manzanas, tomates, mazorcas, melones, y algunos vegetales como: cebollas, zanahorias, tomates, calabaza italiana, entre otras.

3.2.2 Estiércol

El estiércol este es obtenido del Centro De Bachillerato Tecnológico Agropecuario Núm. 11 de la ciudad de Chetumal, Quintana Roo en donde se realiza la crianza de cerdos parte de su programa educativo. Estos son alimentados con alimento para cerdo comercial.

3.2.3 Acondicionamiento de residuos

Los RA fueron triturados para reducir su tamaño, seguidamente fueron diluidos en agua a una razón de 1:2 (RA: Agua).

El estiércol de cerdo fue macerado y diluido en agua a una razón de 1:1 (Estiércol: Agua).

Las diluciones efectuadas a los residuos se realizaron de acuerdo a lo reportado en la bibliografía para realizar sus digestiones individuales.

3.3 Experimentación

De la metodología general de la investigación, **Figura 15**, se desprende la metodología de la experimentación presentada en la **Figura 22**.

Realizada en paralelo con la estabilización del biodigestor, para comprender el comportamiento de la digestión de distintas mezclas y como sus características afectan la producción de biogás y por ende la remoción de DQO y sólidos.

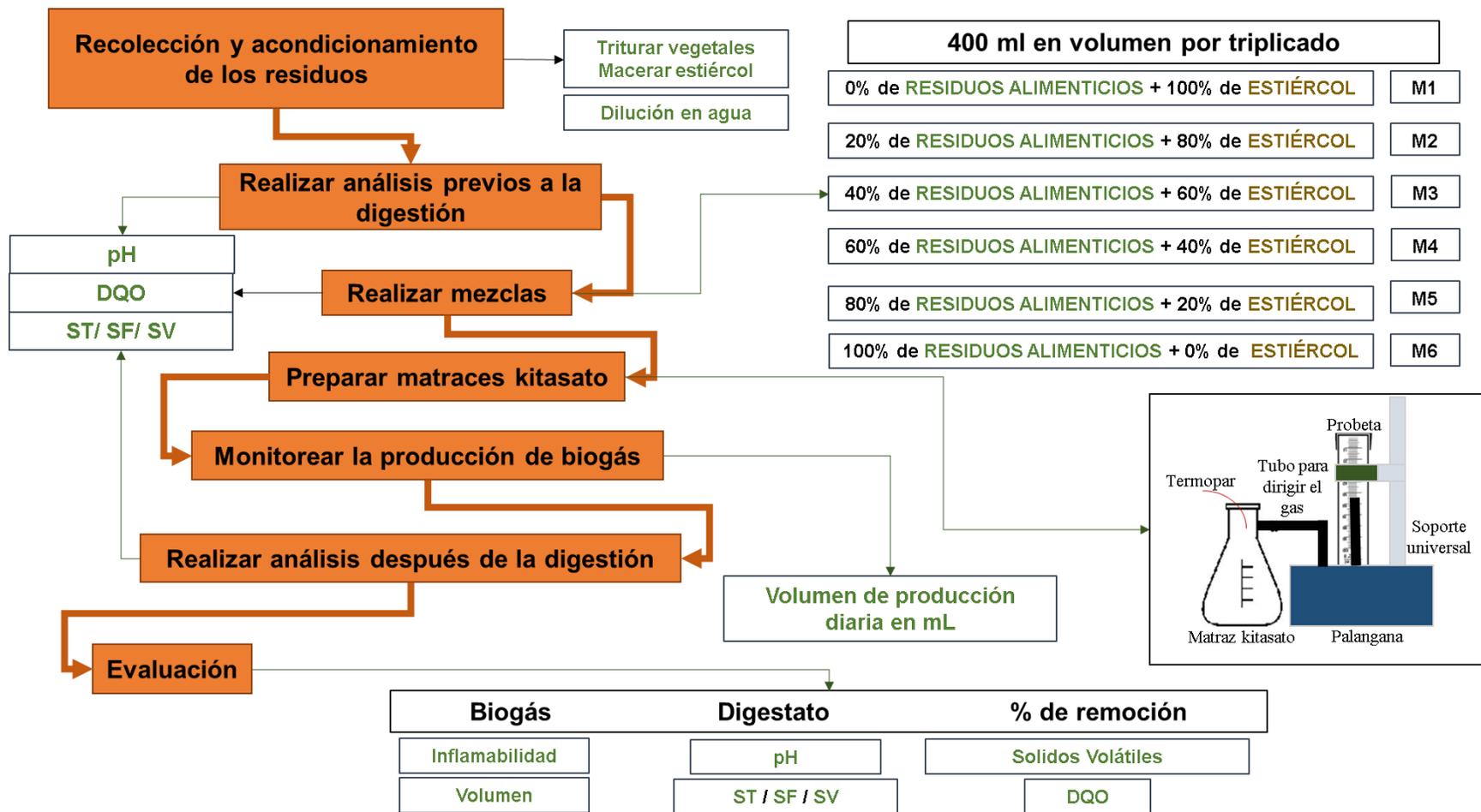


Figura 22. Metodología de la experimentación

3.3.1 Realización de mezclas

Para el desarrollo de la experimentación se realizó distintas mezclas de Estiércol: Residuos Alimenticios, como se aprecia en la **Figura 23**. La mezcla 1 y 2 (M1, M6) corresponden al 100% de residuos con la primera dilución en agua realizada en el acondicionamiento, estiércol y residuos alimenticios respectivamente, siendo las digestiones control, debido a que el comportamiento de su producción de biogás indicara cómo se comportaran sus mezclas.

400 ml en volumen por triplicado	
0% de RESIDUOS ALIMENTICIOS + 100% de ESTIÉRCOL	M1
20% de RESIDUOS ALIMENTICIOS + 80% de ESTIÉRCOL	M2
40% de RESIDUOS ALIMENTICIOS + 60% de ESTIÉRCOL	M3
60% de RESIDUOS ALIMENTICIOS + 40% de ESTIÉRCOL	M4
80% de RESIDUOS ALIMENTICIOS + 20% de ESTIÉRCOL	M5
100% de RESIDUOS ALIMENTICIOS + 0% de ESTIÉRCOL	M6

Figura 23. Proporciones de mezcla de E: RA en porcentaje.

3.3.2 Análisis

Los parámetros analizados para la caracterización de los residuos y mezclas fueron en humedad, sólidos totales, volátiles, DQO y pH al inicio de la digestión y al final, para la evaluación de la eficiencia en remoción de sólidos, DQO y relacionar dichos parámetros con la producción de biogás.

3.3.3 Configuración de matraces kitasato

Cada mezcla será evaluada con 400 mL por triplicado, en un matraz kitasato de 500mL con la configuración de la **Figura 25** donde al matraz kitasato se le agrega un termopar para el registro de la temperatura, un tubo es conectado de la salida del matraz y se dirige a una trampa de agua realizada con una probeta de 250 mL.

El matraz es cubierto con aluminio y papel estraza, para eliminar el contacto con la luz al medio, como se observa en la **Figura 24**.

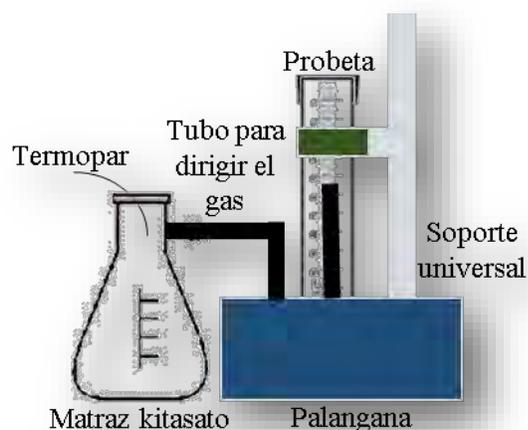


Figura 25. Configuración de los matraces kitasato para la recolección del biogás.



Figura 24. Matraces con las mezclas a ser evaluadas por triplicado.

3.3.4 Monitoreo de la digestión

En la experimentación se realiza el monitoreo de la producción de biogás por 24 horas, en cada una de las mezclas, con agitación y monitoreo de la temperatura cada 2 horas.

Debido a la dificultad de evaluar el pH al necesitar un ambiente anaerobio, este no fue monitoreado constantemente más que al inicio de la codigestión y al final. Ocurriendo lo mismo con la DQO y los sólidos.



Figura 26. Monitoreo de la producción de biogás diario.

3.4 Digestión en el biodigestor.

Una vez que se realiza el ingreso de los residuos al biodigestor se monitorea la temperatura de trabajo cuatro veces al día, junto con el pH.

Revisando la captación de biogás en la cámara de carro dispuesta para ello.

Los análisis del parámetro FOS/TAC, DQO y sólidos son realizados semanalmente, para comprender como va evolucionando la estabilización. Y relacionar los parámetros a la producción de biogás.

3.5 Parámetros analíticos de control

3.5.1 Temperatura

La temperatura en los digestores anaerobios es preferible que sea continua durante todo el proceso, o sin cambios de $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Este estudio se centra en un biodigestor convencional y una experimentación sin calefacción externa, por tanto, el monitoreo diario otorga un esquema de cómo se comporta la temperatura en el digestor durante todo el día, en las mañanas y tardes donde se infiere que las temperaturas son mayores por la influencia del sol y en las noches, donde existe un descenso de la temperatura.

Con esto se conoce como el medio afecta las temperaturas de trabajo.

Por tanto, se mide diario haciendo uso de un termopar tipo k, este es un sensor que consiste en dos metales diferentes unidos por un extremo. Cuando la unión de los dos metales se calienta o enfría se produce un voltaje que se puede correlacionar con la temperatura.

Estas diferencias de temperaturas se leen en un multímetro Agilent 34970A, calibrado en un rango de 0°C a 95°C (rango en donde se encuentran las temperaturas en las que trabajan los biodigestores).

3.5.2 pH

Este valor varía con la temperatura por lo que su evaluación se realiza 3 veces al día mañana, tarde y noche junto con la medición de la temperatura.

El pH se midió con un potenciómetro marca Hanna modelo HI 991001, calibrado con 2 soluciones tampón pH 4,01 y pH 7.01.

3.5.3 Sólidos totales (ST), volátiles (SV)

La determinación de estos indica la evolución de los sólidos que se digieren en el digestor. Para alimentar el digestor, se mezcla desechos alimenticios triturados con estiércol de cerdos en partes iguales, que son diluidos con agua en una proporción 1:4.

La medición de los sólidos totales y volátiles se realiza de acuerdo a una modificación de la NMX-AA-034-SCFI-2015.

El diagrama de la metodología completa del análisis se aprecia en la **Figura 37** de anexos.

3.5.4 Demanda química de oxígeno (DQO)

La medición de la DQO se realiza de acuerdo a la NMX-AA-30-SCFI-2001, a reflujos cerrado, con un espectrofotómetro UV-Vis marca HACH DR/2010 y un termoreactor de calentamiento para DQO marca HACH. La metodología completa se aprecia en la Figura 38 de anexos.

La lectura de absorbancias es realizada en una curva de calibración (**Figura 36** de anexos) realizada con ftalato ácido de potasio, en un rango de concentraciones de 0 a 500 mgO₂/L, Ecuación (4) con R² de 0.999.

$$DQO = \frac{\text{absorbancia} - 0.00112}{0.004} \quad (4)$$

3.5.5 Relación parámetros

Los sólidos totales, volátiles y la DQO son parámetros ligados directamente indican la evolución de la producción de biogás, y la comparación de los valores iniciales con los finales, indican el nivel de remoción de la materia orgánica y la eficiencia de la digestión en función de la remoción de sólidos volátiles, de la DQO y por ende de la producción de biogás.

El porcentaje de SV respecto a ST indica el nivel de degradación de la materia orgánica, este es calculado con la **Ecuación (5)** que como antes se ha mencionado se buscan proporciones de SV mayores al 60% de ST.

$$\% \text{ de SV respecto a ST} = \frac{\text{Sólidos Volátiles} * 100}{\text{Sólidos Totales}} \quad (5)$$

El peso de la muestra secada por 24 horas, (descrito en la **Figura 37**) es el peso de los sólidos en las muestras es el P2

El porcentaje de ST en muestra, es una relación que indica el porcentaje de ST existente en una muestra determinada, siendo esta calculada con la **Ecuación (6)**, indica el tipo de digestión a realizar (Húmeda, seca o semi-seca).

$$\% \text{ de ST en muestra (\%)} = \frac{P2(mg) * 100}{\text{Peso muestra (mg)}} \quad (6)$$

La cantidad de ST y SV removidos se calcula con las **Ecuaciones (7) y (8)** respectivamente.

$$ST_{Removidos} \left(\frac{mg}{L} \right) = ST_{Inicio} - ST_{Final} \quad (7)$$

$$SV_{Removidos} \left(\frac{mg}{L} \right) = SV_{Inicio} - SV_{Final} \quad (8)$$

Mientras que los porcentajes de remoción se calculan con las **Ecuaciones (9) y (10)**.

$$\% \text{ de remoción de ST} = 100 - \frac{\text{Solidos Totales}_{Finales} * 100}{\text{Solidos Totales}_{Iniciales}} \quad (9)$$

$$\% \text{ de remoción de SV} = 100 - \frac{\text{Solidos Volátiles}_{Finales} * 100}{\text{Solidos Volátiles}_{Iniciales}} \quad (10)$$

Las ecuaciones que indican la cantidad y los porcentajes de remoción de la DQO se presentan en la **Ecuaciones (11) y (12)**.

$$DQO_{Removida} = DQO_{Inicial} - DQO_{Final} \quad (11)$$

$$\% \text{ de remoción de DQO} = 100 - \frac{DQO_{Finales} * 100}{DQO_{Inicial}} \quad (12)$$

Los rendimientos de SV para producir biogás se estiman con la **Ecuación (13)**.

$$\text{Rendimiento de SV} \left(\frac{\text{mL}}{\text{mg SV}} \right) = \frac{\text{Volumen de biogas producido (mL)}}{\text{Solidos Volatiles Removidos (mg)}} \quad (13)$$

Y la relación de remoción de DQO por unidad de SV se calcula con la **Ecuación (14)**.

$$\text{Relación DQO: SV} \left(\frac{\text{mgDQO}}{\text{mg SV}} \right) = \frac{\text{DQO}_{\text{Removida}}(\text{mgDQO})}{\text{SV}_{\text{Removidos}}(\text{mg SV})} \quad (14)$$

3.5.6 Análisis FOS/TAC

Para el cálculo de FOS/TAC se usa el método titulométrico descrito por Lossie & Pütz (2011). Usando la **Ecuacion (15)**.

$$\frac{\text{FOS}}{\text{TAC}} \frac{\text{mg Ac. Acético}}{\text{mg CaCO}_3} = \frac{V(\text{H}_2\text{SO}_4)_5 * 250}{(V(\text{H}_2\text{SO}_4)_{4.4} * 1.66 - 0.15) * 500} \quad (15)$$

Donde:

FOS: V (H₂SO₄)₅: Volumen de H₂SO₄añadido desde el principio hasta pH de 5.

TAC: V (H₂SO₄)_{4.4}: Volumen de H₂SO₄ añadido desde pH 5 a pH 4.4.

En la **Tabla 9** describe cada una de las relaciones del análisis FOS/TAC. Dependiendo de la relación, son las condiciones en las que se encuentra el medio donde se desarrollan los microorganismos y las diversas medidas a tomar respecto a la alimentación de la biomasa.

Tabla 9. Interpretación de las relaciones FOS/TAC

Cociente	Antecedentes	Medida
FOS/TAC		
>0.6	Excesiva sobrealimentación de biomasa.	Interrumpir la adición de biomasa.
0.5-0.6	Excesiva entrada de biomasa	Agregar menos biomasa.
0.4-0.5	La planta está muy cargada	Vigilar la planta más estrechamente.
0.3-0.4	La producción de gas es máxima.	Mantener constante la entrada de biomasa.
0.2-0.3	La entrada de biomasa es muy baja.	Aumentar lentamente la entrada de biomasa.
<0.2	La entrada de biomasa es bajísima.	Aumentar rápidamente la entrada de biomasa.

3.5.7 Producción de biogás

En lo que respecta a la producción de biogás se realiza una medición continua, a partir de que empiece su producción, la medición del volumen de biogás se realiza de 2 maneras. En el biodigestor por medio de lo acumulado en las recamaras dispuestas para ello y en los matraces por medio del volumen desplazado en las trampas de agua realizadas en probetas de 250 mL.

Se realizan curvas para lograr observar el punto máximo de producción y estimar el tiempo de retención hidráulico (TRH) de la materia.

4 Capítulo IV Análisis y discusión

4.1 Biodigestor

Las imágenes del resultado de la construcción del biodigestor se presentan en la **Figura 27** biodigestor construido.

El reactor se construyó utilizando un tanque de la marca Rotoplas® de 700 litros, que asemeja a la forma de un digestor chino. Para que se cumpla con las condiciones anaerobias en el reactor se hace uso de trampas de agua al momento de instalar las tuberías de afluente de residuos y salida de digestato, que para mantener las trampas de agua se determinó como intervalo de operación, un volumen máximo 522 litros y mínimo de 380 litros para depuración de lodos

En la parte superior del Rotoplas® se instaló una salida de biogás, el cual es conducido por una tubería de CPVC de ½” a un “tren de tratamiento”, muy sencillo para limpiar el biogás. Este “tren de tratamiento” inicia en una trampa de agua, para la eliminación del vapor de agua presente en el biogás, este vapor no es deseado en el biogás, debido a que baja el poder calorífico de este al momento de su combustión. La trampa de agua, consiste en un tubo de 6” de diámetro en el que en el medio se ingresa la tubería de ½” en donde la tubería de biogás pasa por él, en el cual se llena de agua, para que el gas al pasar por ahí condense el exceso de vapor de agua.

Seguidamente se instala una recámara de aire de automóvil para el almacenamiento del biogás, que en conjunto cuentan con un volumen aproximado de 800 cm³. Se instala un manómetro para la supervisión de la presión dentro biodigestor. Se sabe que en el biogás existe la presencia de ácido sulfhídrico (H₂S) en pequeñas cantidades, y aunque en pequeñas cantidades, este al no ser eliminado del biogás al ser incinerado deja un olor desagradable. Se elimina con un filtro de viruta de hierro, en este caso fue construido en un tubo de PVC de 4” de diámetro, lleno de tiras de alambre recocido en el que el ácido reaccionara con el hierro para ser depositado en el lecho del tubo.

Por último el biogás es dirigido a una trampa de llama, cuya función es la de evitar que cuando el biogás sea encendido y el reactor pierda presión, la llama ingrese al reactor y pueda ocurrir un accidente.



Figura 27. Biodigestor construido.

4.1.1 Sólidos

Se observa que, una vez diluidos tanto los RA como el E, el porcentaje de SV respecto a los ST ingresada en el biodigestor es superior al 60%, (90% y 77% respectivamente) por lo tanto su biodegradabilidad anaerobia es factible, conteniendo una buena proporción de SV. En la **Tabla 10** se resumen los valores de la caracterización de los residuos ingresados en el biodigestor.

Así mismo la mezcla contiene un 70 % de SV respecto a los ST, indicando un buen porcentaje de biodegradabilidad.

Se observa que el estiércol es el que contiene una proporción de ST muy superior a los residuos alimenticios.

Tabla 10. Caracterización de sólidos de los residuos y mezclas al inicio de la digestión

60 mL Semana 1	Tipo de muestra	Sólidos Totales (ST, mg/L)	Sólidos Totales Fijos (STF, mg/L)	Sólidos Totales Volátiles (STV, mg/L)	% SV respecto a ST
	Residuos alimenticios	94.018	9.26	84.752	90.14
	Estiércol	501.94	114.20	387.75	77.25
	Mezcla	17.818	5.172	12.64	70.97

En la **Tabla 11** se observa que de acuerdo al porcentaje de sólidos en las muestras y suponiendo una digestión individual el estiércol tendría una digestión seca, mientras que los RA y la mezcla ingresada al biodigestor tendrían una digestión húmeda.

Con dichos datos es posible afirmar que la mezcla contiene un bajo nivel de ST, con lo que su digestión podría ocasionar bajos porcentajes de degradación de los sólidos volátiles con baja reducción de DQO, obteniendo una baja producción de biogás.

Tabla 11. Porcentajes de sólidos en las muestras al inicio de la biodigestión

	Tipo de muestra	Peso muestras (gr)	Peso sólidos totales en muestra	Porcentaje de sólidos en muestra (%)	Tipo de digestión
60 mL	Residuos alimenticios	51.85	4.70	9.06	Húmeda
	Estiércol	65.07	30.12	46.28	Seca
	Mezcla	49.46	0.89	1.80	Húmeda

4.1.2 Demanda Química de oxígeno

Con un mes de trabajo, la temperatura promedio de operación se mantuvo en el rango mesofílico con un promedio de 30.5 °C, y un pH de 5.8. Los análisis de sólidos, llevados a cabo semanalmente se resumen en la Tabla 12.

Aunque existe una disminución en los sólidos totales y volátiles, esta es mínima y no indica una alta producción de biogás (Como se comprueba con la baja captación de biogás).

Tabla 12. Monitoreo semanal de la evolución de los sólidos

	Monitoreo semanal	Tipo de muestra	Sólidos Totales (ST)	Sólidos Totales Fijos (STF)	Sólidos Totales Volátiles (STV)	Sólidos Volátiles respecto a Sólidos Totales (%)
100 mL	2	Mezcla	33.10	9.13	23.98	72.44
	3	Mezcla	27.11	7.70	19.41	71.60
	4	Mezcla	31.12	9.93	21.19	68.10

En los datos de la evolución de la DQO de la **Tabla 13**, realizados al sobrenadante y a la mezcla se observa que los valores del sobrenadante representan entre un 45% a 55% de la DQO_{Total} (Mezcla) aproximadamente.

Su aparente nula eliminación señala que aún no ocurre una producción de biogás, como se puede observar se inicia con 31,234.95 mgO₂/L, en la primera y segunda semana 2 esta sube a 35,513.445 mgO₂/L para seguir subiendo la semana 3 a 36,829.905 mgO₂/L y siendo la cuarta que aparentemente empieza a disminuir encontrándose 35,842.566 mgO₂/L.

Tabla 13. Evolución de la DQO

Monitoreo semanal	Sobrenadante (mgO₂/L)	Mezcla (mgO₂/L)
1	16,315.076	31,234.95
2	17,741.235	35,513.445
3	17,192.715	36,829.905
4	16,205.365	35,842.566

4.1.3 Relación FOS/TAC

Los análisis FOS/TAC realizados a lo largo del mes se resumen en la **Tabla 14** en cuatro semanas, estos indican que existe una sobrealimentación de biomasa, por lo que no es necesario una continua alimentación.

Sin embargo con los datos de la baja concentración de ST en la mezcla y los valores FOS indicando una sobrealimentación de biomasa no logra una alta producción de biogás, por la alta presencia de ácidos orgánicos (Presentada como mg Ác.Acético/L). Se puede afirmar que no existe una sobrealimentación de biomasa si no que por el contrario el pH influye en estos valores.

Tabla 14. Monitoreo del análisis FOS/TAC

Monitoreo semanal	TAC (mg CaCO₃/L)	FOS (mg Ac.Acético/L)	FOS/TAC (mg Ac.Acético /mg CaCO₃)
1	250	423	1.692
2	150	257	1.71
3	150	423	2.82
4	200	423	2.115

La suma de estos parámetros indica que a un mes de trabajo la baja reducción en los sólidos como en la DQO, y las condiciones inadecuadas del medio en el biodigestor como el **pH ácido**, y el análisis FOS/TAC

4.2 Experimentación

La digestión en la experimentación fue evaluada por diez días a una temperatura promedio de 27.5 °C. Llevando a cabo los análisis en comparación de las digestiones control, siendo estas el 100% de residuos, M1 y M6.

4.2.1 Sólidos

Los valores presentados en la **Tabla 15** corresponden a la caracterización inicial de los RA así como de las mezclas para llevar a cabo la experimentación.

Los porcentajes de SV respecto a los ST indican una buena biodegradabilidad con estos porcentajes por encima del 60%, siendo el más bajo 72.88% del estiércol y la mayor de 87.69% en los RA.

Es claro que el estiércol con 277.27 mg/L, contiene una gran cantidad de ST, más del 400% de los RA. Con la dilución este valor se reduce en un 40% para la digestión individual del estiércol (M1).

Conforme la concentración del estiércol disminuye en las mezclas, la cantidad de sólidos disminuye, por ello el determinante de la concentración de sólidos es el estiércol.

Tabla 15. Valores de los sólidos en residuos y mezclas

Mezcla	Sólidos Iniciales			Sólidos Volátiles respecto a Sólidos Totales (%)
	Totales (SV _{Iniciales})	Fijos (SF _{Iniciales})	Volátiles (SV _{Iniciales})	
Residuos alimenticios sin diluir	68.86	8.48	60.39	87.69
Estiércol sin diluir	277.27	75.20	202.07	72.88
M6	42.90	5.71	37.19	86.70
M5	66.68	11.36	55.32	82.96
M4	99.00	20.01	78.98	79.78
M3	126.49	27.74	98.75	78.07
M2	150.74	37.74	113.00	74.96
M1	166.40	43.29	123.11	73.98

De acuerdo a la clasificación de (Abbassi-Guendouz, y otros, 2012) donde los porcentajes de ST determinan el tipo de digestión, se clasifican las mezclas en la **Tabla 16**, siendo la M5 (20%E: 80%RA), la única digestión con estiércol que es húmeda.

Tabla 16. Clasificación de las digestiones de acuerdo a los sólidos

Mezcla	Peso muestras (gr)	Sólidos en muestra (50 mL)	Porcentaje de sólidos totales (%)	Tipo de digestión
M6	46.19	2.15	4.64	Húmeda
M5	46.64	3.41	7.32	Húmeda
M4	45.66	4.59	10.05	Seca
M3	44.87	5.12	11.42	Seca
M2	45.87	6.00	13.09	Seca
M1	50.49	7.98	15.80	Seca

En la **Tabla 17** se presenta la caracterización del contenido de materia orgánica de las mezclas con la DQO_{Total} siendo la M1 (100%E) la de mayor concentración con 175,000 mgO₂/L. empezando a disminuir esta hasta llegar a la M6, la de menor concentración con 35,375 mgO₂/L.

Al igual que los sólidos el estiércol es determinante en la concentración de la DQO.

Tabla 17. Análisis de la DQO de las mezclas

Etiqueta	Mezcla		DQO_{Total} (mgO₂/L)
	Estiércol	Residuos alimenticios	Inicial (DQO_{Total inicial})
M6	0%	100%	35,375.00
M5	20%	80%	76,666.67
M4	40%	60%	97,916.67
M3	60%	40%	141,250.00
M2	80%	20%	154,375.00
M1	100%	0%	175,000.00

Después de evaluar la producción de biogás se procedió a realizar los análisis de sólidos, DQO de las mezclas 3, 4 Y 5. Estos presentaron los mayores valores de producción de biogás y por ende las mayores y más significantes remociones de DQO y eliminación de sólidos.

En la **Tabla 18** y **Tabla 19** se presentan los porcentajes de remoción de ST y SV respectivamente.

Siendo la M5 (20%E: 80%RA) la de mayor producción de biogás, la que presenta una mayor remoción de ST y SV, 21.88% y 28.15% respectivamente.

Por el contrario, la M3 (60%E: 40%) solo removió 6.62% de los ST y un 11.63% de los SV.

Tabla 18. Porcentaje de remoción de sólidos totales

Mezcla	Porcentaje de estiércol	Porcentaje de residuos alimenticios	Sólidos Totales iniciales (ST Iniciales)	Sólidos Totales Finales (ST Finales)	Porcentaje de remoción (%)
M5	20%	80%	66.68	52.09	21.8881846
M4	40%	60%	99.00	87.83	11.28440305
M3	60%	40%	126.49	118.11	6.620848135

Tabla 19. Porcentaje de remoción de sólidos volátiles

Mezcla	Sólidos Volátiles Iniciales (SV Iniciales)	Sólidos Volátiles Finales (SV Finales)	Porcentaje de remoción
M5	55.32	39.74	28.15358473
M4	78.98	63.79	19.24086532
M3	98.75	87.26	11.63591437

Comparando la cantidad de $ST_{\text{Consumidos}}$ de la **Tabla 20** con el porcentaje de remoción de la **Tabla 18**, se observa que se comportan de manera similar, **yendo** en disminución conforme el porcentaje de estiércol aumenta.

Sin embargo de la **Tabla 21** de la cantidad de $SV_{\text{Consumidos}}$ se puede observar como el consumo de estos sólidos presentados como cantidad son muy diferentes al porcentaje el cual va en disminución conforme la cantidad de sólidos aumenta.

Similar a lo que ocurre con la DQO_{Removida} como se explica más adelante.

Tabla 20. Sólidos totales consumidos.

Mezcla	Totales ($ST_{\text{Iniciales}}$)	Totales (ST_{Finales})	Sólidos totales consumidos ($ST_{\text{Consumidos}}$)
M5	66.68	52.09	14.60
M4	99.00	87.83	11.17
M3	126.49	118.11	8.37

Tabla 21. Sólidos volátiles removidos.

Mezcla	Volátiles ($SV_{\text{Iniciales}}$)	Volátiles (SV_{Finales})	Sólidos volátiles removidos ($SV_{\text{Removidos}}$)
M5	55.32	39.74	15.57
M4	78.98	63.79	15.20
M3	98.75	87.26	11.49

4.2.2 Demanda Química de oxígeno

La remoción en porcentaje de la DQO es mayor en la M5, logrando 41.09% de remoción, siendo la de menor remoción la M3 con solo 29.68%.

Sin embargo de la **Tabla 22** es importante observar que la mayor DQO_{Removida} es la de la M3 mientras que la más baja es la de la M5. Como se explica más adelante la M5 tuvo una generación mayor de biogás en comparación de las otras mezclas.

Comparando la DQO_{consumida} y no los porcentajes se esperarían que la de mayor remoción sería la que produjera mayor biogás (Ocurriendo lo contrario comparando los porcentajes). En este caso interviene el potencial de generación de biogás (PGB), ya que de ambas es diferentes, siendo mayor el PGB de la DQO de la M3 en comparación a la M4 Y M5.

Es posible afirmar que, en relación a la DQO que, el estiércol tiene una concentración mayor a la de los RA, sin embargo, su potencial de generación de generación de biogás es menor.

Tabla 22. Remoción de la DQO.

Mezcla	DQO (mg/O ₂ L)			Porcentaje de remoción (%)
	Inicial (DQO _{Inicial})	Final (DQO _{Final})	Removida DQO _{Removida}	
M5	76,666.67	45,166.67	31,500.00	41.09
M4	97,916.67	64,333.33	33,583.33	34.30
M3	141,250.00	99,333.33	41,916.67	29.68

4.2.3 Producción de biogás

En la **Tabla 23** se presentan la producción diaria de biogás, PGB monitoreada por 10 días.

Tabla 23. Producción diaria de biogás en mL

Días	Mezclas					
	1	2	3	4	5	6
1	33.33	267.67	446.67	342.67	234.67	332
2	42.67	23.33	259.33	400.00	21.33	0
3	70.00	12.00	0.00	10.00	41.33	0
4	22.00	10.00	0.00	6.67	163.33	0
5	5.00	1.33	3.33	3.33	260.00	0
6	21.33	0.00	16.00	0.00	350.00	0
7	25.33	6.67	0.67	1.67	142.00	0
8	32.67	3.33	0.00	9.67	0.00	0
9	136.00	4.00	0.00	16.00	0.00	0
10	15.00	3.33	0.00	1.33	0.00	0

La producción acumulada de las mezcla se presenta en la **Tabla 24**, de la que se puede observar que la baja producción de producción de biogás se ve afectada por la concentración de estiércol de las mezclas. Ocurriendo lo contrario con la concentración de RA.

En la digestión del estiércol se nota una mayor producción de biogás con respecto a la M2, sin embargo, las mezclas 3, 4 y 5, tienen una mayor producción en comparación con el estiércol.

La M5 con relación 20%E: 80%RA dejó de producir biogás a los 7 días, en comparación con la M1 de relación 100%E: 0%RA, la cual puede mantearse produciendo biogás hasta por 90 días. El volumen de biogás producido en la M5 fue de 1,212 ml, mientras que para el caso de la M1 es de 392 ml, lo anterior muestra claramente que se tienen mejores rendimientos de producción de biogás en el caso de la M5, la cual además puede producir biogás en un tiempo significativamente menor.

Tabla 24. Producción acumulada de biogás

Etiqueta	Mezcla		Producción acumulada de biogás (mL)
	Estiércol	Residuos alimenticios	
M6	0%	100%	332.00
M5	20%	80%	1,212.67
M4	40%	60%	786.33
M3	60%	40%	726.00
M2	80%	20%	331.67
M1	100%	0%	392.50

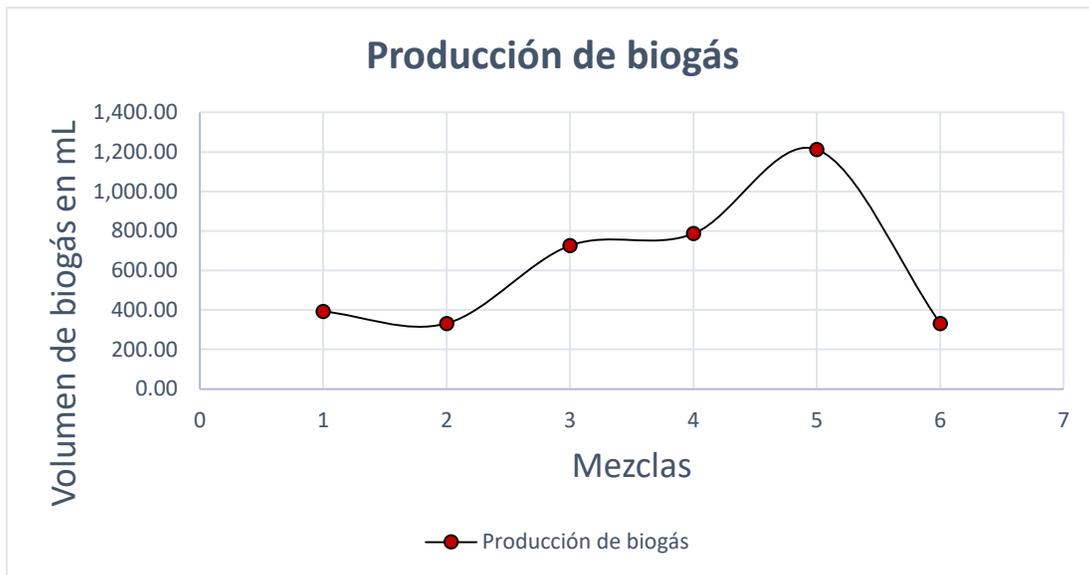


Figura 28. Generación de biogás de las mezclas.

La evolución de la producción de biogás por cada una de las mezclas se presenta EN la serie de figuras desde **Figura 29** hasta la **Figura 34** .

En la M1 (100%E: 0%RA) después de 10 días de monitoreo la producción de biogás continuaba, en trabajos anteriores revisados para la presente investigación se han reportado tiempos de retención hidráulico del estiércol de cerdo de 60 a 90 días por tanto se aprecia que la producción de biogás continua.

Sin embargo, se encontraron muchas dificultades para su manejo, como por ejemplo la creación de burbujas dentro del sustrato lo que mantenía el biogás atrapado, aumentando el volumen de la mezcla llegando incluso a casi desbordarse, requiriendo de su agitación para la liberación del biogás generado. Ocurriendo lo mismo en todas las mezclas, pero en mayor medida en la M1. De ahí la importancia de la agitación, para la liberación del biogás.

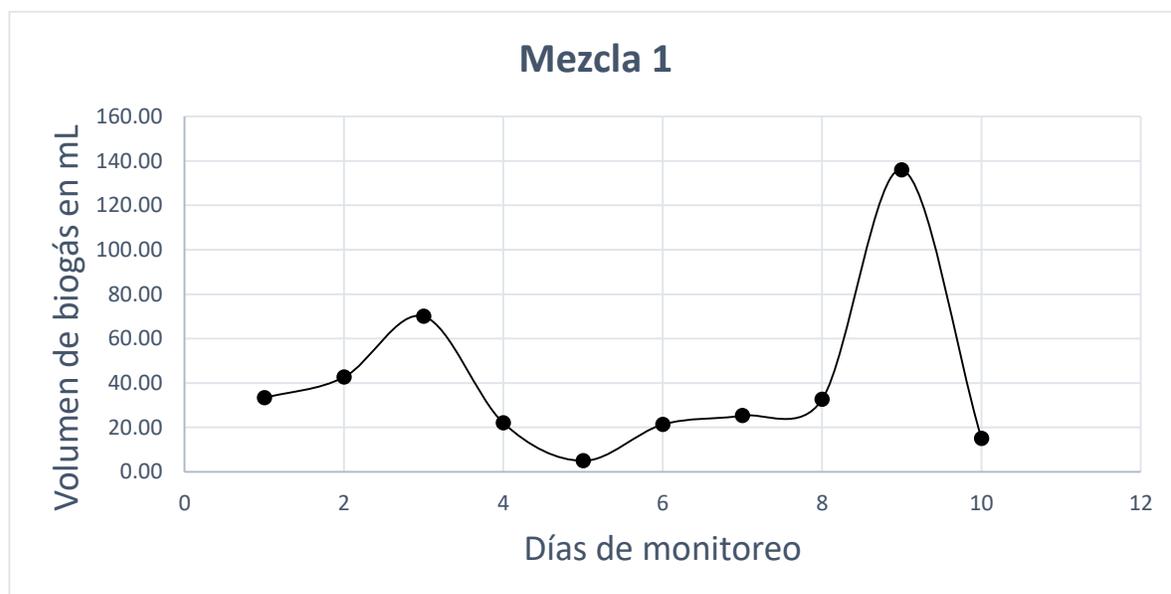


Figura 29. Generación de biogás de la mezcla 1 (M1; 100%E: 0%RA).

De la M2 (80%E: 20%RA) representada en la **Figura 30** , se puede observar una producción máxima de biogás en el primer día de 267.67 mL de biogás y este decae drásticamente el segundo día a una producción de 23.33 mL sin recuperarse la producción y continúa así a lo largo de los 10 días con una producción diaria menor a 12 mL.

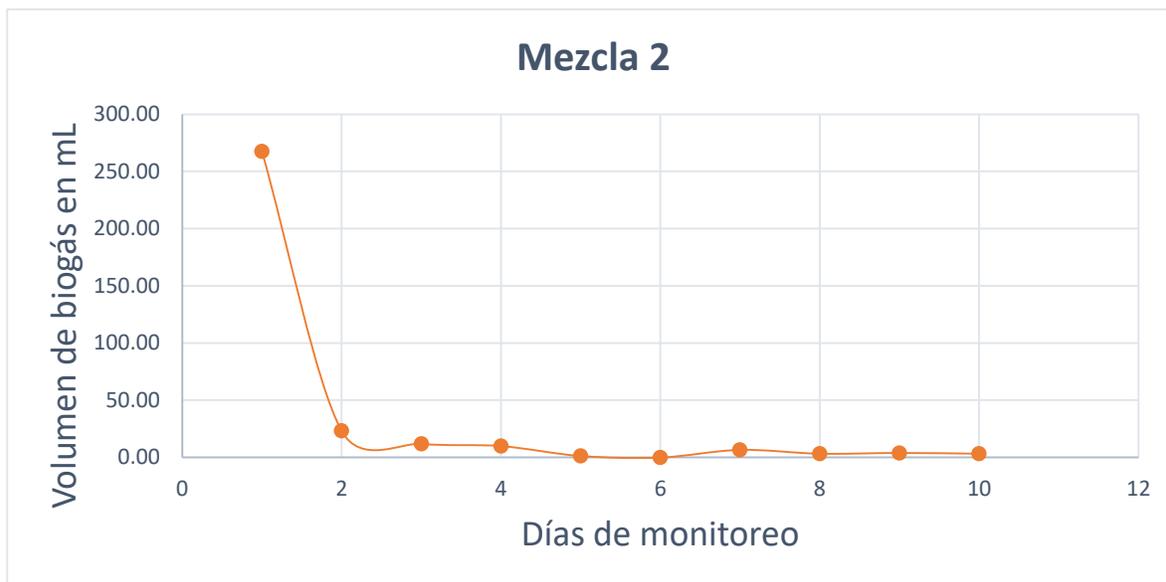


Figura 30. Generación de biogás de la mezcla 2 (M2; 80%E: 20%RA).

El gráfico de la muestra M3 (60%E: 40%) se presenta en la **Figura 31**, en ella el primer día se tiene su máxima producción de biogás con 446.67 mL con la diferencia de que esta producción es mayor a la M2 (80%E: 20RA) en el primer día y disminuye el segundo día a 259.33 mL siendo similar a la máxima producción obtenida el primer día en la M2 (80%E: 20%RA).

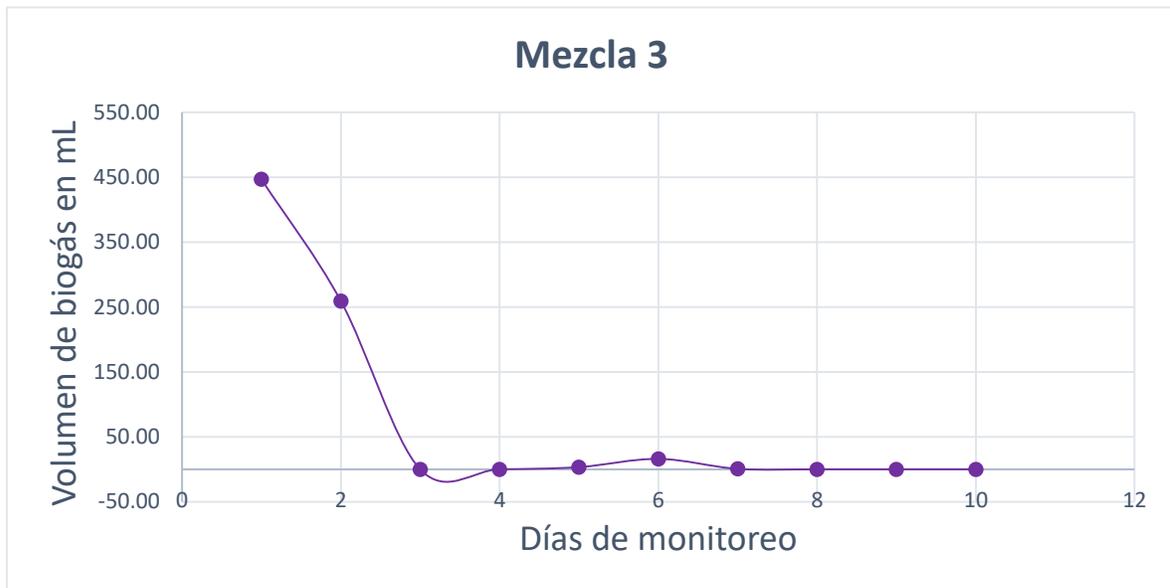


Figura 31. Generación de biogás de la mezcla 3 (M3; 60%E: 40%RA).

En la M4 (40%E: 60%RA) se inicia con una producción de 342 mL de biogás ocurriendo lo contrario a las M2 (80%E: 20%RA) y M3 (60%E: 40%RA) donde la producción de biogás aumenta el segundo día, con 400 mL de biogás. Disminuye la producción el 3 día y se mantiene así con una producción diaria menor al 10 ml de biogás.

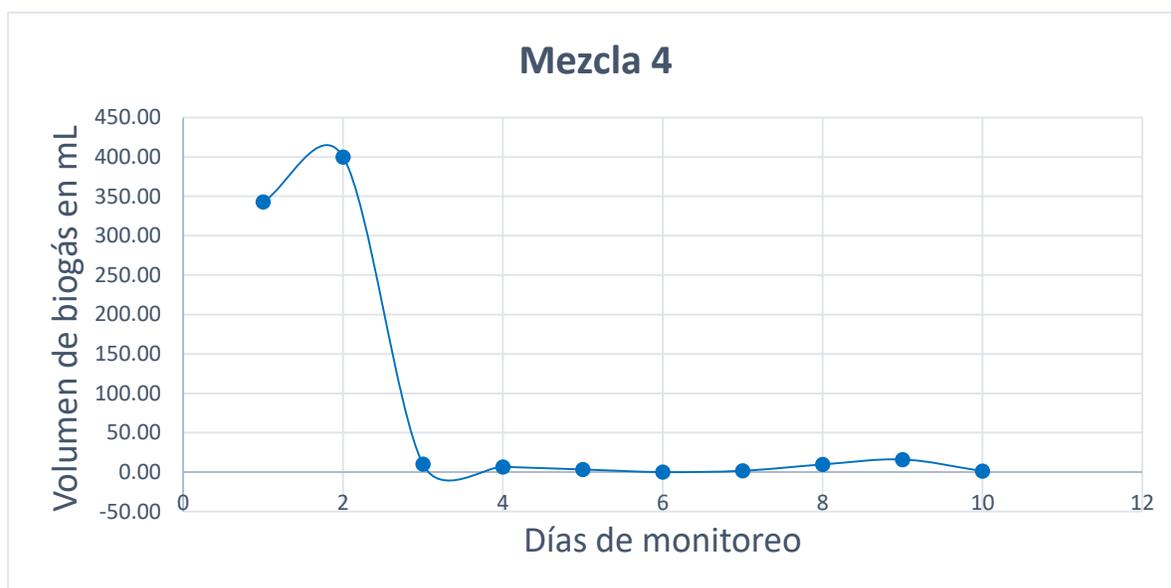


Figura 32. Generación de biogás de la mezcla 4 (M4; 40%E: 60%RA).

En la muestra M5 (20%E: 80%RA), biogás se observa que la producción de biogás fue la máxima en comparación a las otras mezclas.

En la **Tabla 23, Figura 33** se aprecia la evolución de la producción de biogás de la M5 a lo largo de los 10 días de monitoreo, se puede notar que existió una producción continua por 7 días, iniciando con una producción de 234.67 mL, ocurriendo una disminución el día 2 de 20 mL y a partir del tercero esta producción aumenta progresivamente. Encontrándose la mayor diferencia entre el día 2 y 3, donde la producción se dispara y va en aumento hasta el día 6, con una producción de 350 mL a solo 142 mL el día 7.

La máxima producción de biogás ocurrió el día 6.



Figura 33. Generación de biogás de la mezcla 5 (M5; 20%E: 80%RA).

En la muestra M6 de 100% RA su gráfico es presentada en la **Figura 34** donde es posible notar una producción de biogás de 332 mL, el primer día. Sin embargo, al día siguiente esta no vuelve a producir biogás. Posiblemente porque el medio se acidifico, un problema que como reporta la bibliografía es común en la digestión de este tipo de residuos.



Figura 34. Generación de biogás de la mezcla 6 (M6; 0%E: 100%RA).

En la **Figura 35**, se realiza la comparación de las curvas de producción de biogás de cada una de las mezclas. Donde se grafican los promedios de monitoreo de producción de biogás por 24 horas y no por hora de producción.

Durante la experimentación en las mezclas que contenían algún porcentaje de RA la producción de biogás reportada del primer día es solamente el biogás generado en las primeras horas de iniciar, aproximadamente las cinco produjeron ese gas en las primeras cuatro horas.

Fue posible realizar un análisis organoléptico del biogás generado en las primeras horas de dichas mezclas detectando una alta concentración de CO₂ en el biogás.

En las mezclas 2, 3, 4 y 5 la producción de biogás el primer día se debe a los residuos de RA la interacción directa de estos genera en el primer día en su mayoría CO₂, siendo la mezcla 3 y 4 que continua con la producción de biogás el día dos.

A partir de lo anterior se puede inferir que esta producción la ocasiona la presencia de los RA en la mezclas, con base en la producción observada de la M6.

En las muestras M2, M4 y M5 logran una buena producción similar de biogás en el primer día y después esta producción decae, siendo la M5 la única que continua con una producción constante los siguientes días.

En las muestras M3 y M4 son otras mezclas similares, debido a que su producción en el primer día es alta, y se mantiene hasta el siguiente día, aunque en la M3 aumenta y la M4 decae, para en el día 3 dejar de producir biogás.

Como se explicó anteriormente, las curvas de la evolución de la digestión anaerobia inician con una baja producción, de ahí la producción puede decaer hasta llegar a una producción que va en aumento o constante, una vez ocurrido esto se dice que se encuentra estabilizado, con los microorganismos adaptados al medio y que pueden cumplir con las cuatro etapas de la digestión anaerobia.

Se puede afirmar que la única que logra la estabilización RA en el proceso es la M5 de concentración 20% E y 80% en comparación de las otras mezclas.

Donde la producción de biogás inicia en buena proporción (como las mezclas con RA) y esta producción decae el día 2, para que los siguientes días esta producción vaya en aumento

El día siete es el último día de producción ya que el día ocho deja de producir biogás, que es posible se deba a que la materia orgánica ha disminuido y los microorganismos no cuentan con la suficiente para continuar con la producción.

El día seis es la de máxima producción siendo el TRH de la mezcla.

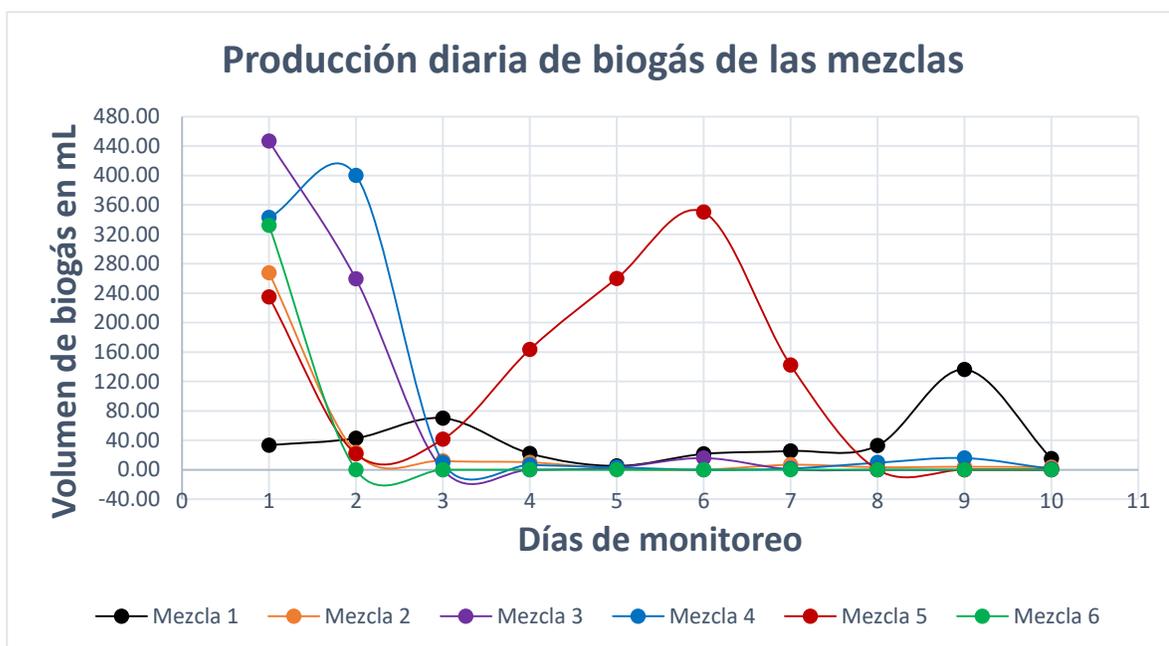


Figura 35. Comparación de la producción diaria de las distintas mezclas.

4.2.4 Relación de parámetros

El potencial de generación de biogás de la M5 por mg de SV es mayor al de la M4 y M3, como se observa en la **Tabla 25**. Es interesante mencionar como los SV Consumidos de la M4 y M5 son similares sin embargo sus producciones son muy diferentes, teniendo mayor rendimiento la M5.

Aunque la producción de biogás de las muestras M4 y la M5, así como sus comportamientos son similares, el rendimiento de la M3 es superior al de la M4.

Tabla 25. Rendimiento de biogás por mg SV

Mezcla	Producción acumulada de biogás (mL)	SV Consumidos (mg/L)	Potencial de generación de biogás por SV (mL/ mg SV)
M5	1,212.67	15.57	77.8648174
M4	786.33	15.20	51.7415336
M3	726.00	11.49	63.1853786

La relación presentada en la **Tabla 26** representa el consumo de DQO por consumo de SV, logrando observar que en la M3 los SV consumidos representan mayor cantidad de materia orgánica, en relación a las M4 y M5 con proporciones similares.

Tabla 26. Relación DQO/SV

DQO _{consumida} (mgO ₂ /L)	SV Consumidos (mg/L)	mg DQO/mg SV
31,500.00	15.57	2022.601772
33,583.33	15.20	2209.817512
41,916.67	11.49	3648.099797

5 Capítulo V Conclusiones

El digester construido cumple con lo necesario para realizar la digestión anaerobia sin embargo requiere de una modificación, en la tapa para asegurar las condiciones anaerobias. La codigestión anaerobia en ella no otorgo los resultados previstos debido a su baja producción de biogás, relacionada a la baja concentración de sólidos y la presencia de ácidos grasos volátiles, que evitan el proceso de la codigestión anaerobia correcta siendo el análisis FOS/TAC que indica esa presencia.

Esta conclusión se sustenta en la poca reducción de sólidos y DQO.

De la experimentación, con los datos recabados se puede concluir que la mezcla 5 de proporción 20% Estiércol: 80%RA, es la mezcla eficiente para la realización de la codigestión anaerobia.

Siendo que, esta mezcla que tiene mayores rendimientos en la remoción de sólidos, de un 28 % respecto a los valores iniciales y una remoción del 41% de la DQO, logrando la máxima producción de biogás siendo esta de 1.212 litros.

Cuyo comportamiento en la producción de biogás se muestra ideal, iniciando con una baja producción de biogás, llegando a una estabilización, con la máxima producción de biogás, en donde ocurrían los mayores remociones de DQO y sólidos, para llegar a un decaimiento del proceso.

6 Recomendaciones

La recomendación más importante de este trabajo de investigación se centra en la modificación de reactor del biodigestor, debido a su manejo y hermeticidad. El Rotoplas es un material liviano y no muy resistente, se recomienda el uso de un reactor de menor dimensión hecho de fibra de vidrio, en donde el diseño y construcción sea dirigido específicamente para llevar a cabo la CDA, con su construcción completamente hermética.

En donde la fibra de vidrio es un material de mayor resistencia a ser deformado y con la facilidad de su construcción completamente hermética, logrando las condiciones anaerobias con mayor facilidad.

Por último hacer uso de las proporciones eficientes de la mezcla 5 de proporción 20% Estiércol: 80%RA encontradas en la experimentación. Que como se observó en la experimentación, tienen la mayor remoción de la DQO y sólidos, con la máxima producción de biogás.

7 Bibliografía

- Abbassi-Guendouz, A., Brockmann, D., Trably, E., Dumas, C., Delgenés, J.-P., Steyer, J.-P., & Renaud, E. (2012). Total solids content drives high solid anaerobic digestion via mass transfer limitation. *Bioresource Technology*, 55-61.
- Agencia Andaluza de la Energía. Consejería de economía, innovación y ciencia. (2011). *Estudio básico del biogás*. Andalucía: Junta de Andalucía.
- AINIA (Departamento de Calidad y Medio Ambiente). (1 de 02 de 2018). *Valoración energética: Producción de biogás mediante Co-Digestión*. Obtenido de COITAV.ORG: http://www.coitavc.org/cms/site_0001/comunicados/AINIA
- Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S., & Janssen, R. (2008). *Biogas Handbook*. Germany: University of Southern Denmark Esbjerg.
- Alcántar González, I. (2014). *Potencial de generación de biogás de la codigestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos con aceite comestible usado*. (Tesis de maestría), Universidad nacional Autónoma de México, D.F, México.
- Alvelais, A. (7 de Junio de 2017). *Alimentos y sustentabilidad*. Obtenido de Residente.mx: <http://rm.residente.mx/reportajes/alimentos-y-sustentabilidad/>
- Angelidaki, L., & Ellegaard, L. (2003). Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 95-105.
- Arrieta Palacios, W. J. (2016). *Diseño de un biodigestor doméstico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado*. (Tesis de pregrado en Ingeniería Mecánico-Eléctrica). Universidad de Piura, Piura, Perú.
- Buenrostro, O., Cram, S., Bernache, G., & Bocco, G. (2000). La digestión anaerobia como alternativa de tratamiento a los residuos sólidos orgánicos generados en los mercados municipales. *REVISTA INTERNACIONAL DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL*, 19-26.

- Campos Pozuelo, A. E. (2001). *Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria*. (Tesis doctoral). Universitat de Lleida, Lérida, España.
- Cheng, Y., Cheng, J. J., & Creamer, K. S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*, 4044-4064.
- Couturier, C. (2 de julio de 2002). *Effets de la digestion anaérobie sur les micropolluants et germes pathogènes*. Obtenido de SOLAGRO: https://solagro.org/images/imagesCK/files/publications/f32_effetsdigmicropoll.pdf
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2008). *Biogas from Waste and Renewable Resources. An introduction*. Weinheim, Alemania: Wiley-VCH Verlag GmbH & KGaA.
- Esposito, G., Frunzo, L., Giordano, A., Pirozzi, F., Panico, A., & Liotta, F. (2012). Anaerobic co-digestion of organic wastes. *Environmental Science Biotechnology*, 325–341.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR). (2010). *Guide to Biogas: From production to use*. Gülzow, Germania : FNR, Abt. Öffentlichkeitsarbeit.
- Flotats, X., Campos, E., Palatsi, J., & Bonmatí, A. (2001). Digestión anaerobia de purines de cerdo y co-digestión con residuos de la industria alimentaria. *Monografías de actualidad*, 51-65.
- Foster Carneiro, T. (2005). *Digestión anaerobia termofílica seca de residuos sólidos urbanos: estudio de las variables del proceso en el arranque y estabilización del bio-reactor*. (Tesis Doctoral). Universidad de Cádiz, Cádiz, España.
- García Rodríguez, A. M., & Gómez Franco, J. (2016). *Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos vegetales obtenidos en la central de abastos de bogotá mediante digestión anaerobia*. (Tesis de licenciatura) . FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMERICA, Bogotá, Colombia.
- Gobierno de Chile, M. d., (PNUD), P. d., (FAO), O. d., & (GEF), G. E. (2011). *Manual de biogás*. Santiago de Chile, Chile: FAO.

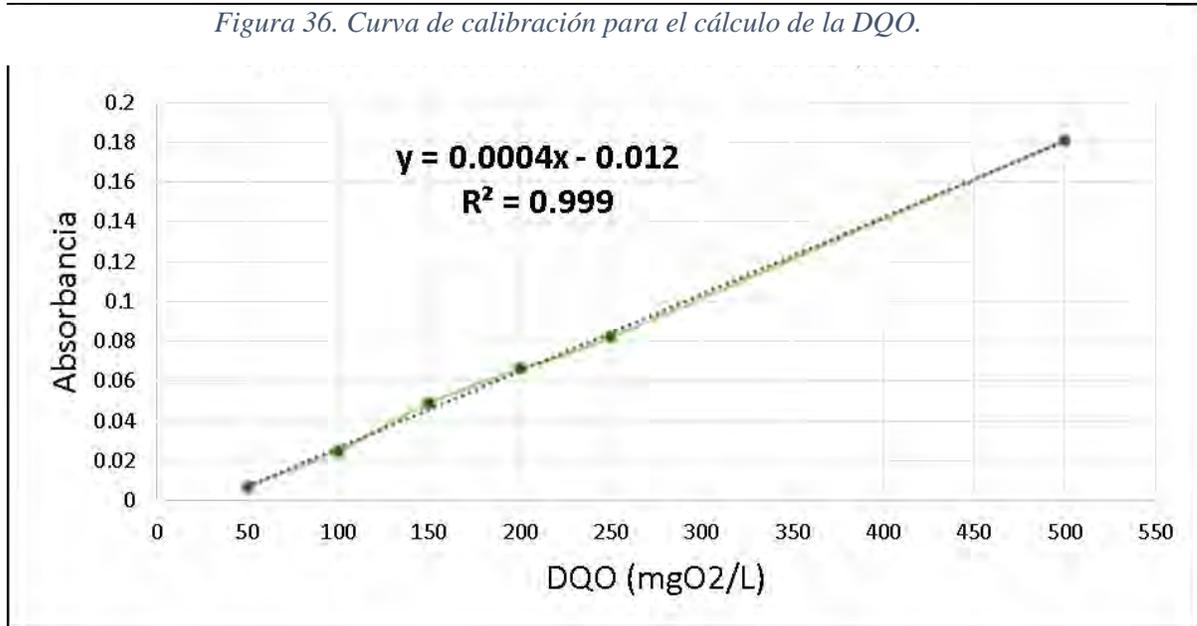
- Hamilton, D. W. ((s.f)). *Anaerobic Digestion of Animal Manures: Understanding the Basic Processes*. Oklahoma: Oklahoma Cooperative Extension Service.
- Lo, I., & Chiu, S. (2016). Reviewing the anaerobic digestion and co-digestion process of food waste from the perspectives on biogas production erformance and environmental impacts. *Environmental Science and Pollution Research*, 24435–24450.
- Lorenzo Acosta, Y., & Obaya Abreu, M. C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA.Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 35-48.
- Martínez, A. (2013). *Optimización de la producción de metano a partir. MAESTRO EN INGENIERÍA*. (Tesis de Maestría). UNIVERSISIDAD AUTONOMA DE MÉXICO, México, D.F.
- Medrano Róldan, H. (2006). Biorremediación para la contaminación ambiental agropecuaria. *Chapingo Serie Zonas Áridas (RChSZA)*, 117-130.
- Moncayo Romero, G. (2013). *Dimensionamiento y diseño de biodigestores y plantas de biogás*. Uelzen , Alemania: Aqualimpia Beratende Ingenieure.
- Ramírez Castllo, M. L., & Cuatutle Tecanhuey, G. (Marzo de 2013). *CIENCIA Y DESARROLLO*. Recuperado el 2 de Octubre de 2016, de CONACYT: <http://www.cyd.conacyt.gob.mx/264/articulos/tratamiento-residuos-sólidos-organicos.html>
- renac: renewables academy. (s.f). *Technologie du biogaz et biomasse*. Berlin: Renewables Academy (RENAC) AG.
- Salamanca Tamayo, J. A. (2009). *Diseño, Construcción y Puesta en Marcha de un Biodigestor a Escala Piloto para la Generación de Biogás y Fertilizante Orgánico* . (Tesis de Licenciatura), Universidad San Francisco Quito, Quito, Ecuador. .
- Schnürer, A., & Jarvis, Å. (2009). *Microbiological Handbook for Biogas Plants*. Malmö: Avfall Sverige.

- Soria Fregoso, M. d., Ferrera Cerrato, R., Etcheveres, B. J., Alcántar González, G., Trinidad Santos, J., Borges Gómez, L., & Pereyda Pérez, G. (2001). Produccion de biofertilizantes mediante biodigestion de excreta liquida de cerdo. *Terra*, 353-362.
- Tauseef, S. M., Premalatha, M., Abbasi, T., & Abassi, S. A. (2013). Methane capture from livestock manure. *Journal of Environmental Management*, 187-207.
- Wellinger, A., Jerry, M., & David, B. (2013). *The biogas handbook, Science production and applications*. Woodhead Publishing Limited. IEA Bioenergy.

8 Referencias y Anexos

8.1 Figuras

Figura 36. Curva de calibración para el cálculo de la DQO.



9 Anexos

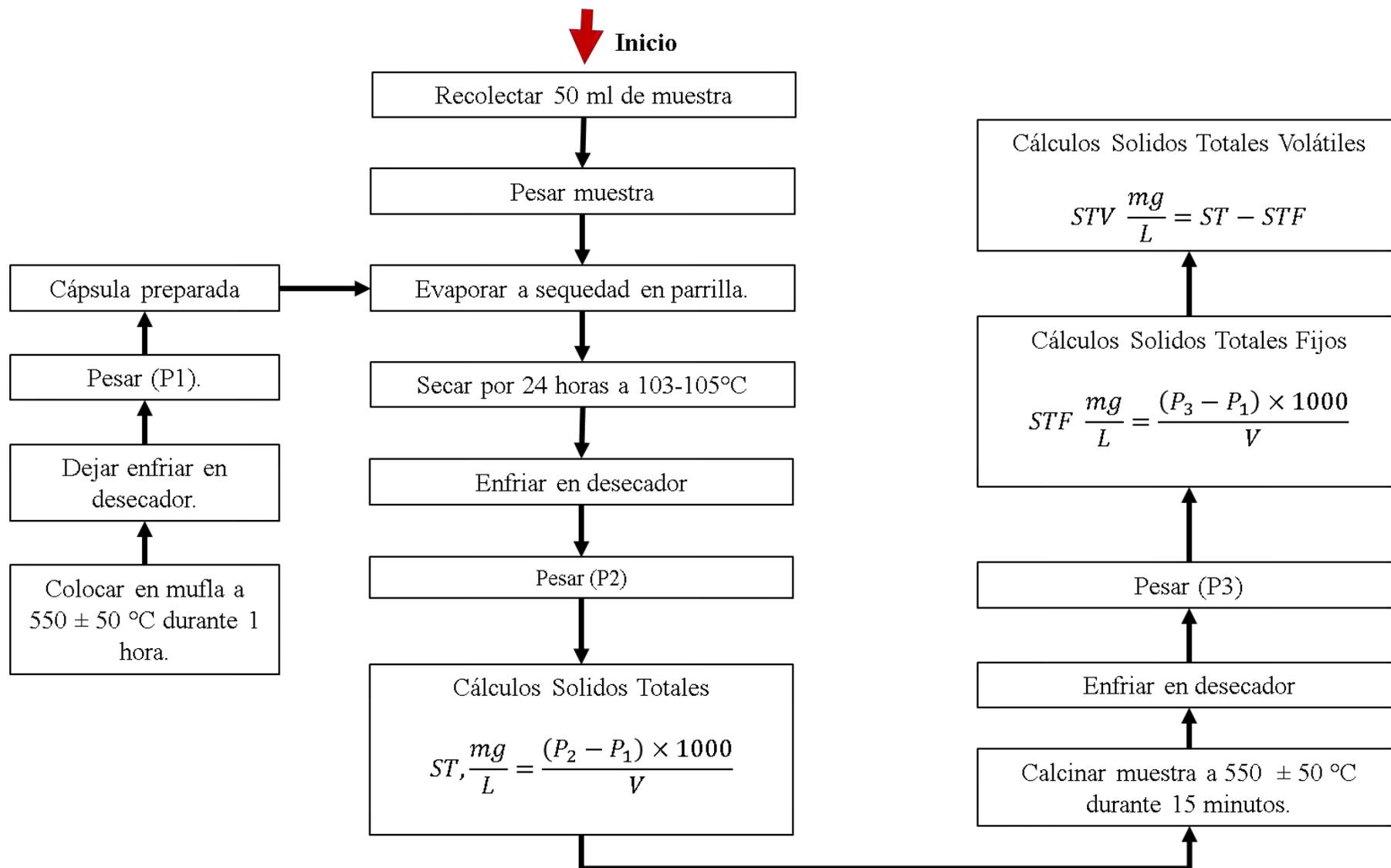


Figura 37. Metodología para el análisis de los sólidos.

Valor de la relación FOS/TAC	Antecedentes	Medida
>0.6	Excesiva sobrealimentación de biomasa.	Interrumpir la adición de biomasa.
0.5-0.6	Excesiva entrada de biomasa	Agregar menos biomasa.
0.4-0.5	La planta está muy cargada	Vigilar la planta más estrechamente.
0.3-0.4	La producción de gas es máxima.	Mantener constante la entrada de biomasa.
0.2-0.3	La entrada de biomasa es muy baja.	Aumentar lentamente la entrada de biomasa.
<0.2	La entrada de biomasa es bajísima.	Aumentar rápidamente la entrada de biomasa.

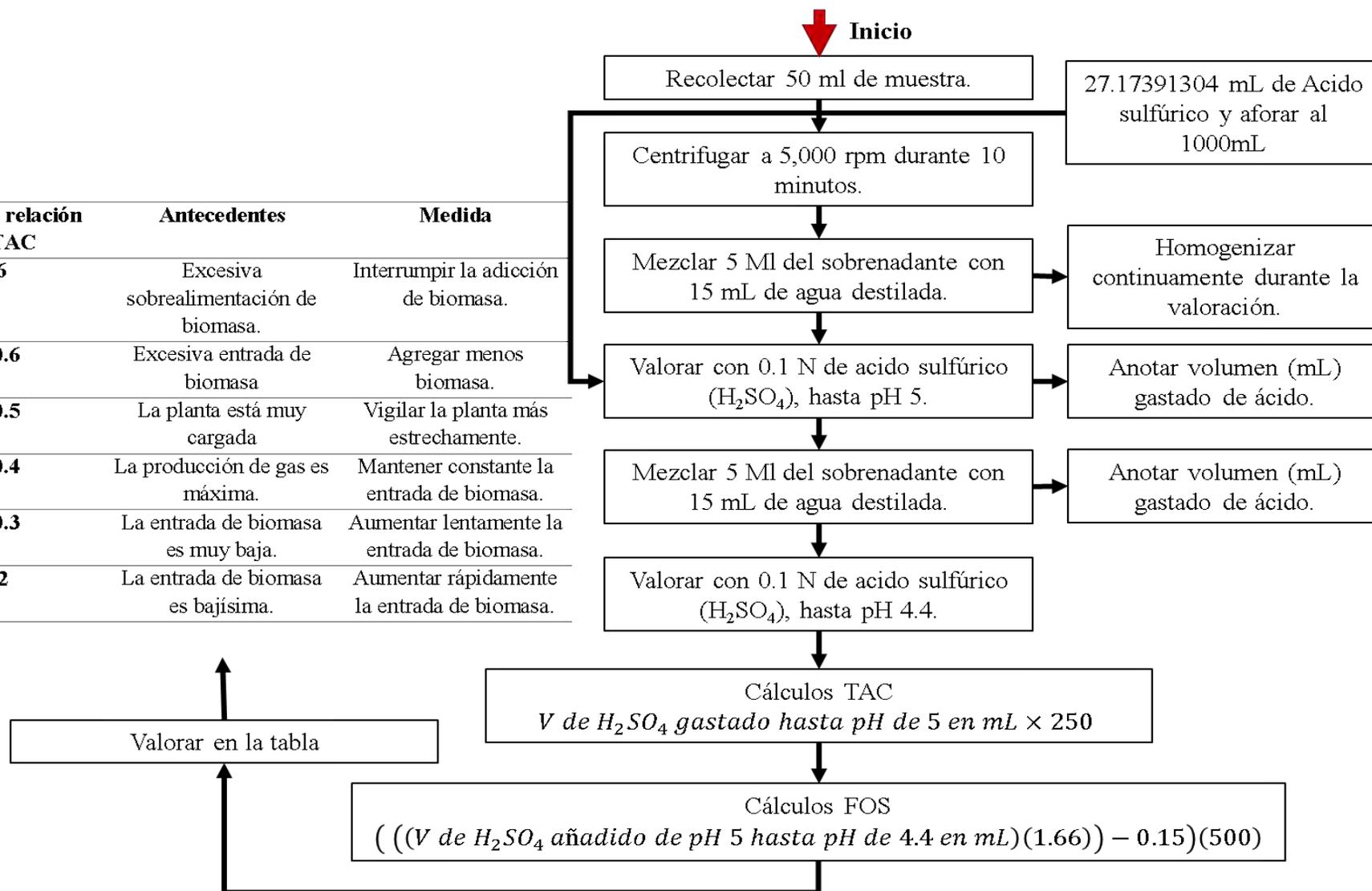


Figura 38. Metodología de análisis de la relación FOS/TAC

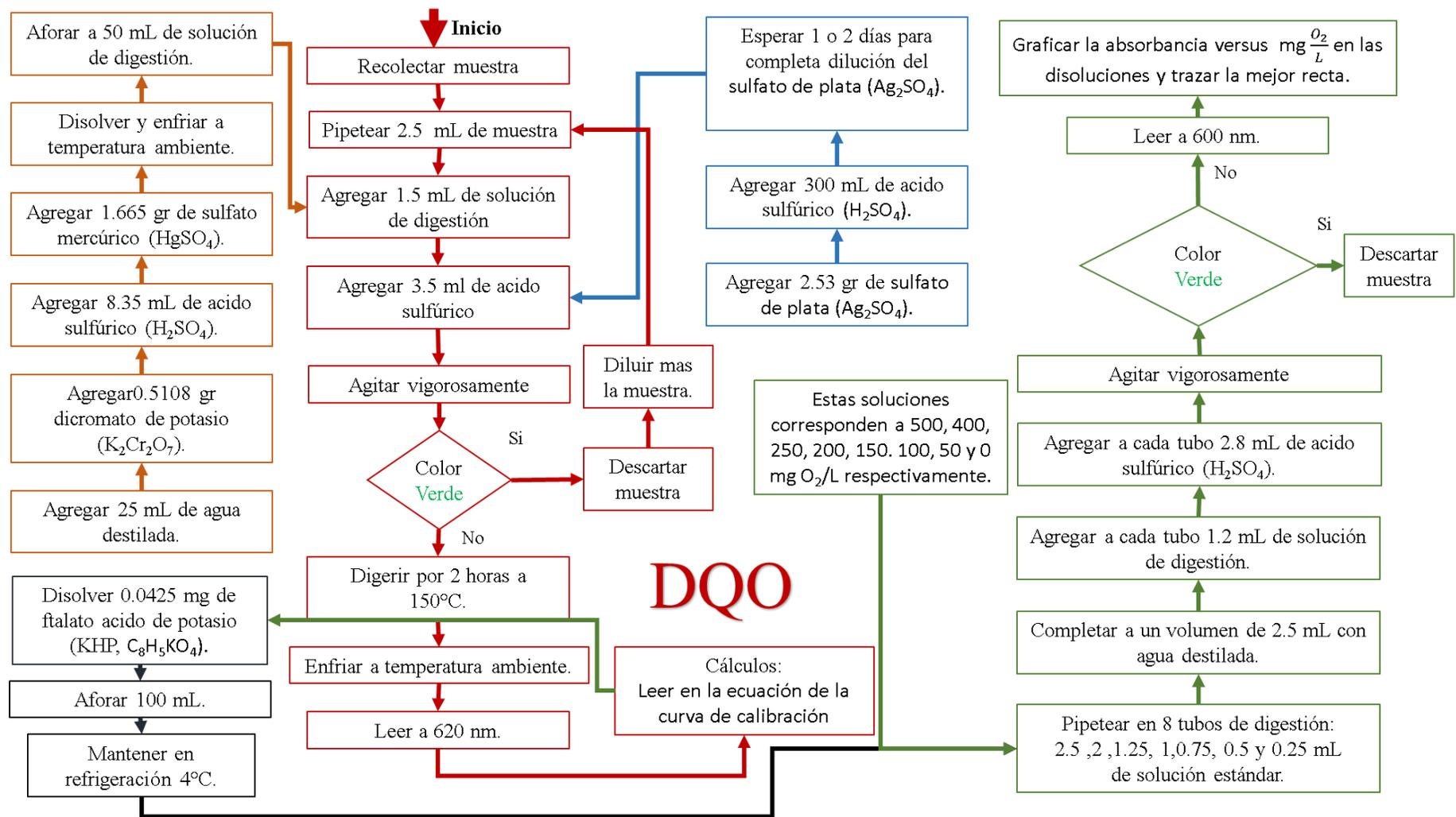


Figura 39. Metodología análisis DQO.