

“2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón”

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

**“Tratamiento y minimización del lactosuero,
en un reactor anaerobio híbrido para la
producción de bioenergéticos.”**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA QUÍMICA**

PRESENTA:

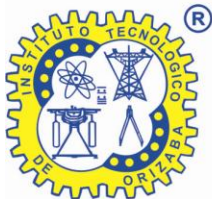
I.Q. José Luis González García

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Alejandro Alvarado Lassman

CODIRECTOR DE TESIS:

Dr. Juan Manuel Méndez Contreras



Orizaba, Veracruz, México.

Febrero 2016



"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

FECHA: 03/02/2016
DEPENDENCIA: POSGRADO
ASUNTO: Autorización de Impresión
OPCIÓN: I

C. JOSÉ LUIS GONZÁLEZ GARCÍA
CANDIDATO A GRADO DE MAESTRO EN:
CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros de Enseñanza Técnica Superior, dependiente de la Dirección General de Institutos Tecnológicos de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

"TRATAMIENTO Y MINIMIZACIÓN DEL LACTOSUERO, EN UN REACTOR ANAEROBIO HÍBRIDO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOENERGÉTICOS. "

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

A T E N T A M E N T E

M.C. MA. ELENA GARCÍA REYES
JEFE DE LA DIV. DE ESTUDIOS DE POSGRADO



SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

INSTITUTO
TECNOLÓGICO
DE ORIZABA

ggc





"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

FECHA : 01/02/2016

ASUNTO: Revisión de Trabajo Escrito

C. M.C. MA. ELENA GARCÍA REYES
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACION.
P R E S E N T E

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C. :

JOSÉ LUIS GONZÁLEZ GARCÍA

la cual lleva el título de:

"TRATAMIENTO Y MINIMIZACIÓN DEL LACTOSUERO, EN UN REACTOR ANAEROBIO HÍBRIDO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOENERGÉTICOS. "

Y concluyen que se acepta.

A T E N T A M E N T E

PRESIDENTE : DR. **ALEJANDRO ALVARADO LASSMAN**

SECRETARIO : DR. **JUAN MANUEL MENDEZ CONTRERAS**

VOCAL : M.I. **NORMA ALEJANDRA VALLEJO CANTU**

VOCAL SUP. : M.I. **ADRIAN REYES BENITEZ**

FIRMA

FIRMA

FIRMA

FIRMA

EGRESADO(A) DE LA MAESTRIA EN **CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA**

OPCION: I **Tesis**



DEDICATORIAS

A **Dios** por acompañarme en cada momento de mi vida, incluso en los más difíciles y darme la fuerza necesaria para seguir adelante. Gracias Dios mío.

A mi madre **Paula García Cortes**, porque no pudo existir en mi vida una mejor persona y nunca terminaré de agradecerle a Dios por haberme permitido conocerle, sé que siempre guiarás mis pasos y los de mis hermanos desde el cielo y ten por seguro que cada día lucharemos para que te sientas muy orgullosa de nosotros. Te amamos mucho y te extrañamos, pero también sé que algún día te volveremos a ver y estaremos juntos para siempre, porque esto no fue un adiós, sino un hasta luego. Por todo tu amor y entrega: “**Gracias mami**”

A mis maravillosos hermanos **Ángeles, Jesica y Ángel** por acompañarme en cada momento de la vida y demostrarme que a pesar de todo lo que hemos vivido somos una gran familia de triunfadores. Los amo mucho.

Al amor de mi vida **Cristina** por comprenderme, apoyarme y amarme incondicionalmente, porque tu amor es lo que me da fuerza para ser mejor cada día y siempre daré gracias a Dios por haberte puesto en mi camino. Te amo mucho bonita.

A mis abuelos **Gloria y Crispín** por quererme, apoyarme y darme tan sabios e invaluable consejos. Ruego a Dios que siempre los llene de bendiciones a ustedes y toda su familia, porque nunca podré pagarles lo que han hecho por mí. Gracias, los quiero mucho.

A mis amigos **José Ulises y Emilio** por su apoyo y confianza a lo largo de todos estos años, porque hemos alcanzado muchas metas juntos y sé que siempre podré contar con ustedes de la misma forma en que ustedes contarán conmigo. Gracias por su amistad.

RECONOCIMIENTOS

Al **Dr. Alejandro Alvarado Lassman** por permitirme formar parte de su equipo de trabajo y por su incomparable guía como director de tesis.

Al **Dr. Juan Manuel Méndez Contreras** por su valioso apoyo como codirector de tesis y por su amplia disposición para el desarrollo de este trabajo.

A la **M. I. Q. Norma Alejandra Vallejo Cantú** por los aportes realizados al presente manuscrito y su dedicación como profesora de esta institución.

Al **M. I. A. Adrián Reyes Benítez** por los aportes realizados en la redacción de este trabajo y su gran entrega profesional dentro de esta institución.

A la **M. C. Maria Elena García Reyes, M. I. A. Alicia Agueda Conde Islas y M. C. Gabriela Cabrera Zepeda** por su integridad, humildad y humanismo al desempeñar sus funciones dentro de esta institución, porque sin su apoyo no hubiera sido posible culminar el proceso para la obtención del grado. Gracias.

Al **Dr. Arturo Alvarado Lassmann** por el valioso apoyo proporcionado durante la etapa experimental de este proyecto.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por el apoyo otorgado mediante la beca con número de registro 586642 en el periodo Enero 2014 – Enero 2016, con la cual fue posible concluir mis estudios de maestría.

A la **División de Estudios de Posgrado e Investigación** por permitirme cursar en sus aulas mis estudios de maestría y emplear sus instalaciones para realizar el presente trabajo.

RESUMEN

Tratamiento y minimización del lactosuero, en un reactor anaerobio híbrido para la producción de bioenergéticos

Elaborado por: I.Q. José Luis González García

Dirigida por: Dr. Alejandro Alvarado Lassman

Dr. Juan Manuel Méndez Contreras

La digestión anaerobia es uno de los procesos biológicos más viables para el tratamiento de residuos con un alto contenido de materia orgánica como es el caso del lactosuero, debido a los bajos requerimientos de energía que demanda este proceso, las altas eficiencias de remoción de materia orgánica y la considerable producción de bioenergéticos.

La problemática del lactosuero no solo radica en su elevada capacidad contaminante, sino también en su gran producción, ya que por cada 10 L de leche de vaca se producen 1-2 kg de queso y 8-9 kg de suero. A nivel mundial se calcula una producción anual de aproximadamente 142,640,000 T de suero de las cuales 2,534,952 T son producidas en México, lo cual representa una fuente potencial de energía y su incorrecta disposición ambiental se traduce en una pérdida significativa de recursos y serios problemas de contaminación (Kavacik y Topaloglu, 2010).

En este trabajo se utilizó el lactosuero como sustrato para alimentar un reactor anaerobio híbrido conformado por un lecho fijo (polietileno cilíndrico corrugado) y un lecho fluidizado (ExtendsphereTM) con la finalidad de remover la mayor cantidad posible de materia orgánica presente en el mismo mediante el proceso de digestión anaerobia. Los resultados de este trabajo muestran que el reactor híbrido empleado alcanzó remociones de hasta 70% de la DQO y SVT presentes en el lactosuero con una Cva de 7 gDQOs/L·d sin presentar problemas de acidificación y obteniendo entre 3.2 - 3.8 L_{biogás}/L_{Reactor}·d con un porcentaje de metano del 60%. Además se reporta la formación de nata en el interior del reactor como un problema de operación ocasionado por el lactosuero y los resultados de emplear un pretratamiento termocálcico como posible solución de dicho problema.

ABSTRACT

Whey treatment and minimization using an anaerobic hybrid reactor for producing bioenergetics

By: Ch.E. José Luis González García

Advisor(s): Ph.D. Alejandro Alvarado Lassman

Ph.D. Juan Manuel Méndez Contreras

Anaerobic digestion is one of more viable biological processes for treatment of residues which have a big organic matter quantity such as cheese whey, because of low energy requirements, high organic matter removal efficiency and great biogas production.

The problem of cheese whey is not just its big pollutant capacity, but besides it is produced in big quantities, because of its production is calculated around of 8 to 9 kg of cheese whey and 1 to 2 kg of cheese from 10 L of cow milk. Worldwide cheese whey production is around 142,640,000 T from which 2,534,952 T are produced in Mexico, this represents a big potential energy source and its wrong environmental disposal means a considerable resources lost and serious pollutant problems.

In this research was used cheese whey to feed an anaerobic hybrid reactor conformed for a fixed bed (corrugated cylindrical polyethylene) and a fluidized bed (ExtendsphereTM) with the purpose to remove the major organic matter as possible from effluent by anaerobic digestion process. Results of this research shows that the anaerobic hybrid reactor used reached COD and TVS removal around 70% from cheese whey feeding an OLR of 7 gCODs/L·d without any acidification problem and getting a biogas production between 3.2 – 3.8 L_{biogas}/L_{Reactor} ·d with 60% of methane. Besides skim production inside of the reactor as an operation problem and results of using a thermo-calcic pretreatment as possible solution of this problem are reported in this research.

ÍNDICE

	Pág.
Lista de figuras.....	IV
Lista de tablas.....	VI
Nomenclatura.....	VIII
Introducción.....	1
Objetivos.....	3
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	4
1.1 Industria láctea en México.....	5
1.1.1 Leche.....	6
1.1.2 Queso.....	7
1.1.2.1 Proceso para la fabricación del queso fresco.....	8
1.1.2.2 Constituyentes del queso.....	9
1.1.3 Lactosuero.....	10
1.1.3.1 Producción de lactosuero.....	11
1.1.3.2 Características del lactosuero.....	11
1.2 Tratamiento de aguas residuales.....	13
1.2.1 Tratamientos biológicos.....	15
1.2.1.1 Sistemas aerobios.....	16
1.2.1.2 Sistemas anaerobios.....	17
1.2.2 Clasificación de los reactores según su generación.....	19
1.2.3 Tratamiento de aguas residuales de la producción de queso.....	19
1.3 Digestión anaerobia.....	20
1.3.1 Etapas de la digestión anaerobia.....	22
1.3.1.1 Hidrólisis.....	22
1.3.1.2 Acidogénesis.....	22
1.3.1.3 Acetogénesis.....	23
1.3.1.4 Metanogénesis.....	24
1.3.2 Factores que afectan la digestión anaerobia.....	25
1.3.2.1 Características del residuo.....	26

1.3.2.2 Dilución del residuo.....	26
1.3.2.3 Materiales tóxicos.....	26
1.3.2.4 Nutrientes.....	27
1.3.2.5 Temperatura.....	27
1.3.2.6 pH.....	28
1.3.2.7 Tiempo de Retención Hidráulico (TRH).....	28
1.3.2.8 Carga volumétrica aplicada (Cva).....	29
1.3.3 Ventajas y desventajas del proceso de digestión anaerobia.....	29
1.3.3.1 Ventajas.....	29
1.3.3.2 Desventajas.....	30
1.3.4 Digestión anaerobia del lactosuero.....	30
1.4 Biogás.....	31
1.4.1 Características del biogás.....	32
1.4.2 Equivalencia energética del biogás.....	33
1.5 Fermentación oscura.....	35
1.5.1 Fermentación oscura del lactosuero.....	36
1.6 Reactores de Lecho Fluidizado Inverso (RLFI).....	36
1.7 Reactores híbridos.....	38
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	40
2.1 Lactosuero.....	42
2.1.1 Caracterización del lactosuero.....	42
2.1.2 Acondicionamiento del lactosuero.....	42
2.2 Reactor híbrido.....	45
2.2.1 Descripción del reactor híbrido.....	45
2.2.2 Características generales del soporte utilizado.....	46
2.2.3 Condiciones iniciales del reactor.....	49
2.2.4 Preparación del reactor para el arranque.....	49
2.2.5 Arranque del reactor híbrido.....	50
2.2.6 Monitoreo del reactor híbrido.....	52
2.2.7 Estabilización del reactor híbrido.....	53

2.2.7.1 Adición de micronutrientes al sustrato.....	53
2.3 Incremento de la Cva.....	53
2.4 Análisis del efluente para su valoración en el cumplimiento con la NOM..	54
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	57
3.1 Lactosuero.....	58
3.1.1 Caracterización del lactosuero.....	58
3.1.2 Acondicionamiento del lactosuero.....	60
3.2 Reactor híbrido.....	61
3.2.1 Arranque, estabilización y monitoreo del reactor híbrido.....	61
3.2.1.1 Incremento de la Cva.....	61
3.2.1.2 Ajuste de pH de alimentación.....	62
3.2.1.3 pH de alimentación y salida del reactor.....	63
3.2.1.4 Remoción de la DQO en un reactor anaerobio híbrido.....	65
3.2.1.5 Remoción de SVT en un reactor anaerobio híbrido.....	66
3.2.1.6 Análisis del soporte.....	67
3.3 Biogás.....	70
3.3.1 Producción.....	70
3.3.2 Composición.....	71
3.4 Problemas de operación.....	73
3.4.1 Formación de nata.....	73
3.4.2 Tratamiento termo-cálcico.....	74
3.4.2.1 Coagulación-Floculación del soporte.....	76
3.5 Análisis de resultados con la NOM.....	77
Conclusiones y recomendaciones.....	80
Referencias bibliográficas.....	90

LISTA DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1.1	Principales estados productores de leche de bovino 2009-2014..	6
Figura 1.2	Proceso para la fabricación del queso fresco.....	8
Figura 1.3	Lactosuero.....	10
Figura 1.4	Flujo de energía de los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales.....	18
Figura 1.5	Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica de materiales poliméricos.....	21
Figura 1.6	Equivalencias de biogás con otras fuentes de energía.....	34
Figura 1.7	Esquema de un reactor de lecho fluidizado inverso.....	38
Figura 2.1	Metodología general del proyecto.....	41
Figura 2.2	Aglomeración de proteínas por ajuste de pH en el lactosuero.....	44
Figura 2.3	Lactosuero reposado 24 horas con separación de materia insoluble en la parte superior.....	44
Figura 2.4	Diagrama esquemático de la configuración del reactor híbrido....	45
Figura 2.5	Extendsphere™ analizado al microscopio.....	46
Figura 2.6	Soporte Extendsphere™ en el interior del reactor híbrido.....	47
Figura 2.7	Malla de polietileno para sostener el lecho fijo.....	48
Figura 2.8	Polietileno cilíndrico corrugado sin recubrimiento de nitrocelulosa.....	48
Figura 2.9	Polietileno cilíndrico corrugado con recubrimiento de nitrocelulosa.....	48
Figura 2.10	Lecho fijo instalado en el interior del reactor.....	49
Figura 2.11	Mantenimiento del reactor híbrido previo al arranque.....	50
Figura 2.12	Lecho fluidizado (altura = 16 cm).....	51
Figura 2.13	Lecho fluidizado adicionado con soporte precolonizado (altura = 22 cm).....	51
Figura 3.1	Lactosuero acondicionado y con adición de NaHCO ₃ para ajuste de pH.....	60

Figura 3.2	Gráfica de arranque y estabilización del reactor e incremento de la Cva.....	62
Figura 3.3	Gráfica de la variación del pH dentro del tanque de alimentación	63
Figura 3.4	Gráfica de comparación de pH de entrada y salida del reactor híbrido.....	64
Figura 3.5	Gráfica de remoción de DQO en un reactor híbrido.....	66
Figura 3.6	Gráfica de remoción de SVT en un reactor híbrido.....	67
Figura 3.7	Soporte inferior colonizado observado a 10x de aumento.....	69
Figura 3.8	Soporte inferior colonizado observado a 40x de aumento.....	69
Figura 3.9	Soporte inferior colonizado observado a 100x de aumento.....	69
Figura 3.10	Gráfica de producción de biogás.....	70
Figura 3.11	Gráfica de composición de biogás.....	72
Figura 3.12	Presencia de nata en el lecho fijo.....	73
Figura 3.13	Presencia de nata en el lecho fluidizado.....	73
Figura 3.14	Diagrama del desplazamiento del lecho fluidizado por la presencia de nata en el interior del reactor híbrido.....	74
Figura 3.15	Vista frontal del lactosuero bruto y el lactosuero tratado.....	75
Figura 3.16	Vista inferior del lactosuero bruto y el lactosuero tratado.....	75
Figura 3.17	Reactor híbrido durante el proceso de coagulación-floculación del Extendosphere™ colonizado.....	76
Figura 3.18	Proceso de sedimentación de los flóculos formados por Extendosphere™ colonizado.....	76
Figura 3.19	Extendosphere™ colonizado completamente sedimentado.....	77
Figura R.1	Proceso para el tratamiento de agua residual proveniente del sector lácteo.....	86
Figura R.2	Proceso para el tratamiento de agua residual proveniente de la central lechera situada en Castañeda, España.....	87
Figura R.3	Proceso para el tratamiento de agua residual láctea empleando un sistema lagunar.....	88

LISTA DE TABLAS

	Pág.	
Tabla 1.1	Distribución de los sólidos de 100 kg de leche entre el queso blanco y el lactosuero.....	7
Tabla 1.2	Constituyentes del queso.....	9
Tabla 1.3	Composición media de lactosuero.....	12
Tabla 1.4	Ventajas y desventajas de los procesos aerobios.....	16
Tabla 1.5	Ventajas y desventajas de los procesos anaerobios.....	17
Tabla 1.6	Tiempo de regeneración de microorganismos.....	26
Tabla 1.7	Información del tratamiento anaerobio de lactosuero.....	31
Tabla 1.8	Características generales del biogás.....	32
Tabla 1.9	Energía equivalente (valor energético) de biogás contra otras fuentes.....	34
Tabla 2.1	Parámetros analizados al lactosuero.....	42
Tabla 2.2	Características de las proteínas del lactosuero.....	43
Tabla 2.3	Características del reactor híbrido.....	46
Tabla 2.4	Propiedades físicas del soporte.....	47
Tabla 2.5	Parámetros monitoreados durante la operación del reactor híbrido	52
Tabla 2.6	Micronutrientes adicionados para la estabilización del reactor híbrido.....	53
Tabla 2.7	Comparación entre DBO ₅ real y DBO ₅ calculada.....	54
Tabla 2.8	Evaluación de relación DQO-DBO ₅ contra datos reales.....	56
Tabla 3.1	Caracterización del lactosuero.....	58
Tabla 3.2	Comparación de los resultados de la caracterización del lactosuero.....	59
Tabla 3.3	Caracterización del lactosuero antes y después del acondicionamiento.....	61
Tabla 3.4	Microscopía del soporte colonizado.....	68

Tabla 3.5	Caracterización del lactosuero antes y después del tratamiento termo-cálcico.....	75
Tabla 3.6	Tabla 2 de la NOM-001-SEMARNAT-1996.....	78
Tabla 3.7	Cálculo de la DBO ₅ empleando diferentes relaciones.....	79
Tabla R.1	Eficiencias de reducción de niveles contaminantes (valores basados en experiencias en Chile).....	85
Tabla R.2	Tratamientos recomendados para la depuración de aguas residuales del sector lácteo.....	85
Tabla R.3	Composición fisicoquímica del efluente del sector lácteo a la entrada y salida de la planta de tratamiento situada en Granada, España.....	87

NOMENCLATURA

Abreviatura	Significado	Unidad
AGV's	Ácidos Grasos Volátiles	mg/L
C/N	Relación carbono/nitrógeno	-----
Ca	Calcio	-----
CaCO ₃	Carbonato de calcio	-----
CH ₃ COO ⁻	Ión acetato	-----
CH ₄	Metano	-----
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua	-----
CO ₂	Dióxido de carbono	-----
CSTR	Reactor continuo de tanque agitado	-----
Cva	Carga volumétrica aplicada	mgDQO/L·d
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno	mgDBO/L
DQO	Demanda Química de Oxígeno	mgDQO/L
DQO _T	Demanda Química de Oxígeno total	mgDQO/L
DQO _{T ENT}	Demanda Química de Oxígeno total de la entrada del reactor	mgDQO/L
DQO _{T SAL}	Demanda Química de Oxígeno total de la salida del reactor	mgDQO/L
DQO _S	Demanda Química de Oxígeno soluble	mgDQO/L
DQO _{S ENT}	Demanda Química de Oxígeno soluble de la entrada del reactor	mgDQO/L
DQO _{S SAL}	Demanda Química de Oxígeno soluble de la salida del reactor	mgDQO/L
<i>et al</i>	Y colaboradores	-----
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura	-----
H ₂	Hidrógeno diatómico	-----
H ₂ O	Agua	-----
H ₂ S	Ácido Sulfhídrico	-----

IDEA	Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía	-----
INAES	Instituto Nacional de la Economía Social	-----
K	Potasio	-----
N	Nitrógeno	-----
NaHCO ₃	Bicarbonato de sodio	-----
NH ₄ ⁺	Ión amonio	-----
O ₂	Oxígeno diatómico	-----
P	Fósforo	-----
pH	Potencial de hidrógeno	-----
Q	Caudal	L/h
RISE-AT	Centro de Servicios de Información Regional para el Sudeste Asiático en Tecnología Apropriada	-----
RLFI	Reactor de lecho fluidizado inverso	-----
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación	-----
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales	-----
SENA	Servicio Nacional de Aprendizaje	-----
SIAP	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera	-----
SST	Sólidos Suspendidos Totales	g/L
SVT _{ENT}	Sólidos Volátiles Totales de la entrada del reactor	g/L
SVT _{SAL}	Sólidos Volátiles Totales de la salida del reactor	g/L
ST	Sólidos Totales	g/L
SVT	Sólidos Volátiles Totales	g/L
SFT	Sólido Fijos Totales	g/L
TRH	Tiempo de Residencia Hidráulico	D
UASB	Manto de lodo anaerobio de flujo ascendente	-----
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos	-----
US EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos	-----
V	Volumen	m ³

INTRODUCCIÓN

El lactosuero es un subproducto de la producción de queso, este efluente es un líquido amarillito verdoso y puede ser considerado como leche libre de caseína y grasas (Carvalho *et al.*, 2013), dicho residuo posee una alta DQO, por lo cual es considerado como un efluente potencialmente contaminante.

La problemática del lactosuero no solo radica en su elevada capacidad de contaminación, sino también en la gran producción de este efluente, ya que se estima que a partir de 10 L de leche de vaca se puede producir de 1 a 2 kg de queso y un promedio de 8 a 9 kg de suero. A nivel mundial se calcula una producción anual de aproximadamente 142,640,000 T de suero de las cuales 2,534,952 T son producidas en México, lo cual representa una fuente potencial de energía y su incorrecta disposición ambiental se traduce en una pérdida significativa de recursos y serios problemas de contaminación (Kavacik y Topaloglu, 2010).

Las características contaminantes del suero de leche y la gran cantidad de ácido láctico presente en él alteran significativamente los procesos biológicos que se llevan a cabo en las plantas de tratamiento aumentando los costos, por lo que para el tratamiento de suero lácteo, preferentemente se aplican tratamientos biológicos antes de que sea vertido a los suelos y ríos (Valencia-Denicia y Ramírez-Castillo, 2009).

La digestión anaeróbica es uno de los procesos biológicos más viables para el tratamiento de residuos que presentan un alto contenido de materia orgánica, como es el caso del lactosuero, debido a los bajos requerimientos de energía que demanda este proceso, las altas eficiencias de remoción de materia orgánica y la considerable producción de bioenergéticos. Sin embargo se debe considerar que dicho residuo es particularmente un sustrato difícil de tratar en digestores anaeróbicos con cargas elevadas ya que tiende a acidificarse rápidamente, lo cual reduce la eficiencia del proceso.

El proceso de digestión anaerobia ocurre cuando la materia orgánica (en forma líquida o de suspensión) es descompuesta por un grupo de bacterias en ausencia de oxígeno. Como resultado de este proceso se libera biogás (CH_4 , CO_2 , H_2 , H_2S , etc.), el cual contiene principalmente 60% de metano y 40% de dióxido de carbono. Este gas puede ser recuperado, tratado y utilizado para la generación de energía en lugar de los combustibles fósiles tradicionales. El efluente remanente después de un proceso controlado de descomposición anaerobia es conocido como biosólido, el cual es rico en nutrientes (N, P, K, Ca, etc.), compuestos de difícil degradación y de olor casi nulo (US EPA, 2014; IDAE, 2007).

Diferentes tipos de reactores anaeróbicos han sido utilizados en laboratorios para tratar el lactosuero, obteniendo en su mayoría remociones muy satisfactorias de la DQO (Gelegenis *et al.*, 2007). Los bioreactores híbridos son especialmente útiles para el tratamiento de efluentes con alta carga de contaminantes orgánicos, dichos sistemas se caracterizan por un diseño que permite combinar en un mismo equipo la biomasa en suspensión con la biomasa adherida, por lo que si se ajusta su diseño adecuadamente puede combinar las ventajas propias de los sistemas de biomasa en suspensión (robustez y fiabilidad) con las de los sistemas de biopelícula (alta capacidad de tratamiento de contaminantes) (Oyanedel *et al.*, 2003).

Es por todo lo anterior que este trabajo tuvo como finalidad minimizar el impacto que ocasiona el residuo generado por la industria productora de queso mejor conocido como lactosuero, tratando dicho efluente por medio de digestión anaerobia en un reactor anaerobio híbrido y obteniendo de esta manera un bioenergético con alto valor agregado, lo cual hace de este trabajo una opción atractiva para resolver parte de la problemática ambiental que ocasiona la incorrecta disposición de este residuo.

OBJETIVOS

Objetivo general

Aprovechar el lactosuero generado por la industria quesera para la producción de bioenergéticos, minimizando su impacto ambiental.

Objetivos particulares

- a) Caracterización del lactosuero.
- b) Arranque, estabilización y monitoreo del reactor híbrido.
- c) Incremento de la Cva.
- d) Caracterización del efluente del reactor para su cumplimiento con la NOM.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 Industria láctea en México

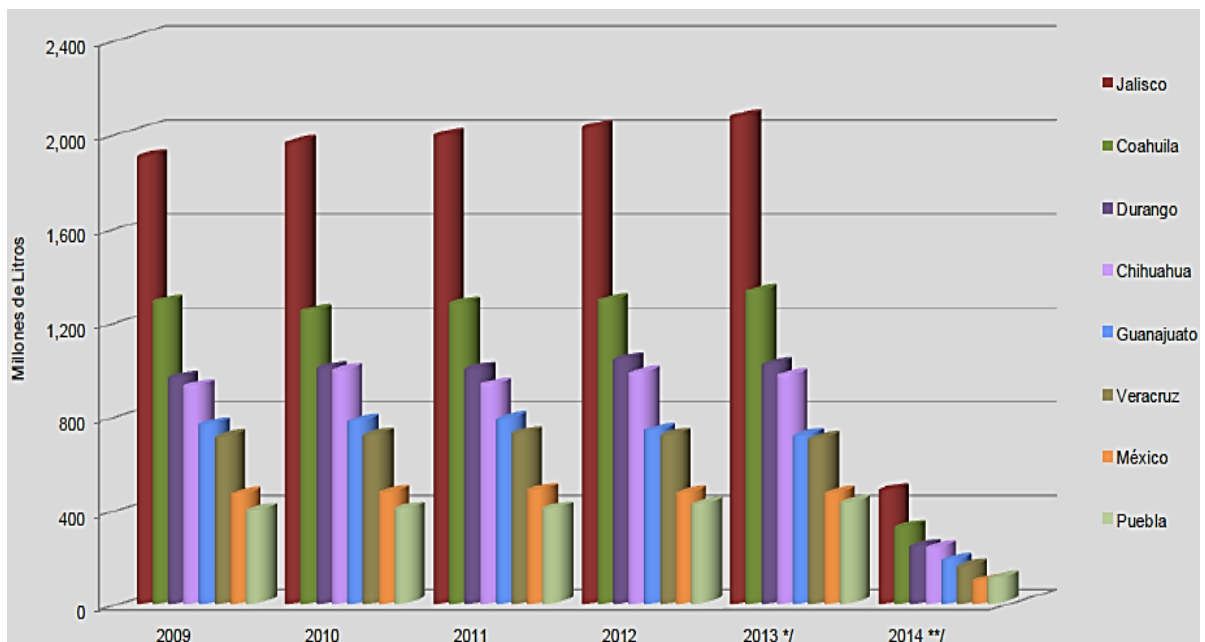
En México la producción de leche de bovino es muy heterogénea desde el punto de vista tecnológico, agroecológico y socioeconómico, incluyendo la gran variedad de climas regionales y características de tradiciones y costumbres de las poblaciones (Secretaría de Economía, 2012).

Sin embargo, la industria de productos lácteos es la tercera actividad más importante dentro de la rama de la industria de alimentos en México, y su crecimiento depende de la disponibilidad de la leche nacional (Secretaría de Economía, 2012).

Según cifras del Servicio de Información Estadística Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), durante el período 2003-2011 la producción nacional de leche de bovino ha tenido una tasa media de crecimiento de 1.3% (Secretaría de Economía, 2012).

La producción de leche presenta una diversidad de condiciones, las que van determinando una variedad de costos de producción, entre los principales factores que influyen en este tema se tienen el grado de tecnificación de la explotación, el tipo de alimentación del ganado, el tipo de raza o ganado lechero especializado entre otros, así como las condiciones climáticas y la disponibilidad de agua (Secretaría de Economía, 2012).

En la Figura 1.1 se muestran los principales estados productores de leche de bovino en México, donde Veracruz ocupa el sexto lugar con una producción láctea de 700, 715,000 L en el año 2013 (SIAP-SAGARPA, 2014).



^{*/} Cifras preliminares acumuladas al mes de Diciembre

^{**/} Cifras preliminares acumuladas al mes de Marzo

Figura 1.1 Principales estados productores de leche de bovino 2009-2014 (SIAP-SAGARPA, 2014).

1.1.1 Leche

La leche es uno de los alimentos más completos que existe en la naturaleza por su alto valor nutritivo. Está compuesta principalmente por agua, materia grasa, proteínas, carbohidratos (lactosa), calcio, minerales y sal. Contiene un 87% de agua por lo que es una mezcla muy compleja y heterogénea en la cual los minerales y los carbohidratos se encuentran disueltos, las proteínas están en forma de suspensión y las grasas como pequeñas partículas insolubles en agua (Valencia-Denicia y Ramírez-Castillo, 2009).

Desde un punto de vista macroscópico, la leche se puede describir como un sistema polifásico que contiene agua, grasa emulsificada, micelas de caseína en estado coloidal y proteínas, lactosa, sales y micronutrientes en solución (Inda, 2000).

El potencial de la leche para la fabricación de quesos está determinado principalmente por tres factores (Inda, 2000):

1. El contenido de proteínas coagulables (caseínas)
2. El contenido de materia grasa
3. La calidad sanitaria y microbiológica de la leche

El principal factor es el contenido de caseínas, las proteínas coagulables mediante la acción del cuajo y la acidez, ya que la proteína presente en el queso es la que retiene prácticamente toda la humedad del queso. La distribución de los componentes sólidos de la leche entre el queso y el lactosuero depende principalmente de tres factores: la composición de la leche, la composición deseada en el queso y la eficiencia de la transferencia de dichos componentes. La Tabla 1.1 muestra dicha distribución para el caso de un queso blanco típico latinoamericano (Inda, 2000).

Tabla 1.1 Distribución de los sólidos de 100 kg de leche entre el queso blanco y el lactosuero (Inda, 2000).

	Leche	Queso	Lactosuero
Proteínas	3.1 kg	2.3 kg	0.8 kg
Grasa	3.4 kg	3.1 kg	0.3 kg
Lactosa	4.7 kg	0.2 kg	4.5 kg
Minerales	0.9kg	0.5 kg	0.4 kg
Total	12.1 kg	6.1 kg	6.0 kg
Porcentaje	100 %	~ 50 %	~ 50 %

1.1.2 Queso

Es el producto alimenticio derivado de la leche que se obtiene por medio de la coagulación de ésta y en el cual se encuentra la parte más valiosa de la leche en forma concentrada. También se puede definir como el producto alimenticio que se

prepara con la leche de diversos animales (vaca, oveja, cabra, etc.), cuajándola primero, exprimiéndola, salándola y fermentándola luego con distintos microorganismos según la textura y sabor deseados (SENA, 1987).

1.1.2.1 Proceso para la fabricación del queso fresco

Los pasos del proceso del queso más simple son los siguientes:



Figura 1.2 Proceso para la fabricación del queso fresco (Galván, 2005).

1.1.2.2 Constituyentes del queso

De los constituyentes del queso, dado su valor nutricional, los más importantes son la proteína, el calcio, las vitaminas y las grasas (INAES, S/F).

Tabla 1.2 Constituyentes del queso (INAES, S/F).

Componente	Cantidad	Descripción
Proteínas	10-30%	Depende del método de manufactura. La digestibilidad de las proteínas es de 95%.
Calcio	Cantidad variable	Varía de acuerdo al contenido de agua y al método de manufactura.
Vitaminas	0% en quesos descremados. 70% en quesos enriquecidos con crema.	El contenido de las vitaminas A, C, D, E y complejo B varían según el tipo de queso y el contenido de grasas.
Grasas	Cantidad variable	Juega un papel importante en el aroma del queso. Se encuentran emulsificadas, por lo que son más digestibles.
Energía	100 – 350 kcal por cada 100g	Varía según el tipo de queso. La mayoría de la energía es proporcionada por las grasas, aunque también las proteínas y carbohidratos proveen energía.

1.1.3 Lactosuero

El lactosuero es un subproducto de la producción de queso, este efluente es un líquido amarillo verdoso y puede ser considerado como leche libre de caseína y grasas (Carvalho *et al.*, 2013).



Figura 1.3 Lactosuero.

El lactosuero tiene una alta DQO, lo cual representa una fuente potencial de energía y la incorrecta disposición de este residuo se traduce en una pérdida significativa de recursos y ocasiona serios problemas de contaminación. Particularmente, para las medianas empresas productoras de queso, las cuales no pueden invertir grandes cantidades de dinero en la investigación y valoración de tecnologías para el tratamiento de este efluente (Kavacik y Topaloglu, 2010).

Por consiguiente, el problema para la correcta disposición de este desecho empeorará. De hecho, las descargas continuas del lactosuero en la tierra pueden poner en peligro la estructura física y química del suelo, reduciendo las tasas de cultivo y ocasionando serios problemas de contaminación de los mantos freáticos (Kavacik y Topaloglu, 2010).

1.1.3.1 Producción de lactosuero

Se calcula que a partir de 10 L de leche de vaca se puede producir de 1 a 2 kg de queso y un promedio de 8 a 9 kg de suero (Valencia-Denicia y Ramírez-Castillo, 2009). En el 2013 el United States Department of Agriculture (USDA) estimó una producción mundial de 17,830,000 T de queso, de las cuales, 270,000 T fueron producidas en México, por otro lado el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) reportó una producción de 316,869 T en el mismo año, lo anterior se traduce en una producción aproximada de 142,640,000 T de suero a nivel mundial y alrededor de 2,534,952 T a nivel nacional.

El Estado de Veracruz produce 650 millones de L de leche al año, de los cuales aproximadamente 260 millones se utilizan en la producción de quesos. De esta industria se eliminan 235 millones de L de suero de leche anualmente, lo cual se traduce en una producción diaria equivalente a 644 mil L de suero de leche en el estado (Cabrera *et al.*, 2013).

1.1.3.2 Características del lactosuero

El suero láctico es rico en proteínas y lactosa con un alto contenido de materia orgánica (superior a 70,000 mgDQO/L), muy alta biodegradabilidad (aproximadamente 99%), y relativamente alta alcalinidad (alrededor de 2,500 mg CaCO₃/L) (Comino *et al.*, 2012).

Existen 3 tipos de suero:

- Ácido (pH<5): Es obtenido después de la fermentación o adición de ácidos orgánicos o minerales.
- Semi ácido (5<pH<5.9)
- Dulce (pH>6): Es obtenido por adición de enzimas proteolíticas

(Carvalho *et al.*, 2013; Valencia-Denicia y Ramírez-Castillo, 2009).

Tabla 1.3 Composición media de lactosuero (Hernández-Herrera, 2005).

	Suero dulce	Suero ácido
Agua	93-95 %	93-95 %
Extracto seco	5-7 %	5-7 %
Lactosa	4.5-5.3 %	3.8-5.2 %
Proteínas	0.6-1.1 %	0.2-1.1 %
Grasa	0.1-0.4 %	0.1-0.5 %
Sales minerales	0.5-0.7 %	0.5-1.2%
Ácido láctico	0.1-0.2 %	0.2-1.2 %
Cloruros	0.15-0.6 %	0.16-0.6 %
Finos	0.05-0.3 %	0.05-0.3 %
Valor de pH	6.45	5

La composición del lactosuero depende de muchos parámetros, tales como la composición y calidad de la leche utilizada, las técnicas para la producción del queso, la cantidad y calidad del agente empleado para coagulación, el periodo de coagulación y la temperatura (Kavacik y Topaloglu, 2010).

Su composición varía dependiendo de los factores antes mencionados, pero en general el contenido aproximado es de 93.1% de agua, 4.9% de lactosa, 0.9% de proteína cruda, 0.6% de cenizas (minerales), 0.3% de grasa, 0.2% de ácido láctico y vitaminas hidrosolubles (Valencia-Denicia y Ramírez-Castillo, 2009). Por otro lado Kavacik y Topaloglu en el 2010 reportaron la composición del lactosuero con valores de 5.9% de sólidos totales, pH de 6.6, 71.5% de sólidos volátiles, 41.5% de carbón orgánico, 19% de nitrógeno, y 0.56% de fósforo.

El lactosuero contiene una significativa cantidad de carbohidratos (típicamente 4-5%), principalmente lactosa. Además contiene proteínas no excediendo el 1%, grasas alrededor de 0.4-0.5%, ácido láctico menor al 1%, sales que podrían abarcar desde

1% a 3%, cantidades de minerales lácteos y todas las vitaminas solubles en agua (Gelegenis *et al.*, 2007).

Dentro de la composición del lactosuero podemos encontrar las llamadas proteínas no coagulables o proteínas del lactosuero, que son aquellas que no coagulan por la acción del cuajo y de la acidez y por eso forman parte de la composición del suero de quesería (Inda, 2000).

Debido a la cantidad de nitrógeno total y fósforo contenidos, el suero representa un considerable riesgo de eutrofización en los cuerpos de agua, particularmente en lagos y ríos con movimiento limitado (Carvalho *et al.*, 2013).

Carvalho *et al.* en el 2013 mencionó que los valores de DQO del lactosuero pueden variar en un rango de 0.8-102 g/L , mientras que la DBO presenta valores de 0.6-60 g/L, esto puede ocasionar un alto consumo del oxígeno disuelto presente en el agua.

El tratamiento del alto contenido orgánico del lactosuero por medios aerobios convencionales es un proceso muy costoso, principalmente debido al alto precio de los suministros de oxígeno. Por otro lado el tratamiento anaerobio no requiere suministrar oxígeno y genera una significativa cantidad de energía en la forma de gas metano (Kavacik y Topaloglu, 2010).

1.2 Tratamiento de aguas residuales

La importancia que tiene la conservación de los recursos naturales ha despertado en la sociedad la búsqueda de soluciones para cuidarlos y recuperarlos con el fin de que sean aprovechados por los seres vivos. El agua es un recurso de vital importancia en la vida del hombre por lo que su conservación debe ser uno de los principales objetivos (Valencia-Denicia y Ramírez-Castillo, 2009).

El aumento acelerado de la población con el consecuente incremento en la demanda del recurso hídrico para su uso en labores domésticas, industriales, agrícolas y pecuarias, entre otras, ha dado como resultado la contaminación de mayores volúmenes de agua que al no recibir tratamiento son depositados en los cuerpos receptores de agua, ocasionando la contaminación del medio ambiente, situación que convierte en un imperativo el tratamiento de las aguas residuales en pro de la conservación de nuestro hábitat. Según datos de la CONAGUA en el 2012 México contaba con 2,342 plantas de tratamiento de aguas residuales en operación formal con una capacidad total instalada de 140,142 L/s, con dichas plantas se procesó un caudal de 99,750 L/s, equivalente al 47.5% del total de las aguas residuales colectadas en los sistemas formales de alcantarillado municipales, estimado en 210,200 L/s. En el estado de Veracruz se contaba con 108 plantas de tratamiento de aguas residuales, las cuales procesaron un caudal de 5,614 L/s equivalente al 41.3% de las aguas residuales generadas en el estado (CONAGUA, 2013).

El propósito del tratamiento de las aguas residuales es remover los contaminantes que perjudican el ambiente acuático y, en general, a los seres vivos, antes de que lleguen a los suelos, ríos, lagos y posteriormente a los mares. El tratamiento de aguas residuales es una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos que se clasifican en: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y terciario. El pretratamiento consiste en separar sólidos gruesos que pueden provocar taponamiento; el tratamiento primario separa las partículas en suspensión que no son retenidas por el pretratamiento; en el tratamiento secundario o biológico se utilizan microorganismos que eliminan materia orgánica disuelta; por último, en el tratamiento terciario se adicionan compuestos químicos para su desinfección (Valencia-Denicia y Ramírez-Castillo, 2009).

La evaluación de la calidad de agua se lleva a cabo utilizando tres indicadores: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST). La DBO determina la cantidad de materia

orgánica biodegradable, mientras que la DQO mide la cantidad total de materia orgánica. El incremento de la concentración de estos parámetros incide en la disminución del contenido de oxígeno disuelto en el agua con la consecuente afectación de los ecosistemas acuáticos. Los SST tienen su origen en las aguas residuales y la erosión del suelo; el incremento de SST hace que un cuerpo de agua pierda la capacidad de soportar la diversidad de la vida acuática (Valencia-Denicia y Ramírez-Castillo, 2009).

1.2.1 Tratamientos biológicos

Los procesos biológicos constituyen una serie de importantes procesos de tratamiento que tienen en común la utilización de microorganismos (entre los que destacan las bacterias) para llevar a cabo la eliminación de componentes indeseables del agua, aprovechando la actividad metabólica de los mismos sobre esos componentes. Básicamente, los contaminantes presentes en el agua residual son transformados por los microorganismos en materia celular, energía para su metabolismo y en otros compuestos orgánicos e inorgánicos. Estas células microbianas forman flóculos, los cuales son separados fácilmente de la corriente de agua tratada, comúnmente por sedimentación. La aplicación tradicional de estos tratamientos consiste en la eliminación de materia orgánica biodegradable, tanto soluble como coloidal, así como la eliminación de compuestos que contienen elementos nutrientes (N y P) (Rodríguez *et al.*, 2006; Noyola *et al.* 2013).

Los procesos biológicos se dividen en dos grupos; los anaerobios y los aerobios, en la mayor parte de los casos, la materia orgánica constituye la fuente de energía y de carbono que necesitan los microorganismos para su crecimiento. Además, también es necesaria la presencia de nutrientes, que contengan los elementos esenciales para el crecimiento, especialmente los compuestos que contengan N y P, y en el caso de sistemas aerobios, la presencia de oxígeno disuelto en el agua. Durante el metabolismo bacteriano es necesaria la presencia de un elemento aceptor de

electrones en los procesos de oxidación de la materia orgánica. Este aspecto, además, tiene una importante incidencia en las posibilidades de aplicación al tratamiento de aguas (Rodríguez *et al.*, 2006).

1.2.1.1 Sistemas aerobios

En estos procesos, la materia orgánica se descompone en dióxido de carbono, y en especies minerales oxidadas. La presencia de O₂ hace que este elemento sea el aceptor de electrones, por lo que se obtienen unos rendimientos energéticos elevados, provocando una importante generación de fangos, debido al alto crecimiento de las bacterias aerobias. Estos lodos resultantes deben a su vez ser tratados previo a su disposición final, lo cual implica costos adicionales importantes. Adicionalmente, para procesar el sustrato por vía aerobia en sistemas mecanizados, es necesario suministrar energía eléctrica para transferir oxígeno al agua y a los microorganismos, lo que se realiza con equipo electromecánico (aireadores mecánicos, compresores). Además, la aplicación de estos sistemas a aguas residuales puede estar muy condicionada por la baja solubilidad del oxígeno en el agua (Rodríguez *et al.*, 2006; Noyola *et al.* 2013).

Tabla 1.4 Ventajas y desventajas de los procesos aerobios (Hernández, 2003).

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Las relaciones ecológicas de los microorganismos participantes son menos complicadas que en condiciones anaerobias. ➤ El sistema es muy estable: soporta cambios drásticos en la temperatura, el pH y la composición del sustrato. También, tolera concentraciones más altas de sustancias tóxicas. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ El costo energético para lograr la oxigenación es alto. ➤ La energía química se disipa en forma de calor. ➤ Alta generación de biomasa (50% del material biodegradable) que deberá ser estabilizada. ➤ No es exitoso a valores de DBO_{5,20} mayores de 7000 mg/L.

1.2.1.2 Sistemas anaerobios

Los sistemas anaerobios han tenido un gran progreso en cuanto a biotecnología se refiere para el tratamiento de aguas residuales con base en el concepto del aprovechamiento de recursos mientras se logra el control de la contaminación. En este caso el aceptor de electrones puede ser el CO_2 o parte de la propia materia orgánica, obteniéndose como producto de esta reducción el carbono es su estado más reducido, CH_4 . La descomposición de la materia orgánica por las bacterias se realiza en ausencia de aire, utilizándose reactores cerrados; en un proceso anaerobio, la mayoría de las sustancias orgánicas se convierten en dióxido de carbono y metano. Los productos finales de la digestión anaerobia son el biogás (mezcla gaseosa de metano, dióxido de carbono, hidrógeno, nitrógeno y sulfuro de hidrogeno), que se puede aprovechar para la producción energética, y los lodos de digestión (compuestos no biodegradables y biomasa). El proceso anaerobio se caracteriza por tener una baja tasa de síntesis bacteriana, es decir, una baja producción de lodos de desecho (Rodríguez *et al.*, 2006; Noyola *et al.* 2013).

Tabla 1.5 Ventajas y desventajas de los procesos anaerobios (Hernández, 2003).

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> ➤ No es necesario emplear energía externa al proceso. ➤ La energía contenida en el gas metano se puede aprovechar. ➤ La generación de lodos (biomasa) es baja. ➤ Se puede aplicar aun a valores altos de $\text{DBO}_{5,20}$ (mayores que 10,000 mg/L). 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ El sistema es muy inestable: cambios leves de temperatura, el pH y la composición del sustrato causan disfunciones. Además, es muy sensible a la presencia de sustancias tóxicas y antibióticos.

Las bacterias anaerobias utilizan entre el 5-10% de la energía contenida en el sustrato para funciones de reproducción, originando nuevas células, dirigiendo el 90-95% restante a la producción de gas metano, en cambio las bacterias aerobias emplean entre el 50 y 65% de la energía del sustrato en la síntesis de nuevas células, mientras que la otra parte es utilizada en la reutilización de otras funciones metabólicas, tal como se muestra en la Figura 1.4 (Salazar, 2009).

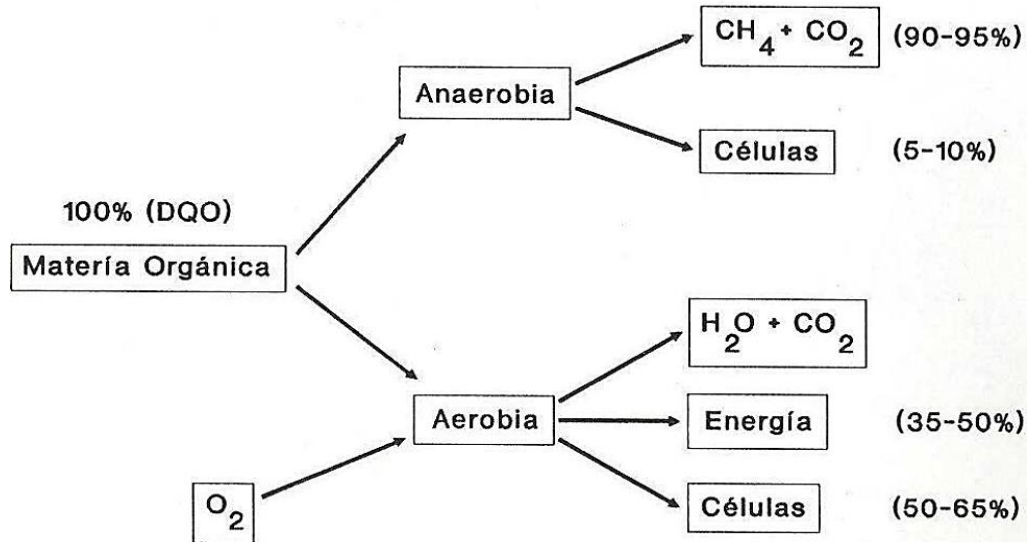


Figura 1.4 Flujo de energía de los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales (Salazar, 2009).

Las reacciones bioquímicas que se llevan a cabo en este proceso son parecidas, a las que se realizan en forma natural en los sedimentos acuáticos (pantanos, manantiales, lagunas, etc.), en el intestino de animales y de seres humanos, la única diferencia es la velocidad de reacción (Salazar, 2009).

Por lo anteriormente mencionado, los sistemas de tratamiento anaerobios, representan técnica y económicamente una opción aplicable en nuestro país (Salazar, 2009).

1.2.2 Clasificación de los reactores según su generación

El desarrollo de los procesos biológicos ha originado la existencia de tres generaciones de reactores anaerobios:

- Primera generación: comprende aquellos procesos donde la biomasa se encuentra en suspensión.
- Segunda generación: donde los microorganismos son retenidos en el reactor, mediante un soporte, siendo los de mayor aplicación en México, debido a las altas eficiencias y bajos requerimientos en cuanto a su construcción, operación y tratamiento.
- Tercera generación: donde los microorganismos en forma de biopelícula, se encuentran en un soporte expandido o fluidificado (Salazar, 2009).

1.2.3 Tratamiento de aguas residuales de la producción de queso

Las fábricas de producción de queso producen 2 corrientes de agua de desecho: el agua proveniente del lavado del piso y equipos (mezclado con detergentes y remanentes de leche en las tuberías, maquinas, etc.) y el lactosuero. Las aguas residuales de la primera corriente son de baja carga orgánica y son usualmente tratadas en instalaciones de tratamiento aeróbico. El lactosuero, aunque en menor volumen (cerca de 1/3 de las aguas residuales), tiene una muy alta carga orgánica y consecuentemente un potencial de contaminación muy alto como para su disposición en tierra o cuerpos de agua (Gelegenis *et al.*, 2007).

La alta capacidad contaminante del suero de leche y la gran cantidad de ácido láctico presente en él alteran significativamente los procesos biológicos que se llevan a cabo en las plantas de tratamiento aumentando los costos, por lo que para el tratamiento de suero lácteo, preferentemente se aplican tratamientos biológicos antes de que sea vertido a los suelos y ríos (Valencia-Denicia y Ramírez-Castillo, 2009).

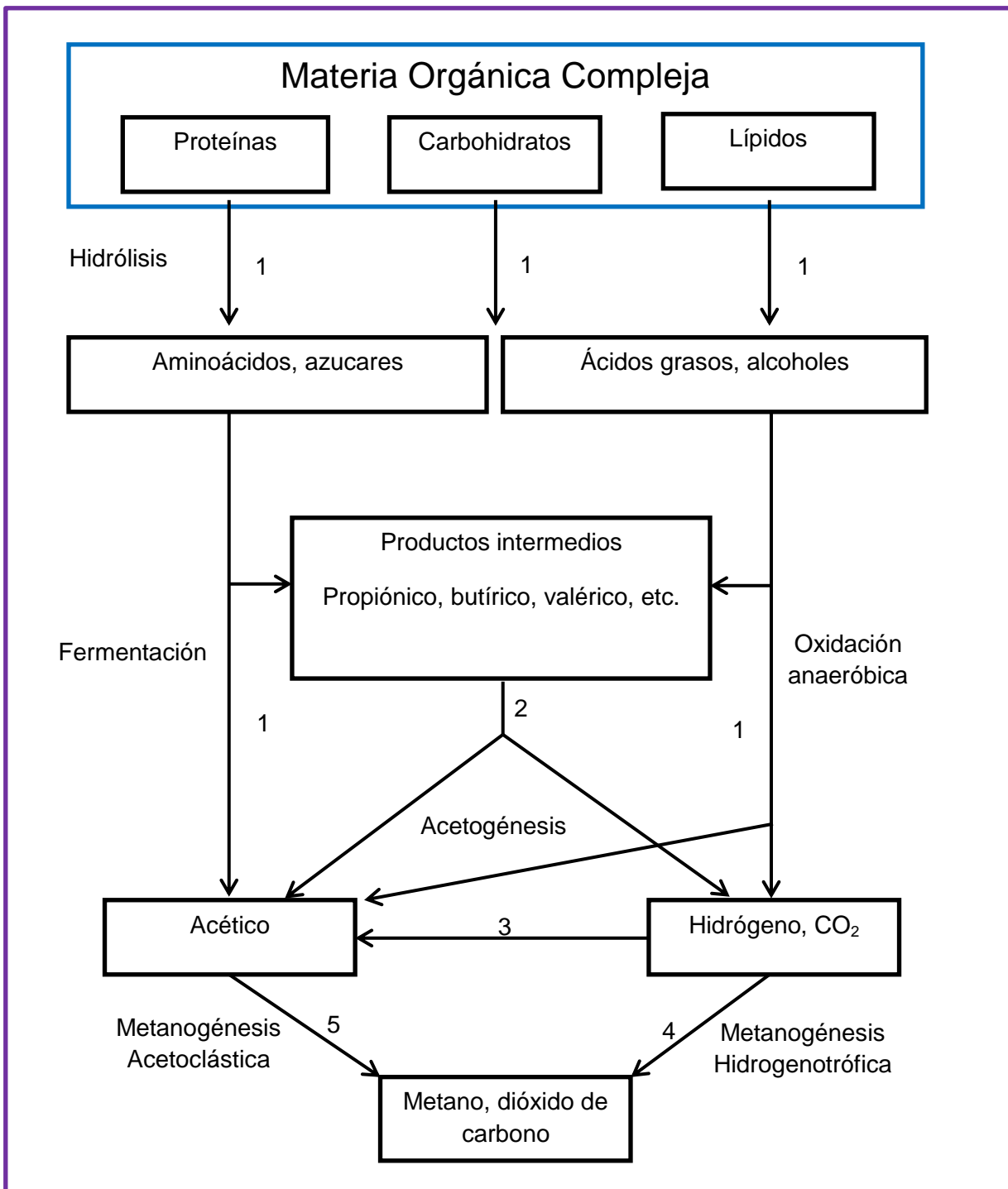
1.3 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso biológico que ocurre cuando la materia orgánica (en forma líquida o de suspensión) es descompuesta por un grupo de bacterias en ausencia de oxígeno. Como resultado de este proceso se libera biogás (CH_4 , CO_2 , H_2 , H_2S , etc.), el cual contiene principalmente 60% de metano y 40% de dióxido de carbono. Este gas puede ser recuperado, tratado y utilizado para la generación de energía en lugar de los combustibles fósiles tradicionales. El efluente remanente después de un proceso controlado de descomposición anaerobia es conocido como biosólido, el cual es rico en nutrientes (N, P, K, Ca, etc.), compuestos de difícil degradación y de olor casi nulo (US EPA, 2014; IDAE, 2007).

La digestión anaerobia ofrece una alternativa tanto para la producción de energía como para el control de la contaminación, ya que el biogás producido puede ser utilizado para la producción de calor y electricidad. Cuando el proceso de digestión anaerobia es correctamente controlado se convierte en uno de los más idóneos para el tratamiento de aguas residuales de alta carga orgánica, debido a la reducción de emisiones de efecto invernadero, el aprovechamiento energético de los residuos orgánicos y la mejora del valor fertilizante de los productos tratados (IDAE, 2007; Kavacik y Topaloglu, 2010).

La digestión anaeróbica es un proceso muy complejo tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar como por la cantidad de microorganismos involucrados en ellas. Los estudios bioquímicos y microbiológicos realizados hasta ahora, dividen el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica en cuatro fases o etapas (FAO, 2011):

1. Hidrólisis
2. Etapa fermentativa o acidogénica
3. Etapa acetogénica
4. Etapa metanogénica



Los números indican la población bacteriana responsable del proceso: **1)** bacterias fermentativas; **2)** bacterias acetogénicas que producen hidrógeno; **3)** bacterias homoacetogénicas; **4)** bacterias metanogénicas hidrogenotróficas; **5)** bacterias metanogénicas acetoclásticas.

Figura 1.5 Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica de materiales poliméricos (FAO, 2011).

1.3.1 Etapas de la digestión anaerobia

1.3.1.1 Hidrólisis

La hidrólisis es la descomposición de compuestos orgánicos por la interacción con el agua (del griego, hydro = agua y lysis = romper), se interpreta como romper los enlaces entre 2 moléculas por adición de una molécula de agua (US EPA, 2013).

Este proceso es el primer paso necesario para la degradación anaerobia de sustratos orgánicos complejos (proteínas, carbohidratos y lípidos) a compuestos solubles más sencillos (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga), ya que la materia orgánica polimérica no puede ser utilizada directamente por los microorganismos a menos que se hidrolicen en compuestos solubles, que puedan atravesar la pared celular. La hidrólisis de estas moléculas complejas es llevada a cabo por la acción de enzimas extracelulares producidas por microorganismos hidrolíticos. Es un proceso que depende de la temperatura, del tiempo de retención hidráulico, de la composición bioquímica del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), del tamaño de partículas, del nivel de pH, de la concentración de NH_4^+ y de la concentración de los productos de la hidrólisis (FAO, 2011). En algunos procesos este paso inicial es catalizado por el uso de un ácido o álcali (RISE-AT,1998).

1.3.1.2 Acidogénesis

Etapa microbiológica donde los aminoácidos, ácidos grasos de cadena larga y azúcares producidos en la hidrólisis, son transformados a alcoholes, dióxido de carbono, hidrógeno y Ácidos Grasos Volátiles (AGV's), mediante microorganismos fermentativos o por oxidantes anaerobios (SEMARNAT, 2010).

Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias

metanogénicas (acético, fórmico, H_2) y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso. La importancia de la presencia de este grupo de bacterias no sólo radica en el hecho que produce el alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente, sino que, además eliminan cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema. Este grupo de microorganismos, se compone de bacterias facultativas y anaeróbicas obligadas, colectivamente denominadas bacterias formadoras de ácidos (FAO, 2011).

1.3.1.3 Acetogénesis

Etapa microbiológica donde los ácidos grasos volátiles y alcoholes formados en la acidogénesis, son transformados en acetato, ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno principalmente, mediante la acción de los microorganismos acetogénicos (SEMARNAT, 2010; FAO, 2011).

Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos (H_2 y acético), otros (etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos) deben ser transformados en productos más sencillos, como acetato (CH_3COO^-) e hidrógeno (H_2), a través de las bacterias acetogénicas (FAO, 2011).

Un tipo especial de microorganismos acetogénicos, son los llamados homoacetogénicos. Este tipo de bacterias son capaces de crecer heterotróficamente en presencia de azúcares o compuestos monocarbonados (como mezcla H_2/CO_2) produciendo como único producto acetato. Al contrario que las bacterias acetogénicas, éstas no producen hidrógeno como resultado de su metabolismo, sino que lo consumen como sustrato. Según se ha estudiado, el resultado neto del metabolismo homoacetogénico permite mantener bajas presiones parciales del

hidrógeno y, por tanto, permite la actividad de las bacterias acidogénicas y acetogénicas (FAO, 2011).

A esta altura del proceso, la mayoría de las bacterias anaeróbicas han extraído todo el alimento de la biomasa y, como resultado de su metabolismo, eliminan sus propios productos de desecho de sus células. Estos productos, ácidos volátiles sencillos, son los que van a utilizar como sustrato las bacterias metanogénicas en la etapa siguiente (FAO, 2011).

1.3.1.4 Metanogénesis

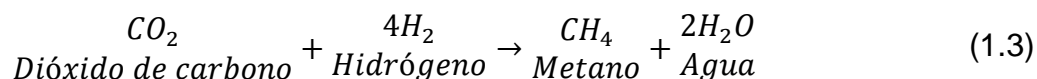
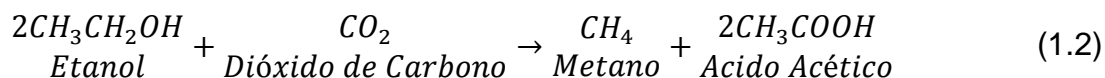
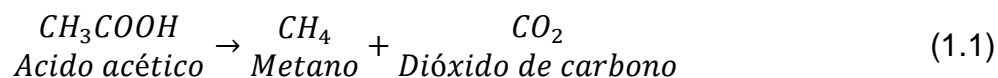
Etapa final del proceso de digestión anaerobia que implica la conversión de compuestos simples de carbono en metano por la acción de bacterias metanogénicas (SEMARNAT, 2010).

En esta etapa, un amplio grupo de bacterias anaeróbicas estrictas, actúa sobre los productos resultantes de las etapas anteriores. Los microorganismos metanogénicos pueden ser considerados como los más importantes dentro del consorcio de microorganismos anaerobios, ya que son los responsables de la formación de metano y de la eliminación del medio de los productos de los grupos anteriores, siendo, además, los que dan nombre al proceso general de biometanización (FAO, 2011).

Los microorganismos metanogénicos completan el proceso de digestión anaeróbica mediante la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, H_2/CO_2 , metanol y algunas metilaminas. Se pueden establecer dos grandes grupos de microorganismos, en función del sustrato principal que metabolizan (FAO, 2011):

- Hidrogenotróficos, que consumen H_2/CO_2 y fórmico
- Acetoclásticos, que consumen acetato, metanol y algunas aminas

Ejemplos de algunas reacciones que ocurren son:



1.3.2 Factores que afectan la digestión anaerobia

Al igual que todos los procesos biológicos las condiciones de un ambiente óptimo son esenciales para una operación exitosa de la digestión anaerobia. El proceso de metabolismo microbiano depende de muchos parámetros; por lo cual estos parámetros deben ser considerados y cuidadosamente controlados en la práctica. Además los requerimientos ambientales de las bacterias acidogénicas difieren de los de las metanogénicas. Tomando en cuenta que todas las etapas del proceso de degradación deben tener lugar en un solo reactor (proceso de una etapa) usualmente los requerimientos de las bacterias metanogénicas deben ser considerados como prioridad. Esto es porque dichos organismos tienen un mayor tiempo de regeneración, un crecimiento más lento y son más sensibles a las condiciones del medio, en comparación con el resto de las bacterias presentes (Tabla 1.6) (Kumar y Bharti, 2012).

Tabla 1.6 Tiempo de regeneración de microorganismos (Kumar y Bharti, 2012).

Microorganismos	Tiempo de regeneración
Bacterias acidogénicas	Menor de 36 horas
Bacterias acetogénicas	80-90 horas
Bacterias metanogénicas	5-16 días
Microorganismos aeróbicos	1-5 horas

1.3.2.1 Características del residuo

No todos los constituyentes del residuo son igualmente degradados o convertidos a gas a través de la digestión anaerobia. Por ejemplo, las bacterias anaeróbicas no degradan la lignina ni algunos otros carbohidratos y la digestión de residuos con una alta concentración de nitrógeno y azufre pueden producir concentraciones tóxicas de amoníaco y ácido sulfhídrico, por otro lado los residuos que no son particularmente solubles en agua se degradarán lentamente (Burke, 2001).

1.3.2.2 Dilución del residuo

Las características del residuo pueden ser alteradas por una simple dilución. El agua reducirá la concentración de ciertos constituyentes tales como nitrógeno y azufre que como se mencionó anteriormente producen amoníaco y ácido sulfhídrico, los cuales actúan como inhibidores en el proceso de digestión anaerobia. Por lo tanto, diluir el residuo puede tener efectos positivos (Burke, 2001).

1.3.2.3 Materiales tóxicos

Materiales tóxicos tales como fungicidas y agentes antibacteriales pueden tener un efecto adverso en la digestión anaeróbica, sin embargo el proceso anaeróbico puede manejar pequeñas cantidades de materiales tóxicos sin dificultad (Burke, 2001).

1.3.2.4 Nutrientes

Los niveles de nutrientes deben de estar por encima de la concentración óptima para las metanobacterias, ya que ellas se inhiben severamente por falta de nutrientes. 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 es utilizado 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 (FAO, 2011)

La descomposición de materiales con alto contenido de carbono, superior a 35:1, ocurre más lentamente, porque la multiplicación y desarrollo de bacterias es bajo, por la falta de nitrógeno, pero el período de producción de biogás es más prolongado. En cambio, con una relación C/N menor de 8:1 se inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de un excesivo contenido de amonio, el cual en grandes cantidades es tóxico e inhibe el proceso (FAO, 2011).

En términos generales, se considera que una relación C/N óptima que debe tener el material “fresco o crudo” que se utilice para iniciar la digestión anaeróbica, es de 30 unidades de carbono por una unidad de nitrógeno, es decir, $C/N = 30/1$ (FAO, 2011).

El proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno sino que también deben estar presentes en un cierto equilibrio sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores) (FAO, 2011).

1.3.2.5 Temperatura

La digestión anaerobia puede operar en un amplio intervalo de temperatura, entre 5°C y 65°C. Generalmente existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaeróbicos: psicrófilos (por debajo de 25°C), mesófilos

(entre 25 y 45°C) y termófilos (entre 45 y 65°C) (FAO, 2011). Con el incremento de temperatura la velocidad de reacción de la digestión anaerobia incrementa considerablemente (Kumar y Bharti, 2012). A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogás (FAO, 2011).

La temperatura también influye en la cantidad de sustancias orgánicas volátiles disueltas en solución, el contenido de humedad en el biogás y la concentración de amoníaco y ácido sulfhídrico gaseoso (Burke, 2001).

1.3.2.6 pH

En la digestión anaerobia el pH es el factor que más afecta la etapa metanogénica del proceso. El pH óptimo para los microorganismos metanogénicos es entre 6.5 y 7.5. Si el pH disminuye por debajo de 6.5, se produce una cantidad mayor de ácidos y esto lleva a una inminente falla del proceso. En sistemas de digestión real con biomasa suspendida y sustrato que contiene sólidos suspendidos, el pH normal de operación es entre 7.3 y 7.5. Cuando el pH disminuye a 6.9 se deben tomar serias acciones para evitar que el proceso falle (Kumar y Bharti, 2012).

1.3.2.7 Tiempo de Retención Hidráulico (TRH)

Muchos sistemas anaeróbicos son diseñados para retener el residuo por un tiempo determinado. El tiempo que el material permanece en el tanque es conocido como Tiempo de Residencia Hidráulico o TRH. El tiempo de retención hidráulico es igual al volumen del tanque dividido entre el flujo diario ($TRH = V/Q$). El TRH es importante ya que establece la cantidad de tiempo disponible para el crecimiento bacteriano y la posterior conversión de la materia orgánica a gas (Burke, 2001).

1.3.2.8 Carga volumétrica aplicada (Cva)

Con este término se designa al volumen de sustrato orgánico cargado diariamente al digestor. Este valor tiene una relación de tipo inversa con el tiempo de retención, dado que a medida que se incrementa la carga volumétrica disminuye el tiempo de retención. El tiempo de retención, junto con la velocidad de carga orgánica determinada por el tipo de sustrato, son los principales parámetros de diseño, definiendo el volumen del digestor. La materia orgánica o sólidos volátiles (SV) se refiere a la parte de la materia seca (MS) o sólidos totales (ST), que se volatilizan durante la incineración a temperaturas superiores a 550°C (FAO, 2011).

La eficiencia de la producción de biogás se determina generalmente expresando el volumen de biogás producido por unidad de peso de MS o SV. La fermentación de biogás requiere un cierto rango de concentración de MS que es muy amplio, usualmente desde 1% al 30% (FAO, 2011).

1.3.3 Ventajas y desventajas del proceso de digestión anaerobia

1.3.3.1 Ventajas

- 1) El producto final es un material totalmente inofensivo, lo que permite poderlo verter sin problemas.
- 2) Durante el proceso de digestión se produce una reducción de la materia sólida.
- 3) En el producto final es fácil eliminar parte del agua que lleva sometiéndolo a un proceso de secado.
- 4) Es el sistema más económico existente para reducir la materia orgánica de los sólidos eliminados del agua residual.
- 5) Durante el proceso de estabilización se produce un gas que se puede emplear de nuevo en el proceso a fin de ahorrar energía.
- 6) No se producen malos olores en las instalaciones pues todas están cerradas.

- 7) Durante el proceso de estabilización se eliminan los elementos patógenos y ciertos organismos parásitos.
- 8) El producto final es rico en ciertos nutrientes, y puede emplearse en agricultura.

1.3.3.2 Desventajas

- 1) Alto costo de equipos e instalaciones.
- 2) Los microorganismos son muy sensibles a los cambios que se puedan producir.
- 3) El líquido extraído del digestor tiene una alta demanda de oxígeno y en caso de ser recirculado a cabecera puede originar problemas de sobrecarga.
- 4) Son necesarios grandes tiempos de retención.

1.3.4 Digestión anaerobia del lactosuero

Diferentes tipos de reactores anaeróbicos han sido utilizados en laboratorios para tratar el lactosuero, desde reactores UASB hasta reactores simples de flujo pistón. La mayoría de los reactores anaerobios probados han alcanzado una remoción muy satisfactoria de la DQO (Gelegenis *et al.*, 2007).

Se han reportado datos de remoción del 75% de la DQO en un reactor biológico de discos rotativos a escala laboratorio para TRH menores a 5 días, mientras que en un reactor UASB escala laboratorio de 17.5 L se tienen datos de remociones más altas de DQO (por encima del 98%) (Gelegenis *et al.*, 2007).

En la aplicación de un reactor de película fija y flujo ascendente con una alta DQO en el influente (70 g/L) se ha alcanzado una remoción superior al 81%, mientras que en un reactor híbrido con un flujo descendente (pre-acidificación) y un flujo ascendente (para biometanización) se han reportado remociones mucho mayores (mayor al 98%) (Gelegenis *et al.*, 2007).

La Tabla 1.7 muestra los resultados de una recopilación bibliográfica realizada por Kavacik y Topaloglu (2010) respecto a experimentos realizados anteriormente para el tratamiento anaerobio del lactosuero:

Tabla 1.7 Información del tratamiento anaerobio de lactosuero (Kavacik y Topaloglu, 2010).

Tipo de reactor ^a	TRH (días)	Concentración de DQO en el influente (kg/m ³)	Velocidad de carga orgánica (kgDQO/m ³ ·d)	Eficiencia de remoción (%)
UFFLR	5	79	14	95
DSFFR	5	13	2.6	88
FBR	0.4	7	7.7	90
FBR	0.1 - 0.4	0.8 – 10	6 – 40	63 – 87
AAFEB	0.6 - 0.7	5 – 15	8.2 – 22	61 – 92
SDFA	-	69.8	16.1	99
UASB	1.5	11	7.1	94
UASB	5	5 - 28.7	0.9 – 6	97 – 99
DUHR	7	68	10	97
AP	8	4.4	0.55	63
UASB	2.3 - 11.6	5 – 77	1 - 28.5	95 – 99
UASB	5.4 - 6.8	47 – 55	7 - 9.5	90 – 94
ASBR	0.33	(0.6 - 4.8)·10 ⁻³	1.5 – 12	90

a UFFLR: Reactor de lecho fijo de flujo ascendente en circuito; DSFFR: Reactor de lecho fijo y flujo descendente; FBR: Reactor de lecho fluidizado; AAFEB: Reactor de lecho expandido de biopelícula anaerobia; SDFA: Digestor semi-continuo con adición de floculante; UASB: Reactor de manto de lodos de flujo ascendente; DUHR: Reactor híbrido ascendente descendente; AP: Laguna anaerobia; ASBR: reactor secuencial discontinuo anaerobio.

1.4 Biogás

El biogás es una mezcla gaseosa formada principalmente de metano y dióxido de carbono, pero también contiene diversas impurezas (FAO, 2011), siendo el metano el único gas de valor económico producido (Gerardi, 2003). Su composición, que

depende del sustrato digerido y del tipo de tecnología utilizada, puede ser la siguiente (IDAE, 2007):

- 50 – 70 % de metano (CH₄).
- 30 – 40 % de dióxido de carbono (CO₂).
- ≤ 5 % de Hidrogeno (H₂), ácido sulfhídrico (H₂S), y otros gases.

1.4.1 Características del biogás

El biogás posee ciertas propiedades específicas que se indican en la Tabla 1.8, las cuales es necesario conocer para su correcto manejo y aprovechamiento como fuente de energía (FAO, 2011).

Tabla 1.8 Características generales del biogás (FAO, 2011).

Composición	55 – 70% metano (CH ₄) 30 – 45% dióxido de carbono (CO ₂) Trazas de otros gases
Contenido energético	6.0 – 6.5 kW h m ⁻³
Equivalente de combustible	0.60 0.65 L petróleo/ m ³ biogás
Límite de explosión	6 – 12% de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 – 750°C (con el contenido de CH ₄ mencionado)
Presión crítica	74 – 88 atm
Temperatura crítica	-82.5°C
Densidad normal	1.2 kg m ⁻³
Olor	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16.043 kg kmol ⁻¹

El alto porcentaje de metano presente en el biogás (entre 50-70%), lo hace susceptible de un aprovechamiento energético mediante su combustión en motores, en turbinas o en calderas, bien sólo o mezclado con otro combustible, ya que cuando el biogás tiene un contenido de metano superior al 45% es inflamable (FAO, 2011; IDAE, 2007).

El metano es un gas inodoro y de limpia combustión que puede ser usado como una fuente de combustible ya que es un gas flamable natural. El metano puro tiene un poder calorífico de 8,899 kcal/m³ (Gerardi, 2003).



El poder calorífico del biogás es aproximadamente 4,449-5,339 kcal/m³, mucho más bajo que el del metano puro debido a la dilución de metano por el dióxido de carbono. Con el incremento de la cantidad de dióxido de carbono en el biogás, decrece su poder calorífico. Si el contenido de dióxido de carbono llega a ser muy alto, el biogás no permitirá una combustión autosostenida (Gerardi, 2003).

Si la fracción de dióxido de carbono en el biogás incrementa por arriba del 30%, la concentración de ácido en el lodo incrementa y el pH desciende por debajo de 7.0. En valores de pH por debajo de 7.0, ocurre una significativa fermentación ácida (Gerardi, 2003).

1.4.2 Equivalencia energética del biogás

Debido a su alto contenido de metano, el biogás tiene un poder calorífico algo mayor que la mitad del poder calorífico del gas natural. Un biogás con un contenido en metano del 60% tiene un poder calorífico de unas 5,500 kcal/m³ (6.4 kWh/m³). Es decir, salvo por el contenido de H₂S, es un combustible ideal, con unas equivalencias que se muestran en la Figura 1.6 y en la Tabla 1.9 (IDAE, 2007):

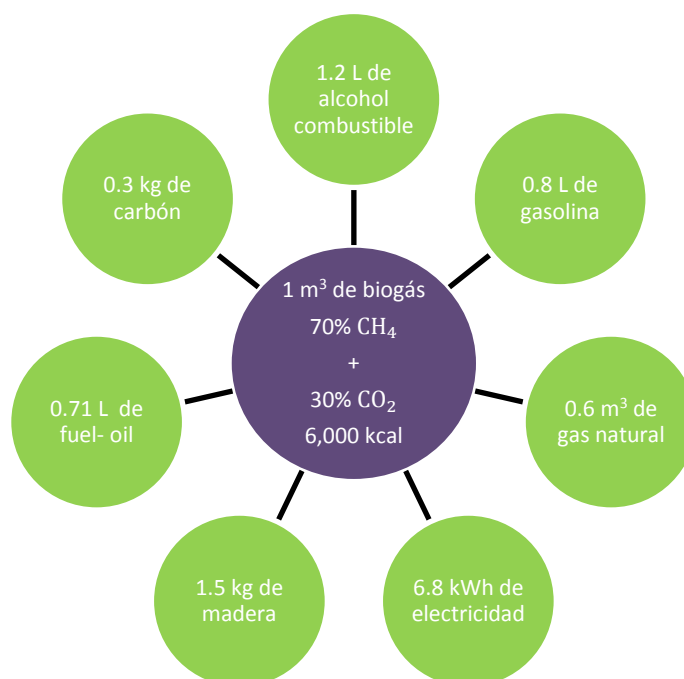


Figura 1.6 Equivalencias de biogás con otras fuentes de energía (IDAE, 2007).

Tabla 1.9 Energía equivalente (valor energético) de biogás contra otras fuentes (FAO, 2011).

Valores	Biogás *	Gas natural	Gas propano	Gas Metano	Hidrógeno
Valor calorífico (kWh/m ³)	7.0	10	26	10	3
Densidad (kg/m ³)	1.08	0.7	2.01	0.72	0.09
Densidad con respecto al aire	0.81	0.54	1.51	0.55	0.07
Límite de explosión (% de gas en el aire)	6 – 12	5 – 15	2 – 10	5 – 15	4 – 80
Temperatura de encendido	687	650	470	650	585
Máxima velocidad de encendido en el aire (m/s)	0.31	0.39	0.42	0.47	0.43
Requerimiento teórico de aire (m ³ /m ³)	6.6	9.5	23.9	9.5	2.4

*Composición promedio del biogás: CH₄ (65%) – CO₂ (35%)

1.5 Fermentación oscura

No solo se han realizado estudios para obtener metano a partir del lactosuero por medio de digestión anaeróbica, sino que también se ha evaluado la adaptación de estos sistemas para la generación de hidrógeno, ya que es considerado un valioso portador de energía y una alternativa para los combustibles fósiles. Bajo condiciones anaeróbicas, una amplia variedad de microorganismos producen hidrógeno a partir de la materia orgánica (Dávila-Vázquez *et al.*, 2008).

El biohidrógeno tiene características muy atractivas, tales como que es el gas con el más alto contenido energético por unidad de masa (143 GJ/ton), y es un combustible libre de carbón, por lo cual solo genera agua cuando combustiona y es usado en celdas de combustibles convencionales para generación de energía. Además, el biohidrógeno es un gas de baja solubilidad que puede ser fácilmente separado del agua, purificado y usado como portador de energía (Dávila-Vázquez *et al.*, 2009).

El hidrógeno puede ser obtenido durante la fase de acidogénesis en la digestión anaerobia, en un proceso conocido como fermentación oscura. A pesar de los bajos rendimientos relativos, la producción de hidrógeno por fermentación oscura es una alternativa prometedora debido a las altas tasas de producción volumétrica alcanzadas y la versatilidad del sustrato utilizado (Cota-Navarro *et al.*, 2011).

La mezcla de poblaciones microbianas anaeróbicas procedentes de diferentes fuentes ha sido estudiada como inóculo para la producción de H₂. Entre los microorganismos presentes en los sistemas fermentativos para producción de hidrógeno están principalmente *Clostridium*, *Bacillus* y *Enterobacter*. En estos procesos, la mayoría de la población microbiana fue tratada con calor o ácido antes de la inoculación para seleccionar las comunidades productoras de biohidrógeno (Dávila-Vázquez *et al.*, 2008; Dávila-Vázquez *et al.*, 2009).

El tratamiento térmico ha sido un método común para eliminar las bacterias metanogénicas (organismos consumidores de hidrógeno). Sin embargo, en algunos casos el tratamiento térmico no fue efectivo para la selección de los microorganismos productores de hidrógeno, porque unas pocas bacterias consumidoras de este gas, tales como las productoras de ácido láctico, ácido propiónico y las bacterias acetogénicas pudieron sobrevivir (Dávila-Vázquez *et al.*, 2008).

A pesar de la gran disponibilidad de residuos ricos en lactosa o subproductos de la industria láctea, existen pocos reportes de la producción de biohidrógeno a partir de dichos sustratos (Dávila-Vázquez *et al.*, 2009).

1.5.1 Fermentación oscura del lactosuero

La producción de hidrógeno empleando el lactosuero como sustrato fue previamente estudiada utilizando diferentes diseños de reactores, dentro de los cuales se incluyó diseños tipo CSTR y UASB. Se han reportado trabajos con reactores de tipo CSTR alimentado con lactosuero obteniendo una tasa volumétrica de producción de hidrógeno de 2.9 L H₂/L·d operando con una carga orgánica de 60 g lactosa/L·d y un TRH de 24 h. Sin embargo este diseño de reactor requiere un tanque de sedimentación externa para separar la biomasa y una cantidad significativa de energía para un mezclado continuo. En un UASB se han obtenido tasas volumétricas de producción de Hidrógeno de 1.79 L H₂/L·d operando con una carga orgánica de 48 g lactosa/L·d y un TRH de 8 h. Sin embargo el UASB exhibió el problema de producción de metano (Perna *et al.*, 2013).

1.6 Reactores de Lecho Fluidizado Inverso (RLFI)

Durante los últimos años, la aplicación de la fluidización en el campo de la biotecnología ha incrementado considerablemente. La principal aplicación del principio de fluidización es en el campo de la biotecnología ambiental. La diferencia entre la fluidización ordinaria y la inversa radica en la densidad de las partículas

sólidas empleadas como soporte. En el caso de la fluidización ordinaria la densidad de las partículas sólidas es mayor que la del líquido, mientras que en la fluidización inversa es menor (Rajasimman y Karthikeyan, 2009).

En la fluidización tradicional o la fluidización de flujo ascendente, las partículas sólidas tienen una densidad mayor que la del líquido y ellas son fluidizadas por una corriente en el sentido opuesto a la dirección de la gravedad. La falta de éxito industrial de los lechos fluidizados de flujo ascendente podría deberse a una combinación de muchos puntos negativos, como por ejemplo un alto nivel de mantenimiento debido a su complejidad o problemas de hidrodinámica (Arnaiz *et al.*, 2003).

Se han realizado investigaciones en reactores anaerobios de lecho fluidizado inverso o lecho fluidizado de flujo descendente, aplicado para tratamiento anaeróbico de aguas residuales. En este tipo de reactores, las partículas con densidad menor que la del líquido flotan cuando el reactor está parado, estas partículas son fluidizadas por una corriente de flujo descendente de líquido cuando este está trabajando (Arnaiz *et al.*, 2003).

El uso de reactores de lecho fluidizado inverso ofrece ventajas para el tratamiento de fuertes efluentes empleando espacios reducidos y un tiempo de retención hidráulico más corto, otra ventaja del uso de la fluidización inversa es el bajo requerimiento energético con respecto a la fluidización tradicional (Alvarado-Lassman *et. al.*, 2008). Esta tecnología ha sido principalmente empleada en sistemas aerobios, pero solo unas cuantas aplicaciones de Reactores de Lecho Fluidizado Inverso (RLFI) han sido reportados (Alvarado-Lassman *et. al.*, 2008; Rajasimman y Karthikeyan, 2009).

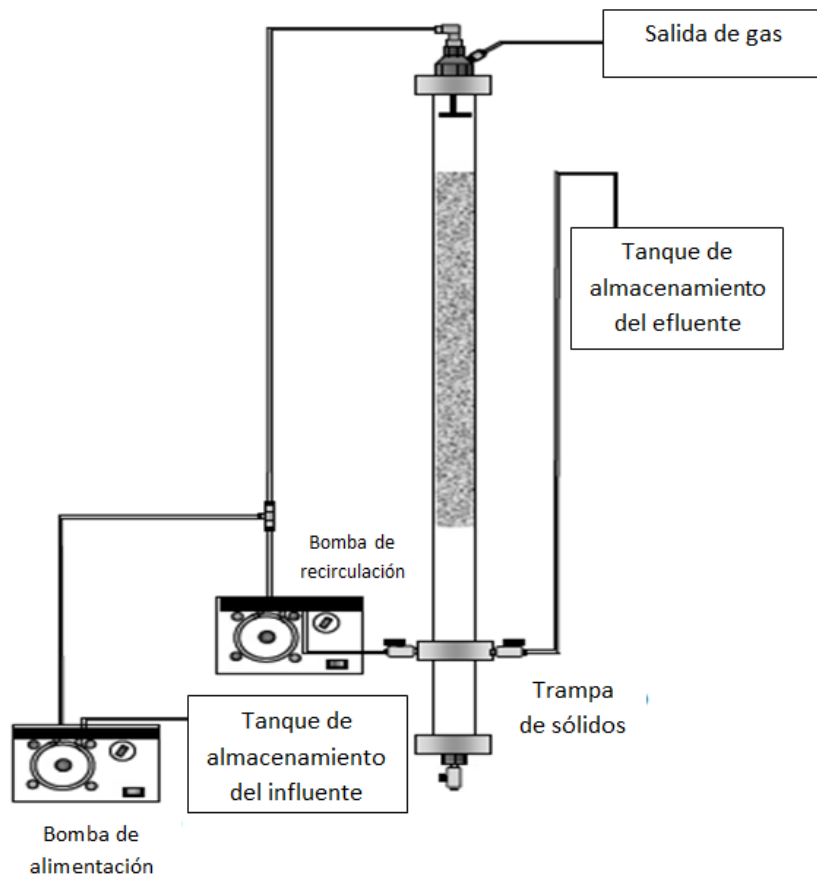


Figura 1.7 Esquema de un reactor de lecho fluidizado inverso (Alvarado-Lassman *et al.*, 2008).

1.7 Reactores híbridos

Los bioreactores híbridos para el tratamiento de aguas residuales se caracterizan por un diseño que permite combinar en un mismo equipo la biomasa en suspensión con la biomasa adherida, por lo que si se ajusta su diseño adecuadamente puede combinar las ventajas propias de los sistemas de biomasa en suspensión (robustez y fiabilidad) con las de los sistemas de biopelícula (alta capacidad de tratamiento de contaminantes) (Oyanedel *et al.*, 2003).

Los soportes que se utilizan en estos sistemas híbridos pueden ser tanto sintéticos (poliestireno, poliuretano, polietileno, etc.) como naturales (arcilla, basalto, carbón

etc.) y pueden encontrarse en suspensión moviéndose o fijos ocupando una posición determinada en el sistema (Oyanedel *et al.*, 2003).

Dichos sistemas son especialmente útiles para el tratamiento de aguas residuales con alta carga de contaminantes orgánicos y nitrogenados. Dichas características permitirían la expansión de estos sistemas en plantas de tratamiento de aguas donde la disponibilidad de terreno no sea elevada, o en plantas de tratamiento donde se desee aumentar la capacidad de los sistemas biológicos, sin realizar modificaciones sustanciales de la obra civil (Oyanedel *et al.*, 2003).

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

La Figura 2.1 describe de manera general la metodología experimental para la producción de bioenergéticos por medio del tratamiento del lactosuero en un reactor híbrido.

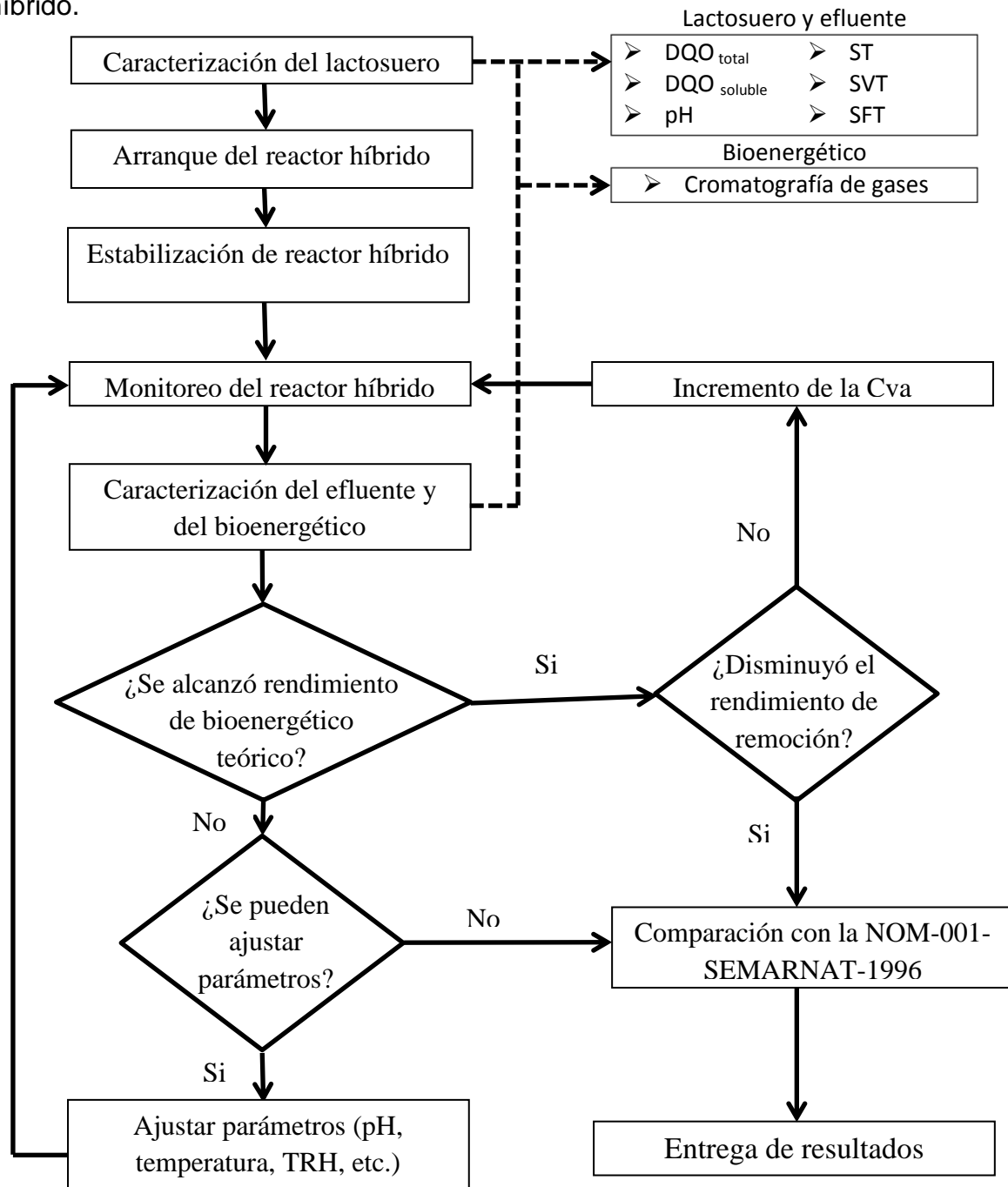


Figura 2.1 Metodología general del proyecto.

2.1 Lactosuero

El lactosuero empleado en este trabajo fue obtenido a partir de la producción de queso fresco realizado en un negocio familiar situado en Orizaba, Veracruz.

2.1.1 Caracterización del lactosuero

Se llevó a cabo la caracterización del lactosuero, el cual fue empleado como sustrato en el reactor híbrido. Los parámetros evaluados durante la caracterización del lactosuero y las respectivas técnicas empleadas para su análisis se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Parámetros analizados al lactosuero.

Determinación	Unidad	Método
DQO total	mg/L	Micrométodo Colorimétrico 5220 D Standard Methods
DQO soluble	mg/L	
Agua	%	NMX-AA-034-SCFI-2001
ST	g/L	
SVT	g/L	
SFT	g/L	
% SVT	%	
Grasas y aceites	g/L, %	NMX-AA-005-SCFI-2013
Carbohidratos	g/L, %	Método Antrona-Sulfúrico

2.1.2 Acondicionamiento del lactosuero

Debido a que el lactosuero posee una gran cantidad de materia orgánica en suspensión que se aglomera al agregar NaHCO_3 para ajustar el pH a 7 (Figura 2.2) y que podía ocasionar problemas tanto a la parte bacteriana como a la parte física del reactor (taponamiento de mangueras de alimentación) se procedió a acondicionar el lactosuero antes de ser alimentado al reactor híbrido.

Con base en el trabajo realizado por Mollea *et al.* (2013) sabemos que la principales proteínas presentes en el lactosuero son β -lactoglobulina (β -LG), α -lactalbúmina (α -LA), albumina sérica bovina (BSA) e inmunoglobulina (IG), que representan el 50%, 20%, 10% y 10% respectivamente del total de proteínas presentes en el lactosuero. Además el lactosuero también contiene numerosas proteínas menores, llamadas también proteínas de baja abundancia, tales como lactoferrina (LF), lactoperoxidasa (LP), proteasa peptona (PP), osteopontina (OPN), lisozima (LZ), entre otras; siendo LF y LP las más abundantes de las proteínas menores.

La Tabla 2.2 muestra los valores del Punto Isoeléctrico (PI) de las proteínas y como se puede observar el valor de pH al que se ajusta la alimentación coincide con el PI de algunas proteínas dentro de las que destaca la inmunoglobulina.

Tabla 2.2 Características de las proteínas del lactosuero (Mollea *et al.*, 2013).

Proteína	Masa molecular (kg/mol)	Punto isoelectrico	Concentración (g/L)	Numero de aminoácidos
β -LG	18	5.4	3.2	162
α -LA	14	4.4	1.2	123
IG	150	5 – 8	0.7	*
BSA	66	5.1	0.4	582
LF	77	7.9	0.1	700
LP	78	9.6	0.03	612

* Valores variables

Con base en lo anterior se asume que la aglomeración de materia orgánica que se observa en la Figura 2.2 es ocasionada por el ajuste del pH y el punto isoelectrico de las proteínas.



Figura 2.2 Aglomeración de proteínas por ajuste de pH en el lactosuero.

Para evitar la aglomeración de proteínas se procedió a filtrar el lactosuero bruto por medio de una tela para retirarle parte de la nata, posteriormente se mantuvo en reposo durante 24 h previo a su alimentación a una temperatura de 6°C para evitar su fermentación y propiciar la separación de la fase insoluble en suspensión (Figura 2.3), la cual posteriormente se retiró.



Figura 2.3 Lactosuero reposado 24 h con separación de materia insoluble en la parte superior.

2.2 Reactor híbrido

2.2.1 Descripción del reactor híbrido

El sistema consta de un tanque de mezcla de alimentación donde el suero de queso es diluído con agua hasta alcanzar la concentración de DQO soluble deseada; una bomba peristáltica de alimentación del reactor interconectada a una segunda bomba peristáltica de recirculación del reactor y salidas de efluente y biogás respectivamente. El diagrama del sistema puede observarse en la Figura 2.4.

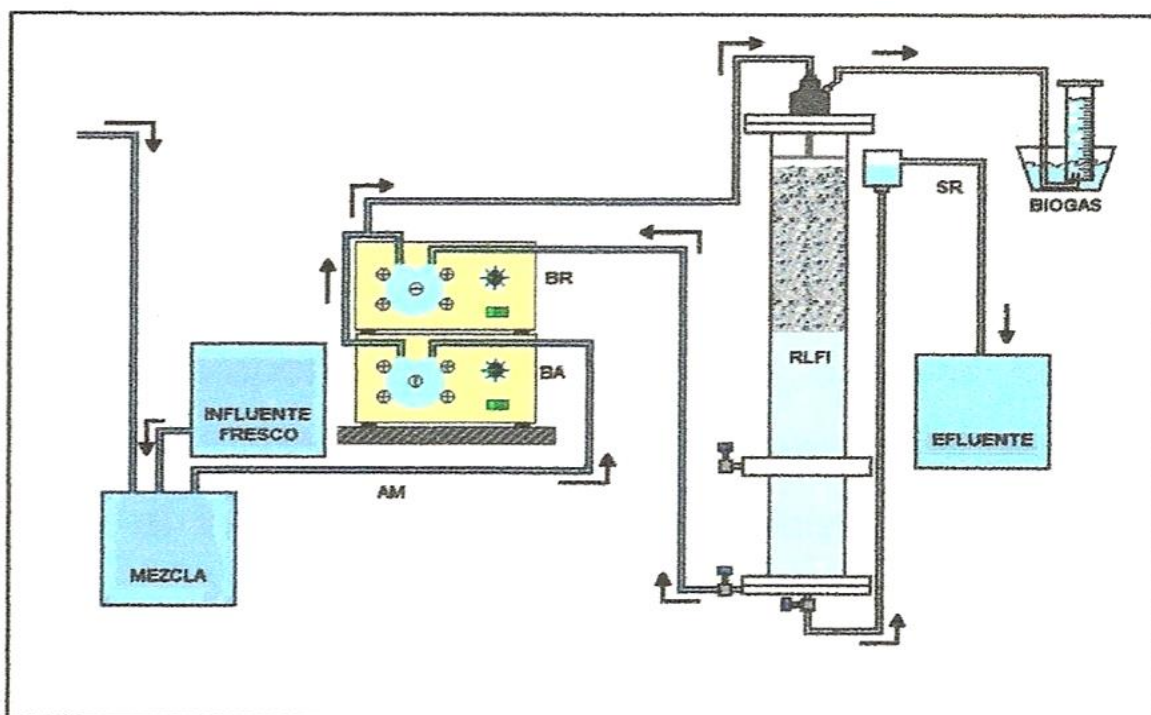


Figura 2.4 Diagrama esquemático de la configuración del reactor híbrido.

En donde: AM = Alimentación del RLF, SR = Salida del reactor híbrido, BR = Bomba de recirculación, BA = Bomba de alimentación.

En la Tabla 2.3 se muestran las características generales del reactor híbrido empleado para este proyecto.

Tabla 2.3 Características del reactor híbrido.

Característica	Valor	Característica	Valor
Diámetro externo	20.32 cm	Altura útil	108 cm
Diámetro interno	19.12 cm	Volumen útil total	31 L
Altura total	120 cm	Volumen de lodos / soporte colonizado	10 L
% para cámara de biogás	10% (12 cm)	Volumen útil del reactor	21.7 L

2.2.2 Características generales del soporte utilizado

El soporte empleado en la sección fluidizada se denomina Extendsphere™, el cual está formado por micro esferas de vidrio con una burbuja de aire en su interior (Figura 2.5) que le proporciona una menor densidad que la del líquido a tratar (Alvarado-Lassman *et. al.*, 2008), ocasionando que se sitúen en la parte superior del reactor (Figura 2.6). La Tabla 2.4 muestra las características físicas del Extendsphere™.

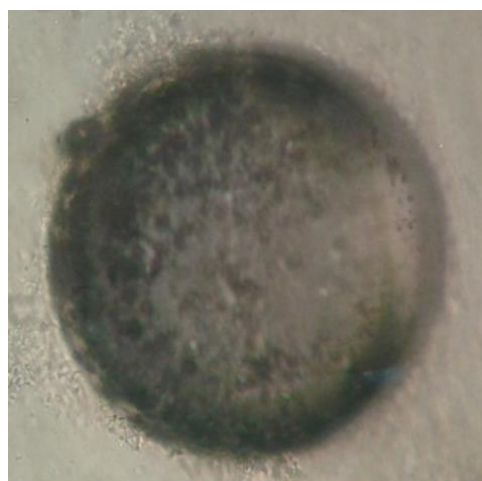


Figura 2.5 Extendsphere™ analizado al microscopio.



Figura 2.6 Soporte Extendsphere™ en el interior del reactor híbrido.

Tabla 2.4 Propiedades físicas del soporte. (Alvarado-Lassman *et. al.*, 2008).

Parámetro	Descripción
Forma	Esférica
Densidad (g/cm ³)	0.70
Diámetro promedio (μm)	169
Intervalo de tamaño de partícula (μm)	100-400
Área superficial (m ² /g)	0.0355

La sección del lecho fijo se encuentra conformada por una malla de polietileno (Figura 2.7) a 15 cm de la parte superior del tubo del cuerpo del reactor la cual carga un soporte fijo que consiste en 1000 piezas de polietileno cilíndrico corrugado de 6mm de diámetro por 22mm de longitud con un recubrimiento de nitrocelulosa por inmersión (Figura 2.9) para aumentar la rugosidad del material y mejorar la adherencia bacteriana. La Figura 2.8 muestra el polietileno cilíndrico corrugado antes de ser recubierto con nitrocelulosa.



Figura 2.7 Malla de polietileno para sostener el lecho fijo.



Figura 2.8 Polietileno cilíndrico corrugado sin recubrimiento de nitrocelulosa.



Figura 2.9 Polietileno cilíndrico corrugado con recubrimiento de nitrocelulosa.

La Figura 2.10 muestra el lecho fijo instalado en el interior del reactor, como se puede apreciar la malla cuenta con una división que separa el lecho tratado del no tratado.

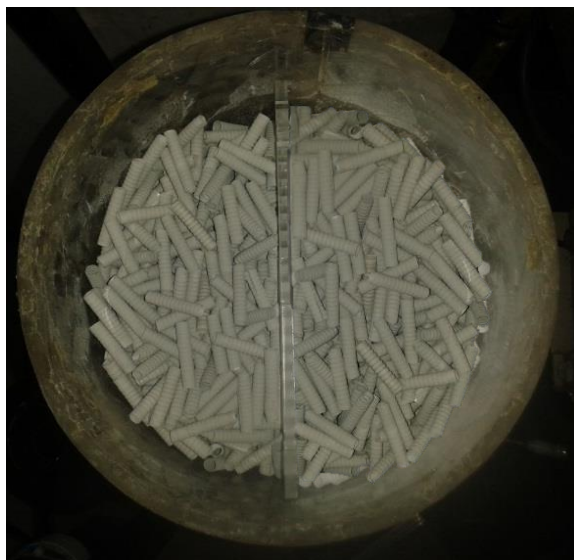


Figura 2.10 Lecho fijo instalado en el interior del reactor.

2.2.3 Condiciones previas del reactor

La estructura del reactor, las bombas y el tanque de alimentación se encontraban en condiciones óptimas para la operación del sistema, además la biomasa se encontraba acondicionada al nuevo sustrato debido a que el reactor fue alimentado previo al inicio de este proyecto durante 6 meses con lactosuero diluido en proporción de 2 L de lactosuero por 16 de agua.

2.2.4 Preparación del reactor para el arranque

Antes de arrancar el reactor se dio mantenimiento del mismo, se realizó un lavado, se midieron los flujos de las bombas de recirculación y alimentación, se instaló un tanque de almacenamiento del efluente tratado y se acondicionó el área donde se encuentra el equipo.



Figura 2.11 Mantenimiento del reactor híbrido previo al arranque.

2.2.5 Arranque del reactor híbrido

El reactor se arrancó originalmente con una altura de lecho compactado de 16 cm (Figura 2.12), un pH entre 7-7.5, una concentración de materia orgánica en la alimentación de 1.9 gDQOs/L, un caudal de alimentación y recirculación de 50 L/d y 172 L/d respectivamente.



Figura 2.12 Lecho fluidizado (altura = 16 cm).

Después de 3 días de operación se agregó Extendsphere™ previamente colonizado hasta alcanzar una altura de lecho compactado de 22 cm, como se muestra en la Figura 2.13.



Figura 2.13 Lecho fluidizado adicionado con soporte precolonizado (altura = 22 cm).

2.2.6 Monitoreo del reactor híbrido

Durante la operación del reactor híbrido se monitorearon los parámetros mostrados en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Parámetros monitoreados durante la operación del reactor híbrido.

Determinación	Unidad	Método
ph	----	Método potenciométrico 4500-H+B de Standard Methods
DQO total	mg/L	Micrométodo Colorimétrico 5220 D Standard Methods
DQO soluble	mg/L	
ST	g/L	NMX-AA-034-SCFI-2001
SVT	g/L	
SFT	g/L	
Volumen de biogás	L	Volumétrico
Composición de biogás	%	Cromatografía de gases (Cromatógrafo Buck Scientific Model 310)

Otros parámetros que se obtuvieron fueron los porcentajes de remoción de DQO_T , DQO_s y SVT , estos se obtuvieron mediante las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3 respectivamente.

$$\% \text{ Remoción } DQO_T = \frac{DQO_{T_{ENT}} - DQO_{T_{SAL}}}{DQO_{T_{ENT}}} * 100 \quad (2.1)$$

$$\% \text{ Remoción } DQO_s = \frac{DQO_{s_{ENT}} - DQO_{s_{SAL}}}{DQO_{s_{ENT}}} * 100 \quad (2.2)$$

$$\% \text{ Remoción } SVT = \frac{SVT_{ENT} - SVT_{SAL}}{SVT_{ENT}} * 100 \quad (2.3)$$

2.2.7 Estabilización del reactor híbrido

La estabilización del reactor híbrido se llevó a cabo ajustando la Cva hasta un valor de 3 gDQOs/L·d y se mantuvo así durante un periodo de tiempo hasta que se observó una menor variación, lo cual indicaba estabilidad en el proceso.

2.2.7.1 Adición de micronutrientes al sustrato

Como parte del proceso de estabilización se inició la adición de oligoelementos en la alimentación, en las cantidades que se muestran en la Tabla 2.6

Tabla 2.6 Micronutrientes adicionados para la estabilización del reactor híbrido (Aguilar-Montor, 2014).

Componente	Sustancia	Concentración mg/L
Oligoelementos	Cloruro de Potasio	0.5
	Cloruro de Cobalto	0.1
	Cloruro Ferroso	0.5
	Cloruro de Calcio	0.5

2.3 Incremento de la Cva

La Carga volumétrica aplicada se incrementó con base en resultados reportados en trabajos anteriores y se realizó después de haber alcanzado estabilidad en el proceso. La Cva originalmente se estabilizó en 3 gDQOs/L·d, posteriormente con base en la trabajo realizado por Kavacik y Topaloglu (2010) en donde se menciona a un reactor de lecho fluidizado que operaba con una carga de 7.7 gDQO/L·d se decidió aumentar la Cva del reactor híbrido a 7 gDQOs/L·d hasta alcanzar una remoción constante. Por último se incrementó a 7.7 gDQOs/L·d para observar el comportamiento del reactor.

2.4 Análisis del efluente para su valoración en el cumplimiento con la NOM

Se realizó el análisis del efluente llevando a cabo las mismas pruebas descritas en la Tabla 2.4 y posteriormente se compararon los resultados con los estipulados en la NOM-001-SEMARNAT-1996 para observar la efectividad de nuestro proceso para el tratamiento y minimización del lactosuero.

Debido a que la NOM-001-SEMARNAT-1996 reporta los límites máximos permisibles de materia orgánica presente en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales en mgDBO_5/L y los resultados obtenidos en este trabajo están dados en mgDQO/L se empleó como referencia de la relación entre ambos parámetros el trabajo presentado por Lugardo-González (2013), el cual presenta el análisis realizado a diferentes lactosueros provenientes de la fabricación de diversos quesos en la zona centro del estado de Veracruz, los datos se muestran en el inciso A de la Tabla 2.7.

Tabla 2.7 Comparación entre DBO_5 real y DBO_5 calculada.

A) DQO y DBO_5 de diversos lactosueros (Lugardo-González, 2013)				B) DBO_5 calculada
Procedencia del lactosuero (tipo de queso)	Clasificación del suero	DQO (mg/L)	DBO_5 (mg/L)	$\text{DBO}_5 = \text{DQO} \cdot 0.55$ (mg/L)
Queso de rueda	Suero dulce	73,561	39,260	40,459
Queso de rueda	Suero dulce	61,291	38,120	33,710
Queso panela	Suero dulce	63,276	35,300	34,802
Requesón	Suero dulce	51,413	32,100	28,277
Queso de hebra	Suero ácido	58,345	30,500	32,090
Queso de hebra	Suero ácido	56,348	31,000	30,991
Queso de hebra	Suero ácido	58,310	31,630	32,071
Queso de hebra	Suero ácido	57,892	31,420	31,841
Promedio		61,876	33,828	34,032

Con base en los resultados presentados en el inciso A de la Tabla 2.7 se obtuvo la siguiente relación para fines de este trabajo:

$$\text{DBO}_5 = \text{DQO} \cdot 0.55$$

El inciso B de la Tabla 2.7 muestra los valores de DBO_5 calculados a partir de la DQO. Posteriormente se compararon los resultados presentados por Lugardo-González (2013) y los obtenidos empleando la fórmula propuesta, se observó que los valores calculados se asemejan a los reales.

De igual manera se empleó la relación mencionada por Cisterna O. y Peña (1999) la cual fue reportada como parte de un trabajo que determinó la relación DQO/DBO_5 en aguas residuales de origen urbano, en el cual se menciona que para compuestos biodegradables se puede escribir la siguiente aproximación:

$$\text{DBO}_5 = \text{DQO} \cdot 0.65$$

Para establecer si la relación anterior podría ser empleada para analizar los resultados presentados en este proyecto, se procedió a evaluarla contra datos de DQO y DBO_5 reportados por Seba-Bautista (2013) como parte de una evaluación de un sistema lagunar in situ a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales lácteas de un municipio del estado de Veracruz. La Tabla 2.8 muestra la comparación de los datos reportados por Seba-Bautista (2013) y los calculados empleando la fórmula propuesta.

Tabla 2.8 Evaluación de relación DQO-DBO₅ contra datos reales.

A) DQO y DBO ₅ en diferentes etapas de un sistema lagunar (Seba-Bautista, 2013)			B) DBO ₅ calculada
Etapas del proceso	DQO (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	DBO ₅ = DQO·0.65 (mg/L)
Aguas Residuales Lácteas	38,155	27,974	24,800
Trampa de grasas	30,196	20,982	19,627
Sedimentador anaerobio	24,344	16,972	15,823
Laguna facultativa	15,190	10,557	9,873
Laguna aerobia con mamparas	5,177	3,603	3,365
Humedal	4,820	3,381	3,133

Como se puede observar en la Tabla 2.8 la relación propuesta por Cisterna O. y Peña (1999) se asemeja a los datos reportados por Seba-Bautista (2013), incluso la relación DQO-DBO₅ se mantiene aunque el efluente pase a través de las diferentes etapas del sistema de tratamiento.

Por otro lado Ronzano y Dapena (S/F) describen la relación DQO_{total}/DBO_5 como un valor de 2.08 para aguas residuales cuyo porcentaje de inertes no excede el 20% y la presencia de materia orgánica representada como DQO se encuentra por encima de 80%, por lo cual es aplicable al lactosuero ya que no presenta gran porcentaje de compuestos inertes.

Al describir dicha relación en función de la DQO_{total} tenemos:

$$DBO_5 = DQO_{total}/2.08$$

Cabe destacar que para la aplicación de ésta relación se empleó el valor de la DQO_{total} como variable independiente mientras que para las relaciones de Lugardo – González (2013) y Seba-Bautista (2013) se utilizó la $DQO_{soluble}$.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Lactosuero.

3.1.1 Caracterización del lactosuero.

Como se describió en el capítulo 2 se realizó la caracterización del lactosuero bruto (sin acondicionamiento previo) que se empleó para preparar la dilución que serviría como sustrato para alimentar el reactor híbrido. El promedio de los resultados de la caracterización de 10 Lotes se muestran en la Tabla 3.1

pH	3.51 (Lactosuero ácido)
DQO total	82,181 mg/L
DQO soluble	70,568 mg/L
Agua	94.1 %
ST	58.72 g/L
SVT	53.28 g/L
SFT	5.44 g/L
% SVT	90.73 %
Grasas y aceites	5.51 g/L
% Grasas y aceites	0.55 %
Carbohidratos	39 g/L
% Carbohidratos	3.9%

En la Tabla 3.2 se realiza la comparación de los resultados de la caracterización del lactosuero presentados en este proyecto y los obtenidos en trabajos anteriores.

Tabla 3.2 Comparación de los resultados de la caracterización del lactosuero.

	pH	DQO (mg/L)	Agua (%)	ST (%)	SVT (%)	SFT (%)	Grasas y aceites (%)	Carbohidratos (%)
Lactosuero bruto	3.51	82,181	94.1	5.94	5.39	0.55	0.55	3.9
Valencia- Denicia y Ramírez- Castillo, 2009	N. R.	N. R.	93.1	6.9	6.3	0.6	0.3	4.9
Teniza- García, 2008	6.33	N. R.	92.47	7.53	6.87	0.66	0.37	5.20
Gelegenis <i>et al.</i> , 2007	3.5	74,900	92.2	7.8	4.8	3	0.7	3.6
Cabrera <i>et al.</i> , 2013	N. R.	N. R.	92.94	7.06	5	2.06	N. R.	N. R.
Comino <i>et al.</i> , 2012	4.12	74,400	94.92	5.08	4.52	0.55	N. R.	N. R.
* Hernández- Herrera, 2005	5	N. R.	93-95	5-7	N. R.	0.5- 1.2	0.1-0.5	3.8-5.2

N. R. = No Reportado; * Intervalos teóricos de composición para un lactosuero ácido

Como se puede apreciar en la Tabla 3.2 los resultados presentados en este trabajo muestran una mayor semejanza a los reportados por Comino *et al.* (2012) y la mayoría se encuentran dentro de los intervalos de composición teórica descritos por Hernández-Herrera (2005) para el lactosuero de tipo ácido, ya que el porcentaje de grasas y aceites de la muestra analizada está ligeramente fuera del intervalo superior, además es el segundo valor más alto reportado para ese parámetro por debajo del obtenido por Gelegenis *et al.* (2007). Lo anterior indica que el lactosuero bruto empleado para el desarrollo de este proyecto no presentó alguna anomalía significativa en sus composición.

3.1.2 Acondicionamiento del lactosuero.

El acondicionamiento que se le realizó al lactosuero antes de ser incorporado al tanque de alimentación propició que los coágulos desaparecieran, evitando tener problemas en el reactor. La Figura 3.1 muestra el lactosuero de alimentación previamente acondicionado y con pH ajustado a 7, como se puede observar la aglomeración de proteínas desapareció.



Figura 3.1 Lactosuero acondicionado y con adición de NaHCO_3 para ajuste de pH.

El acondicionamiento previo del lactosuero ocasionó cambios en las características de éste, en la Tabla 3.3 se muestran las características principales del lactosuero bruto y del lactosuero acondicionado, donde se puede apreciar una disminución en los parámetros de DQO, ST y SVT de alrededor de 40%, 14% y 15% respectivamente.

Tabla 3.3 Caracterización del lactosuero antes y después del acondicionamiento.

Determinación	Lactosuero bruto (antes del acondicionamiento)	Lactosuero acondicionado (después del acondicionamiento)
pH	3.51	3.55
DQO total	82,181 mg/L	53,600 mg/L
DQO soluble	70,568 mg/L	40,900 mg/L
Agua	94.1 %	94.9 %
ST	58.72 g/L	50.88 g/L
SVT	53.28 g/L	45.9 g/L
SFT	5.44 g/L	4.98 g/L
% SVT	90.73 %	90.21 %

3.2 Reactor híbrido.

3.2.1 Arranque, estabilización y monitoreo del reactor híbrido.

El arranque y estabilización del reactor como se muestra en la Figura 3.2 se efectuó con una Cva de 3 gDQOs/L·d desde el día 1 hasta el día 30. A partir del día 53 se inició la adición de oligoelementos para propiciar el crecimiento de la biomasa con la finalidad de incrementar los porcentajes de remoción tanto de DQO como de SVT. El día 90 la bomba de recirculación fue retirada para evitar que el lecho fuera expulsado por la parte inferior del reactor debido a que la expansión del lecho era muy alta. El día 145 debido a un problema de operación parte del soporte situado en la zona inferior del reactor fue expulsado y consecuentemente el rendimiento del reactor se vio afectado.

3.2.1.1 Incremento de la Cva.

El día 31 de operación se incrementó la Cva a 7 gDQOs/L·d basados en los datos proporcionados por Kavacik y Topaloglu (2010), los cuales realizaron una recopilación bibliográfica de algunos reactores empleados para el tratamiento de

lactosuero entre los que se incluye el reactor de lecho fluidizado con una Cva de 7.7 gDQO/L·d, obteniendo una remoción de DQO del 90% y un TRH de 0.4 días. Después de 135 días de operación se incrementó la Cva hasta valores alrededor de 7.7 gDQOs/L·d.

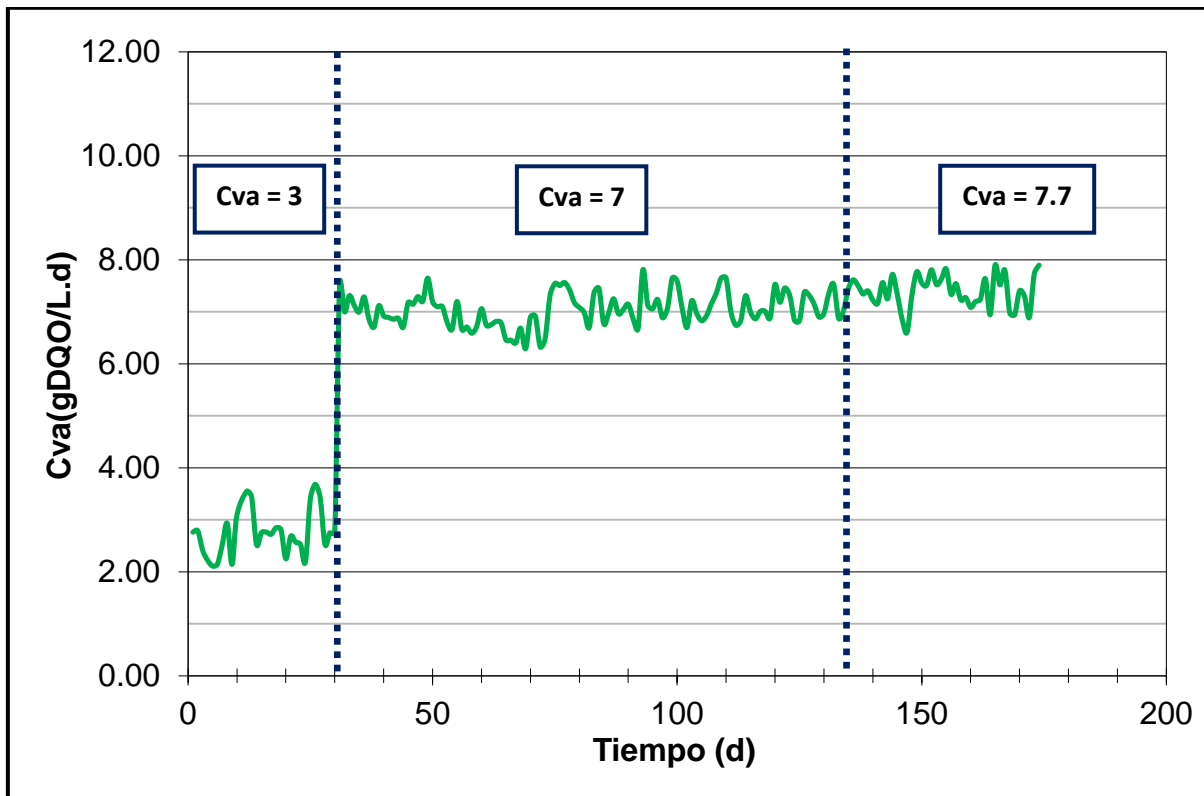


Figura 3.2 Gráfica de arranque y estabilización del reactor e incremento de la Cva.

3.2.1.2 Ajuste de pH de alimentación

En la Figura 3.3 se aprecia que el pH de entrada descendía dentro del tanque de alimentación, por lo que fue necesario ajustarlo entre valores de 7.3 – 7.5 para que transcurridas 24 h el valor de pH se encontrara generalmente entre 6.5 – 7. Con esto se logró mantener estabilidad en el pH del proceso a lo largo del proyecto.

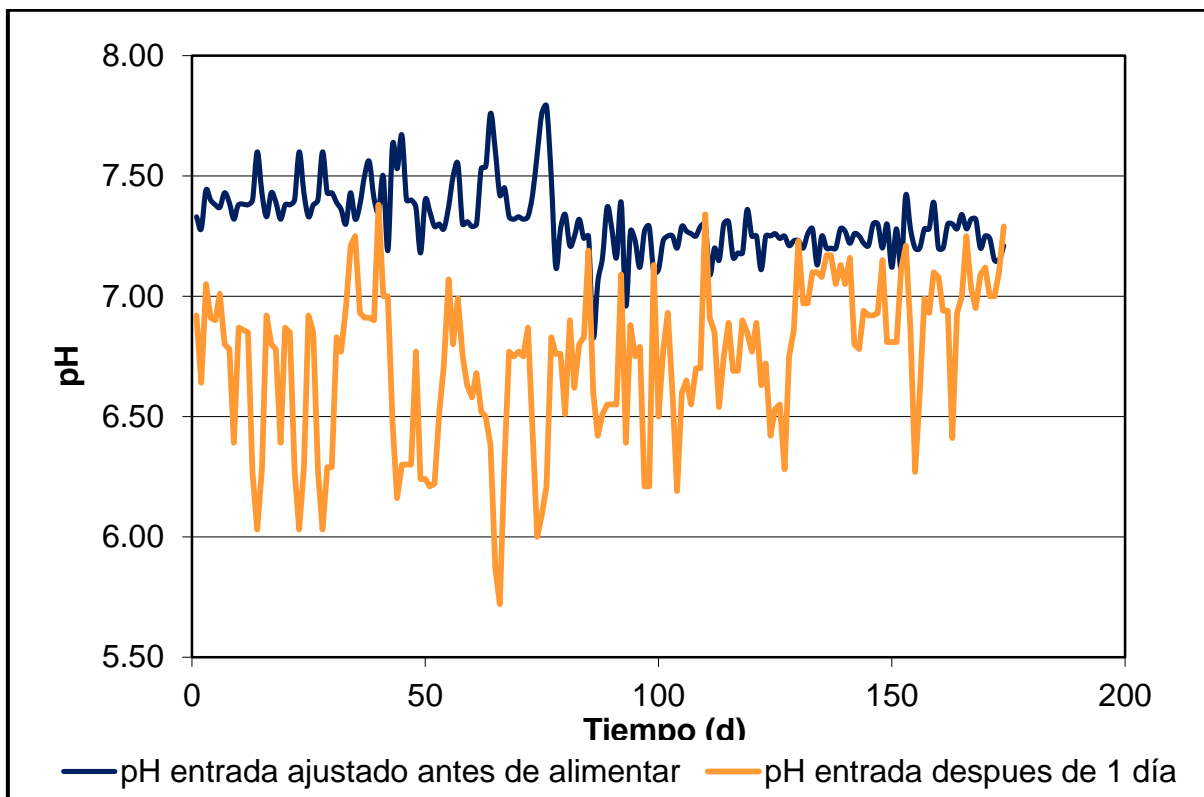


Figura 3.3 Gráfica de la variación del pH dentro del tanque de alimentación.

3.2.1.3 pH de alimentación y salida del reactor

Como se puede apreciar en la Figura 3.4 el pH de entrada a lo largo del proyecto se mantuvo constante y cercano a la neutralidad, mientras que los valores de pH en la salida eran inferiores a los de la alimentación durante los primeros 30 días, posteriormente el pH comenzó a estabilizarse hasta alcanzar valores similares o ligeramente superiores a los de la alimentación, situándose generalmente entre 7.5 – 8.0. Lo anterior es de gran importancia debido a que diversos trabajos han reportado dificultades en el tratamiento del lactosuero ocasionadas por su rápida acidificación.

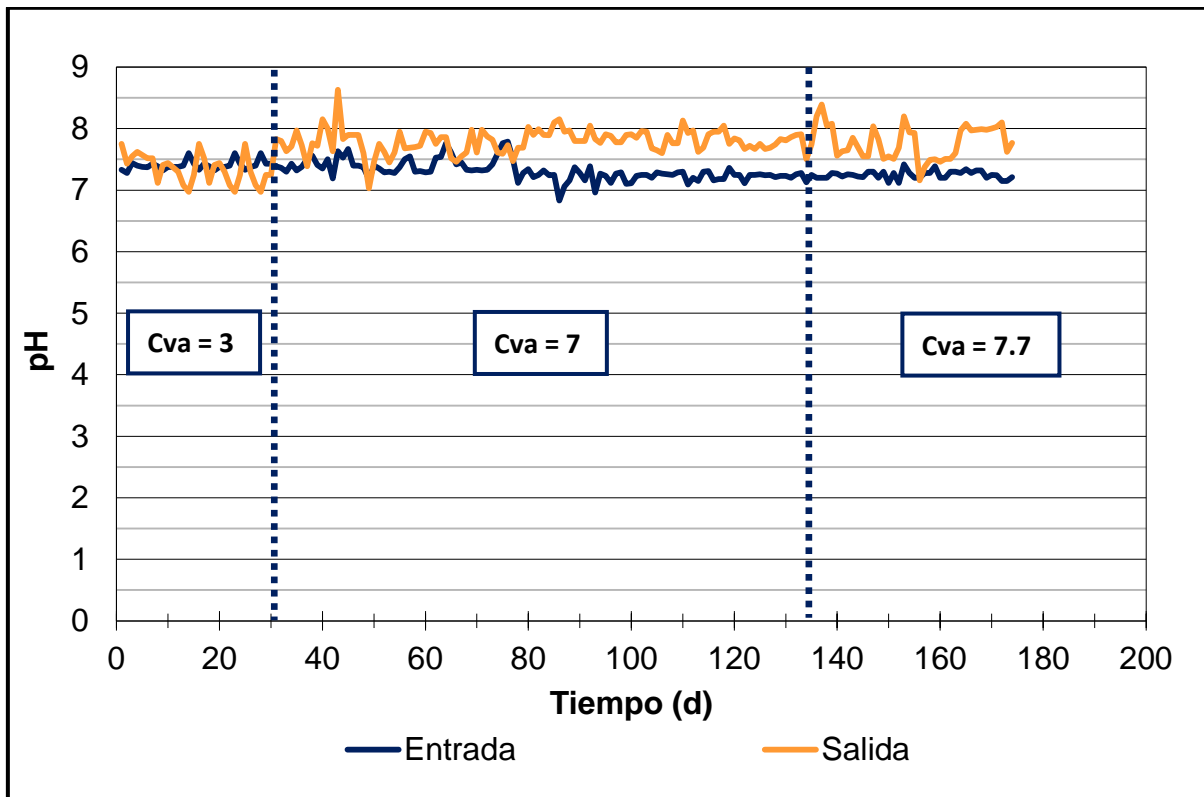


Figura 3.4 Gráfica de comparación de pH de entrada y salida del reactor híbrido.

Dentro de los residuos que presentan problemas de acidificación al emplearlos como sustrato en el proceso de digestión anaerobia también se encuentra el efluente proveniente de la industria citrícola, el cual fue empleado por Domínguez-Hernández (2016) como sustrato para alimentar un Reactor de Lecho Semifluidizado Inverso (RLSFI) estableciendo que fue necesario ajustar el pH de alimentación a un valor de 8 empleando NaHCO_3 , con lo cual los valores de pH en la salida del reactor fueron cercanos a 7, evitando así la acidificación del reactor. El comportamiento del pH reportado por Domínguez-Hernández (2016) se asemeja al presentado en este trabajo al emplear el lactosuero, ya que en ambos se realizó un ajuste de pH antes de incorporar el sustrato al reactor, se obtuvieron valores de pH en la salida cercanos a la neutralidad y se evitaron problemas de acidificación.

3.2.1.4 Remoción de la DQO en un reactor anaerobio híbrido

La Figura 3.5 muestra que durante el proceso de arranque y estabilización del reactor se logró obtener remociones alrededor del 60% manteniendo una Cva de 3 gDQOs/L·d, posteriormente al incrementar la Cva a 7 gDQOs/L·d la remoción disminuyó a 40% desde el día 31 hasta el 40, volviendo a recuperarse a partir del día 41 hasta alcanzar valores de entre 50 – 70% de forma constante. Después de haber incrementado la Cva a 7.7 gDQOs/L·d la remoción se mantuvo alrededor de 60%. El día 145 debido a un problema de operación parte del soporte situado en la zona inferior del reactor fue expulsado, lo que ocasionó que la remoción disminuyera hasta valores entre 30 - 35%, sin embargo a partir del día 155 la remoción incrementó hasta alcanzar valores entre 50 – 60%.

La remoción de la DQO alcanzó valores de hasta 70% con una Cva de 7 gDQOs/L·d y un TRH de 0.8 días, mientras que Malaspina *et al.* (1995) emplearon un reactor híbrido de lecho fluidizado de flujo descendente-ascendente para el tratamiento de lactosuero obteniendo una remoción de la DQO del 98% con una Cva de alrededor de 10 gDQO/L·d y un TRH de 1 día, por otro lado Kavacik y Topaloglu (2010) realizaron una recopilación bibliográfica de algunos reactores empleados para el tratamiento de lactosuero entre los que se incluye el reactor de lecho fluidizado con una Cva de 7.7 gDQO/L·d, una remoción de DQO del 90% y un TRH de 0.4 días.

Además otros residuos con características de acidez similares a las del lactosuero han sido empleados como sustrato en el proceso de digestión anaerobia, tal es el caso de Domínguez- Hernández (2016), el cual empleó un reactor de lecho semifluidizado inverso para el tratamiento de un efluente cítrico obteniendo remociones máximas de DQO entre el 75 % – 80%, con cargas no mayores a 10 gDQO/L·d y un TRH de 0.4 d.

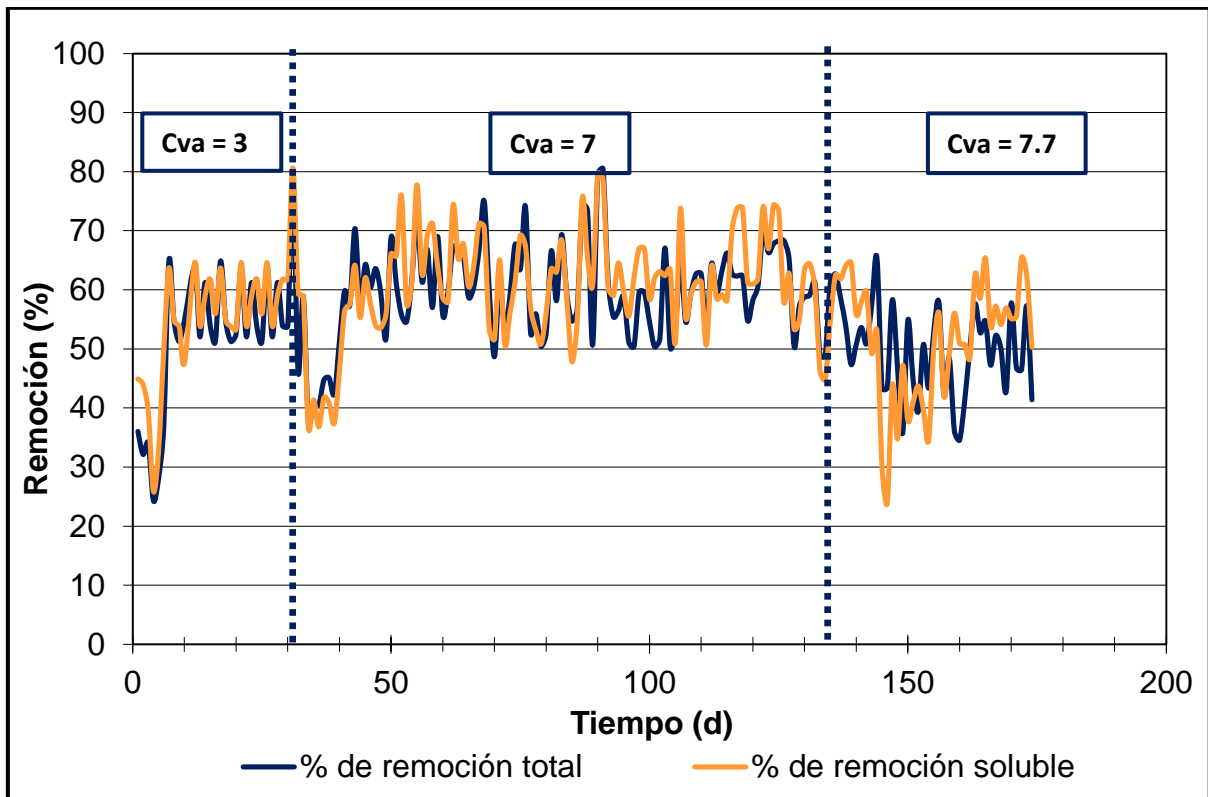


Figura 3.5 Gráfica de remoción de DQO en un reactor híbrido.

3.2.1.5 Remoción de SVT en un reactor anaerobio híbrido

Durante el periodo de arranque ingresaban al reactor alrededor de 1,500 mg/L de SVT con remociones de 50%, al incrementar la Cva a 7 gDQOs/L·d la cantidad de SVT en la alimentación aumentó a 3,400 mg/L aproximadamente y la remoción disminuyó a valores de 40%, a través del tiempo el proceso alcanzó una remoción de hasta 70% con una entrada de SVT de 5,000 mg/L. La remoción se estabilizó en 60% después de incrementar a 7.7 gDQOs/L·d la Cva, obteniendo concentraciones de SVT alrededor de 5,600 mg/L en la alimentación y de 2,500 mg/L en la salida del reactor como se puede apreciar en la Figura 3.6.

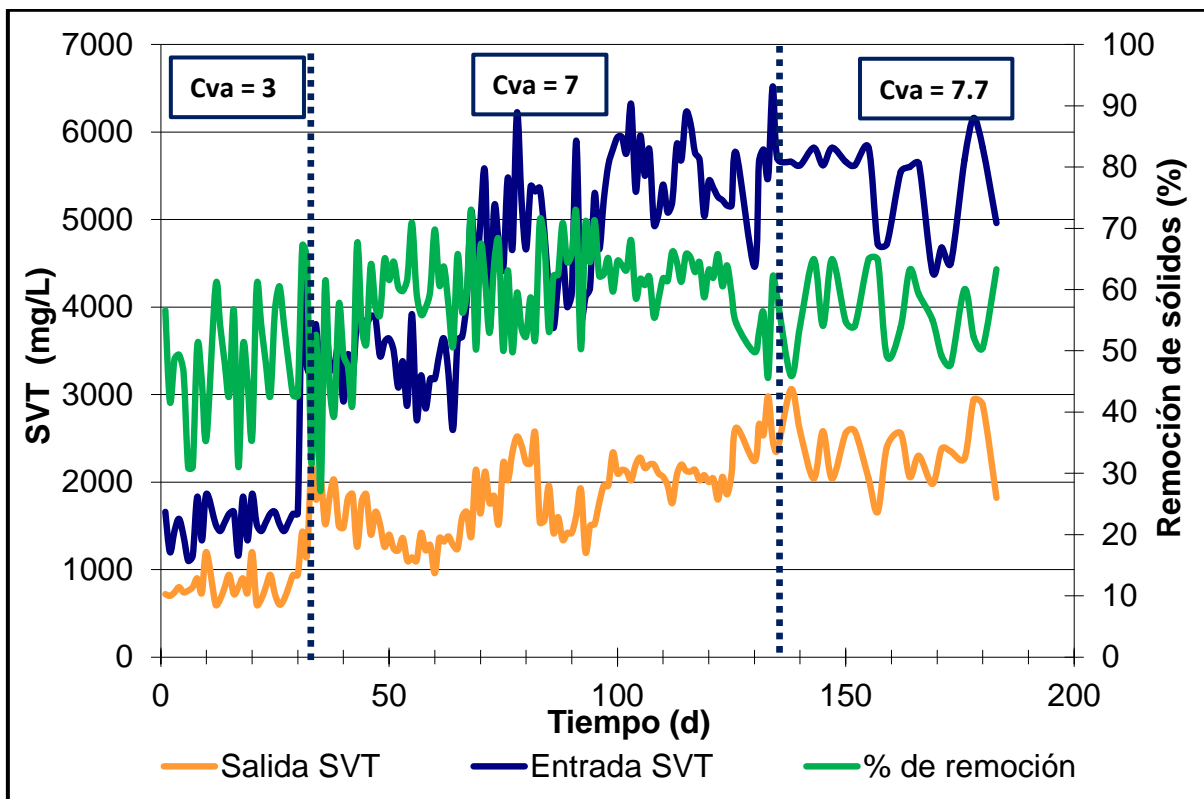



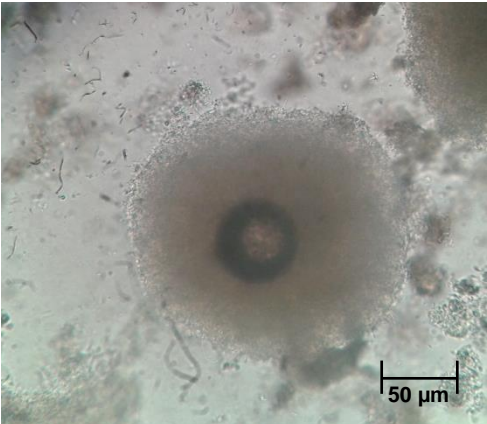

Figura 3.6 Gráfica de remoción de SVT en un reactor híbrido.

En una investigación previa Kavacik y Topaloglu (2010) emplearon un reactor anaerobio cilíndrico metálico para la co-digestión de lactosuero y excretas bovinas manteniendo como parámetro principal una concentración de 8% ST, dicho estudio presentó la remoción de SV con TRH de 5, 10 y 20 días a una temperatura de 34°C, los resultados reportados muestran porcentajes de remoción de 26%, 50% y 31% respectivamente, obteniendo la mayor remoción en un TRH de 10 días.

3.2.1.6 Análisis del Soporte

El análisis microscópico del Extendsphere™ colonizado fue realizado el día 166 de operación y las imágenes obtenidas se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Microscopía del soporte colonizado.

Nivel del soporte dentro del reactor	Imagen microscópica del soporte colonizado observado a 40x de aumento
Superior	
Medio	
Inferior	

Las Figuras 3.7, 3.8 y 3.9 muestran el soporte colonizado de la parte inferior del reactor analizado con diferentes objetivos del microscopio.

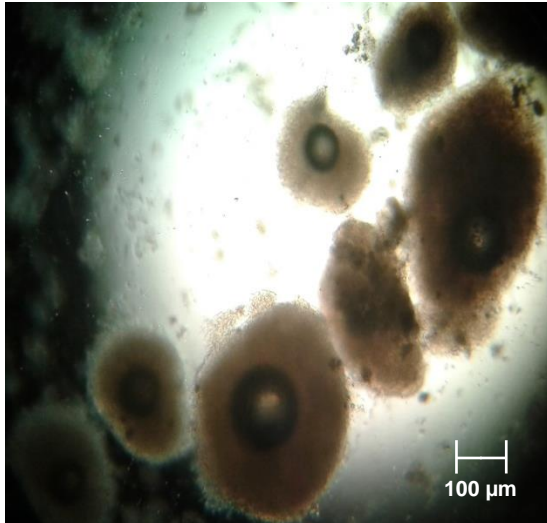


Figura 3.7 Soporte inferior colonizado observado a 10x de aumento.

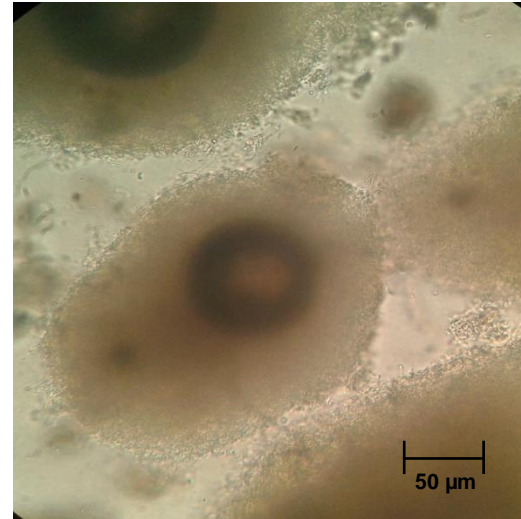


Figura 3.8 Soporte inferior colonizado observado a 40x de aumento.

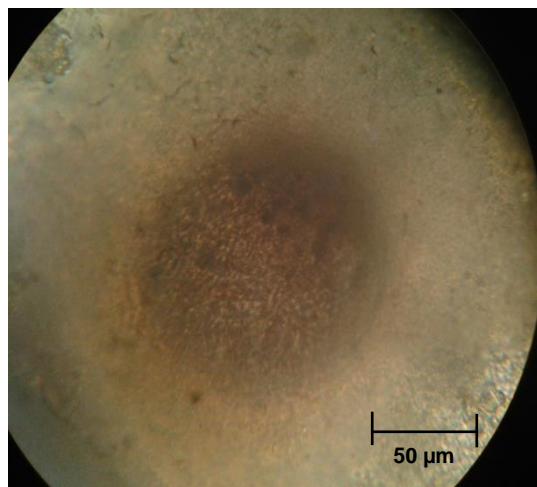


Figura 3.9 Soporte inferior colonizado observado a 100x de aumento.

Con base en el análisis microscópico se determinó que el grosor promedio de la biopelícula del soporte superior, medio e inferior fue de 50 μm, 75 μm y 100 μm respectivamente, con esto se demuestra que la colonización bacteriana en el lecho fluidizado no se vio afectada por emplear el lactosuero como sustrato.

3.3 Biogás

3.3.1 Producción

La Figura 3.10 muestra que la producción de biogás se comenzó a monitorear a partir del día 68 de operación obteniendo valores por encima de 100 L/d, también se aprecia en la gráfica que dichos valores se encuentran cercanos al estimado teóricamente, sin embargo en el día 145 la producción de biogás se vio afectada debido a los problemas de operación mencionados anteriormente, lo cual ocasionó un descenso significativo de ésta, llegando a alcanzar valores de hasta 90 L/d en la etapa final del proyecto.

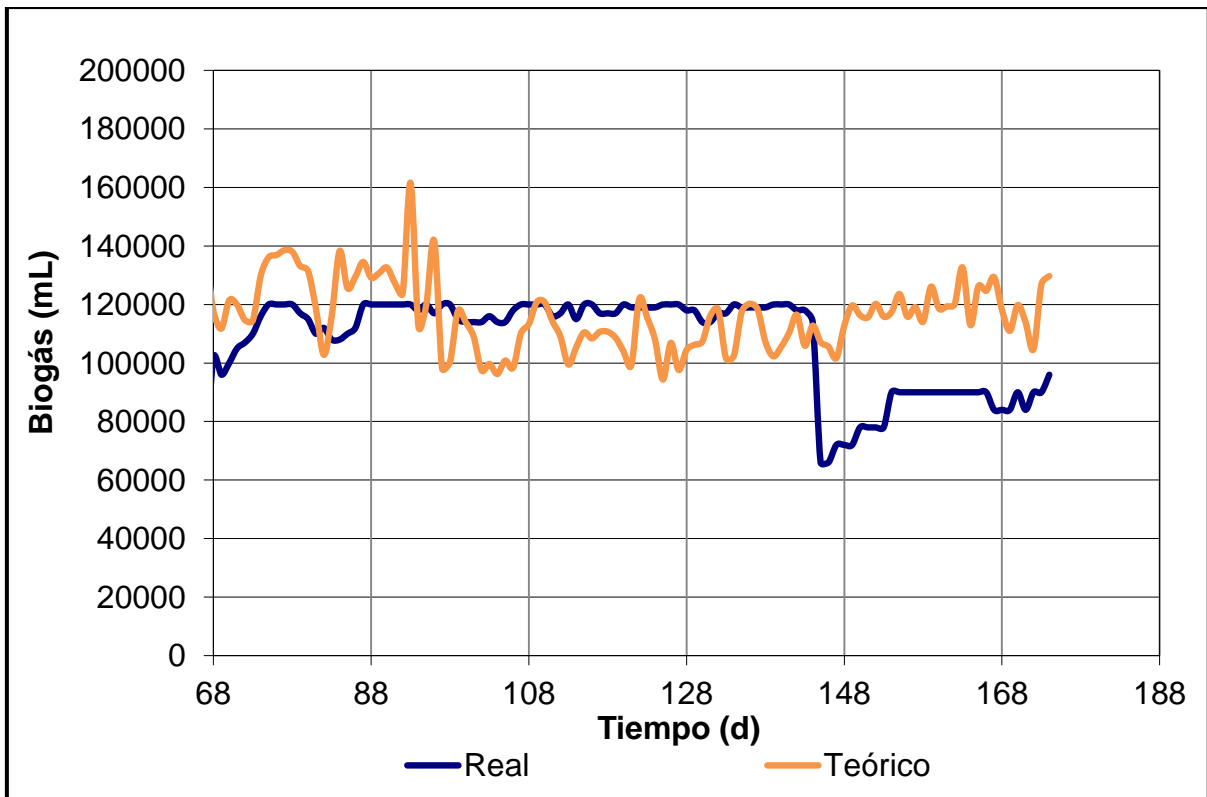


Figura 3.10 Gráfica de producción de biogás.

La producción de biogás entre 100 - 120 L/d representa una producción diaria de biogás por cada litro del reactor (L/LR·d) de aproximadamente 3.22 - 3.8 L/LR·d. Gelegenis *et al.* (2007) emplearon un CSTR alimentado en modo semi-continuo para la co-digestión de pollinaza diluida y lactosuero obteniendo para un TRH de 18 días, una Cva de 4.9 gDQOs/LR·d y una producción de biogás de 2.2 L/LR·d, mientras que Kavacik y Topaloglu (2010) emplearon un reactor anaerobio cilíndrico metálico para la co-digestión de lactosuero y excretas bovinas manteniendo como parámetro principal una concentración de 8% ST, dicho estudio presentó una producción de biogás de 1.510 L/LR·d con un TRH de 5 días y una temperatura de 34°C, por otro lado Malaspina *et al.* (1995) emplearon un reactor híbrido de lecho fluidizado de flujo descendente-ascendente para el tratamiento de lactosuero obteniendo una producción de biogás de 10 L/LR·d con una Cva de alrededor de 10 gDQO/L·d y un TRH de 1 día, mientras que Domínguez-Hernández (2016) reporta una producción de biogás de 8 L/LR·d al emplear un reactor de lecho semifluidizado inverso para tratar un efluente citrícola con una Cva de 40 gDQO/L·d y un TRH de 0.4 días.

Como se puede observar la producción de biogás obtenida empleando el reactor anaerobio híbrido presentado en este proyecto, así como el TRH del mismo fueron mejores que los reportados por Gelegenis *et al.* (2007) y Kavacik y Topaloglu (2010), pero inferiores a los obtenidos por Malaspina *et al.* (1995) y Domínguez-Hernández (2016).

3.3.2 Composición

La Figura 3.11 muestra los resultados obtenidos durante el análisis de biogás realizado por cromatografía de gases, en dicho cromatograma se puede apreciar que se llegó a obtener valores de hasta 60% de CH₄ y 35% de CO₂, sin embargo después del día 141 los valores de biogás se vieron afectados debido a problemas de operación estableciéndose en valores de 50% de CH₄ y 50% de CO₂.

Trabajos previos como el realizado por Malaspina *et al.* (1995) obtuvieron un porcentaje promedio de metano de 53% empleando un reactor híbrido de lecho fluidizado de flujo descendente-ascendente para el tratamiento de lactosuero, mientras que Kavacik y Topaloglu (2010) reportaron que el biogás producido durante la co-digestión de lactosuero y excretas bovinas empleando un reactor anaerobio cilíndrico metálico presentó un contenido de metano de 60%, por otro lado Domínguez-Hernández (2016) reportó porcentajes de metano de hasta 70% en la etapa más estable de su proceso empleando un reactor de lecho semifluidizado inverso para el tratamiento de un residuo citrícola, estableciendo que dicho porcentaje descendió al manejar cargas orgánicas elevadas llegando a situarse en valores por debajo de 45% de metano, debido a que cuando se manejan elevadas concentraciones de DQO dentro de los reactores puede existir un aumento en el crecimiento de diversos grupos bacterianos altamente degradantes pero ajenos a los metanogénicos lo que ocasiona un descenso en la producción de este gas.

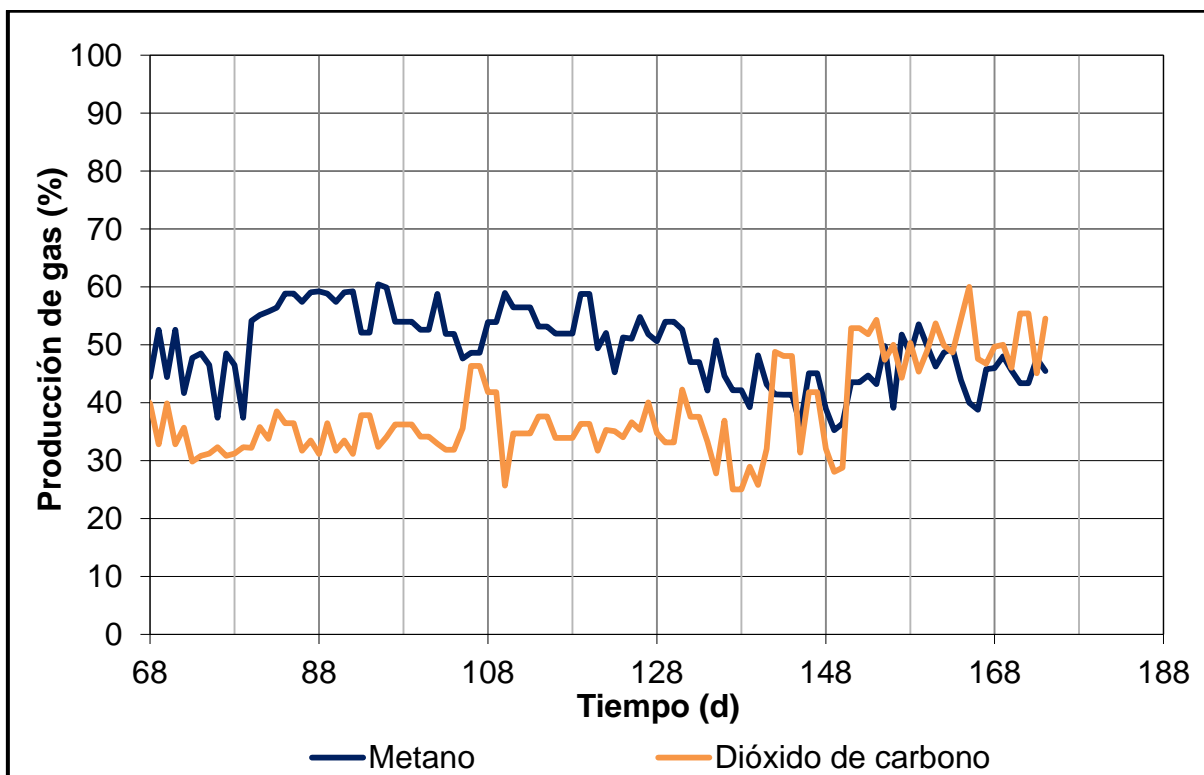


Figura 3.11 Gráfica de composición de biogás.

3.4 Problemas de operación

Durante el desarrollo de este proyecto surgieron una serie de problemas en la operación del reactor, dentro de los que destaca la formación de nata en la parte superior del lecho fluidizado ocasionada por la presencia de grasas en el lactosuero. Como parte del proceso de investigación se intentó resolver la formación de nata en el interior del reactor empleando un pretratamiento de tipo termo-cálcico, sin embargo esta prueba culminó con un resultado inesperado que ocasionó que el soporte fluidizado coagulara y floclulara inutilizándolo definitivamente.

3.4.1 Formación de nata

A partir del día 158 de operación se observó que dentro del reactor se formaba una clase de espuma blanca en la parte superior del lecho fluidizado (Figura 3.12; Figura 3.13), la cual ocasionaba serios problemas de operación y un incremento en la frecuencia con la que se daba mantenimiento y limpieza el reactor, dicha espuma tenía consistencia grasosa, por lo que se realizó un nuevo tipo de tratamiento al suero.



Figura 3.12 Presencia de nata en el lecho fijo.



Figura 3.13 Presencia de nata en el lecho fluidizado.

La Figura 3.14 muestra como la formación de nata en la superficie del lecho fluidizado ocasiona el desplazamiento del soporte a la parte media del reactor y aumenta la probabilidad de ser expulsado por la corriente de salida.

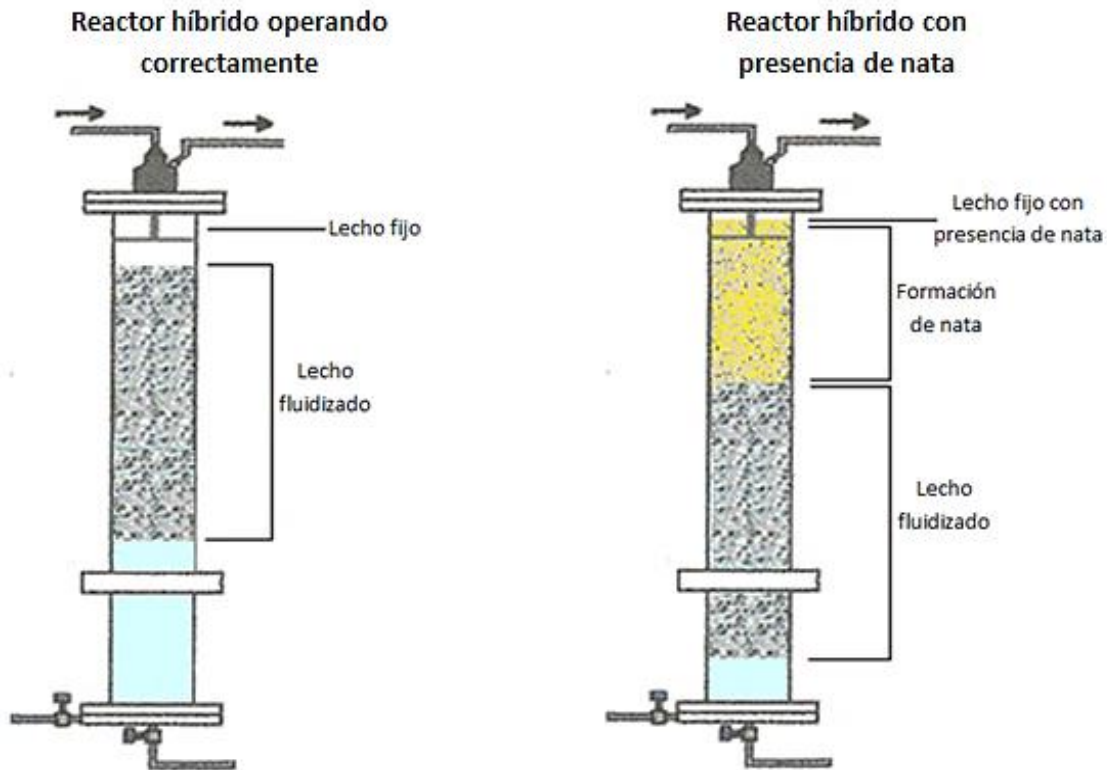


Figura 3.14 Diagrama del desplazamiento del lecho fluidizado por la presencia de nata en el interior del reactor híbrido.

3.4.2 Tratamiento termo-cálcico

Basados en la metodología planteada por Souza *et. al* (2008) para la eliminación de grasas del lactosuero, se dio tratamiento termo-cálcico al suero y como resultado se obtuvo separación de las grasas, las cuales sedimentaron como se puede observar en las Figuras 3.15 y 3.16.



Figura 3.15 Vista frontal del lactosuero bruto y el lactosuero tratado.



Figura 3.16 Vista inferior del lactosuero bruto y el lactosuero tratado.

Se analizó el suero antes y después del tratamiento para conocer si existía variación en sus características. Los resultados se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Caracterización del lactosuero antes y después del tratamiento termo-cálcico.

Determinación	Suero acondicionado (antes del tratamiento)	Suero tratado (después del tratamiento)
pH	3.55	7.34
DQO total	53,600 mg/L	40,000 mg/L
DQO soluble	40,900 mg/L	31,400 mg/L
Agua	94.9 %	93.6 %
ST	50.88 g/L	63.16 g/L
SVT	45.9 g/L	31.68 g/L
SFT	4.98 g/L	31.48 g/L
% SVT	90.21 %	50.15 %

Como parte del proceso de tratamiento termo-cálcico se agregó NaHCO_3 para ajustar el pH entre 7.3 -7.5, esto ocasionó que el valor de SFT reportados en la Tabla 3.5 aumentara y con ello los ST.

A partir del día 185 de operación se dio inicio al proceso de alimentación de suero tratado, con esto se pretendía incrementar la remoción de la DQO y disminuir la producción de nata en el interior del reactor.

3.4.2.1 Coagulación-Floculación del soporte

El día 190 de operación del reactor, después de haber transcurrido 5 días alimentando suero con tratamiento termo-cálcico para observar sus efectos sobre la remoción, se produjo una seria problemática. El soporte comenzó un proceso de coagulación-floculación que ocasionó que el lecho fluidizado precipitara (Figura 3.17; Figura 3.18; Figura 3.19).



Figura 3.17 Reactor híbrido durante el proceso de coagulación-floculación del Extendosphere™ colonizado.



Figura 3.18 Proceso de sedimentación de los flóculos formados por Extendosphere™ colonizado.



Figura 3.19 Extendsphere™ colonizado completamente sedimentado.

Este problema inutilizó el soporte colonizado, ya que al no poderse mantener a flote el lecho no pudo cumplir con su función, por otro lado los intentos por recuperar el soporte precipitado sin afectar la presencia bacteriana fueron inútiles por lo que el lecho tuvo que ser retirado en su totalidad.

3.5 Análisis de resultados con la NOM

La NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales menciona en el punto 4.1 de la sección 4 referente a las especificaciones lo siguiente:

La concentración de contaminantes básicos, metales pesados y cianuros para las descargas de aguas residuales a aguas y bienes nacionales, no debe exceder el valor indicado como límite máximo permisible en la Tabla 2 (Tabla 3.6) de esta Norma Oficial Mexicana. El rango permisible del potencial hidrógeno (pH) es de 5 a 10 unidades.

Tabla 3.6 Tabla 2 de la NOM-001-SEMARNAT-1996.																
Límites máximos permisibles para contaminantes básicos																
Parámetros	Ríos						Embalses naturales y artificiales				Aguas costeras					
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		Estuarios (B)	
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Demanda Bioquímica de Oxígeno₅ (mg/L)	150	200	75	150	30	60	75	150	30	60	150	200	75	150	75	150

P.D. = Promedio Diario; P. M. = Promedio Mensual; N. A. = No es aplicable
(A), (B) y (C): Tipo de cuerpo receptor según la Ley Federal de Derechos.

Manteniendo una concentración de alimentación en el reactor de 5.5 gDQOs/L se logró establecer una Cva de 7 gDQOs/L·d, obteniendo así remociones cercanas al 70% y concentraciones de salida de 2 gDQO_T/L y 1.5 gDQOs/L.

Con base en lo anterior y aplicando las relaciones establecidas en el subtema 2.4 de este trabajo se procedió a estimar la DBO₅ para su comparación con la Norma Oficial Mexicana, los resultados se muestran en la Tabla 3.7

Tabla 3.7 Cálculo de la DBO₅ empleando diferentes relaciones.

Referencia Bibliográfica	Relación	DBO ₅ calculada en la salida del reactor (mg/L)
Lugarido-González (2013)	$DBO_5 = DQO \cdot 0.55$	825
Cisterna O. y Peña (1999)	$DBO_5 = DQO \cdot 0.65$	975
Ronzano y Dapena (S/F)	$DBO_5 = DQO_{total}/2.08$	961.5

Si comparamos cada DBO₅ calculada en la Tabla 3.7 con los valores reportados en la Tabla 3.6 podemos constatar que dicho efluente se encuentra fuera de los límites máximos permisibles reportados en la Norma Oficial Mexicana para su disposición en cualquier tipo de cuerpo receptor.

La comparación anterior muestra que a pesar de remover gran parte de la materia orgánica presente en el lactosuero, el reactor anaerobio híbrido no soluciona en su totalidad la problemática ocasionada por este residuo, ya que al finalizar el tratamiento biológico la cantidad de materia orgánica presente en el efluente tratado aún se encontraba fuera de los límites descritos por la NOM, por lo que para su cumplimiento sería necesario incorporar un pretratamiento y/o un postratamiento para llevar a cabo el cumplimiento de la norma (ver recomendaciones).

Es de gran importancia resaltar que en la actualidad la mayor parte del lactosuero producido es vertido sin tratamiento alguno al medio ambiente aunque sus características contaminantes se encuentren muy por encima de la normatividad vigente, tomando en cuenta lo anterior queda claro que el proceso si representa un gran beneficio pese a que el efluente tratado no cumple con los parámetros establecidos por la norma, ya que el impacto ambiental que ocasiona la disposición del efluente proveniente del reactor anaerobio híbrido es mínimo en comparación con el ocasionado por descargar directamente el lactosuero sin tratamiento previo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- La caracterización del lactosuero demostró que dicho residuo es altamente contaminante, ya que tiene un pH bajo y contiene una gran cantidad de materia orgánica, la cual puede ser aprovechable en el proceso de digestión anaerobia.
- El acondicionamiento del lactosuero bruto disminuyó alrededor de 40% su DQO y 15% la cantidad de SVT, lo cual favoreció la correcta operación del sistema evitando la aglomeración de materia insoluble ocasionada por el ajuste de pH y el punto isoeléctrico de las proteínas.
- Siempre que el pH de alimentación sea ajustado a valores cercanos a la neutralidad, el proceso mantendrá valores de salida relativamente semejantes a los de entrada, lo cual es de gran importancia para el adecuado funcionamiento del proceso de digestión anaerobia, además de que al obtener un efluente con pH neutro estamos disminuyendo las características contaminantes del lactosuero como lo es su elevada acidez.
- El reactor anaerobio híbrido demostró ser estable a lo largo de 183 días de operación, ya que las remociones de la DQO y SVT se mantuvieron constantes, presentando inestabilidad solo en los primeros días posteriores al incrementó de la Cva.
- La mejor tasa de remoción de DQO_T , DQO_S y SVT en el reactor híbrido fue de 70% operando con una Cva de 7 gDQOs/L·d y un TRH de 19 horas, por lo que podemos concluir que la remoción presentada en el reactor híbrido es aceptable tomando en cuenta que el TRH es pequeño.

- La microscopía del soporte mostró una adecuada colonización bacteriana sobre la superficie del Extendsphere™, con lo cual se concluye que el crecimiento bacteriano no se ve afectado por emplear lactosuero como sustrato en el reactor anaerobio híbrido.
- El tratamiento termo-cálcico resultó ser perjudicial para el soporte del reactor, ya que lo inutilizó de forma definitiva haciendo que este floclara y se depositara en la parte inferior del reactor, concluyendo así que el tratamiento termo-cálcico es un pretratamiento inadecuado para la digestión anaerobia.
- La formación de nata en el interior del reactor y la sobrefluidización del lecho son los principales problemas de operación que presenta el reactor anaerobio híbrido, pero con un adecuado control de la sobrefluidización y mantenimiento constante para retirar la nata el reactor puede operar correctamente.
- El reactor anaerobio híbrido mostrado en este trabajo representa una buena opción para dar tratamiento a los residuos de la industria quesera ya que éste es capaz de remover más de la mitad de la materia orgánica presente en el sustrato en un periodo de tiempo corto y a su vez produce grandes volúmenes de biogás con una buena calidad de metano.
- Con base en los límites máximos permisibles reportados en la NOM-001-SEMARNAT-1996 se concluye que aunque el tratamiento biológico realizado por medio del reactor anaerobio híbrido no es suficiente para que el efluente tratado cumpla con los parámetros establecidos, si representa un gran apoyo para la minimización y aprovechamiento de la materia orgánica presente en el lactosuero.
- El impacto ambiental ocasionado por la disposición del efluente tratado proveniente del reactor anaerobio híbrido es mínimo en comparación con el originado por descargar directamente el lactosuero sin tratamiento alguno.

RECOMENDACIONES

Recomendaciones Generales:

- Desarrollar una investigación acerca de las características del lactosuero que favorecen la formación de nata en el interior del reactor y como evitar dicho fenómeno. Este estudio podría aportar una mejora en la operación del reactor y disminuir la frecuencia de mantenimiento ocasionado por la presencia de grandes volúmenes de nata.
- Determinar las condiciones que permitan optimizar el funcionamiento del reactor anaerobio híbrido para obtener mejores remociones y poder manejar Cva's más altas sin que se presenten problemas de operación al emplear lactosuero como sustrato.
- Implementar una placa perforada en la parte inferior del reactor como la empleada por Domínguez-Hernández (2016) capaz de contrarrestar la sobrefluidización del lecho reteniéndolo para evitar que sea expulsado por la corriente de salida del reactor.

Recomendaciones para el cumplimiento de la NOM:

- Incorporar un postratamiento para disminuir la materia orgánica presente en el efluente tratado proveniente del reactor anaerobio híbrido, para que de esta forma el efluente final cumpla con los límites máximos permisibles reportados en la NOM-001-SEMARNAT-1996.
- Probar otra clase de pretratamientos que favorezcan el incremento de la tasa de remoción del reactor sin afectar su operación o la estabilidad de las bacterias encargadas del proceso de digestión anaerobia.

- Evitar todos aquellos pretratamientos y postratamientos que ocasionen la formación de compuestos inhibidores de las bacterias presentes en el proceso, compuestos altamente contaminantes que incrementen la toxicidad del efluente tratado, o compuestos con características bactericidas.

Tratamientos sugeridos en apoyo a las recomendaciones para el cumplimiento de la NOM

Como se describió en la sección 3.5 de este trabajo el efluente obtenido del reactor anaerobio híbrido no cumple con la normatividad vigente para su disposición en aguas y bienes nacionales, por lo que para remediar esta problemática se recomienda acoplar otro tipo de procesos que en conjunto con el reactor anaerobio híbrido sean capaces de obtener un efluente tratado con las características adecuadas para su disposición en cuerpos receptores.

Andrades B. (2008) realizó una investigación respecto a los efluentes vertidos del sector lácteo y los procesos empleados para la depuración de estos contaminantes, en dicha investigación menciona que los sistemas de depuración de aguas residuales deben ser aquellos que garanticen el cumplimiento de los límites establecidos por la legislación en función del punto al que vierte la empresa, por lo que una planta de tratamiento para efluentes lácteos requiere ser diseñada básicamente para remover los niveles contaminantes de parámetros tales como: DBO5, aceites y grasas, sólidos suspendidos, y para corregir el pH del efluente. Por lo tanto la Tabla R.1 proporciona información respecto a las eficiencias en la reducción de niveles contaminantes a través de las diferentes etapas de un proceso de tratamiento de aguas residuales, por otro lado la Tabla R.2 muestra los diferentes sistemas que se pueden adoptar para la depuración de contaminantes provenientes de la industria láctea.

Tabla R.1 Eficiencias de reducción de niveles contaminantes (valores basados en experiencias en Chile) (Andrades B., 2008).

Parámetro	Antes del tratamiento	Después del tratamiento fisicoquímico	Después del tratamiento biológico
DBO ₅ (mg/L)	2,000-6,000	600-2,500 (60%)	< 30
Sólidos suspendidos (mg/L)	1,000-6,000	100-300 (98%)	< 30
Aceites y grasas (mg/L)	200-2,000	100 (99%)	< 50

Tabla R.2 Tratamientos recomendados para la depuración de aguas residuales del sector lácteo (Andrades B., 2008).

Etapa de tratamiento	Descarga a cuerpos superficiales			Descarga a alcantarillado		
	A. R.	R.	E. A.	A. R.	R.	E. A.
Separación de sólidos gruesos	✓			✓		
Separación de sólidos molestos	✓			✓		
Separación de sólidos no putrescibles	✓			✓		
Separación de sólidos finos		✓			✓	
Desgrasadora o coalescedores		✓			✓	
Estanque de homogenización	✓			✓		
Ajuste de pH	✓			✓		
Coagulación			✓			✓
Floculación		✓		✓		
Flotación		✓		✓		
Neutralización			✓			✓
Tratamiento biológico	✓					✓
Sedimentación secundaria	✓					✓

A. R. = Altamente recomendado; R. = Recomendado; E. A. = En función de la solución adoptada

Cuando se desean elevados rendimientos de depuración, normalmente la mejor tecnología disponible es una combinación de una etapa anaerobia a la que continua una aerobia, conforme al esquema siguiente:

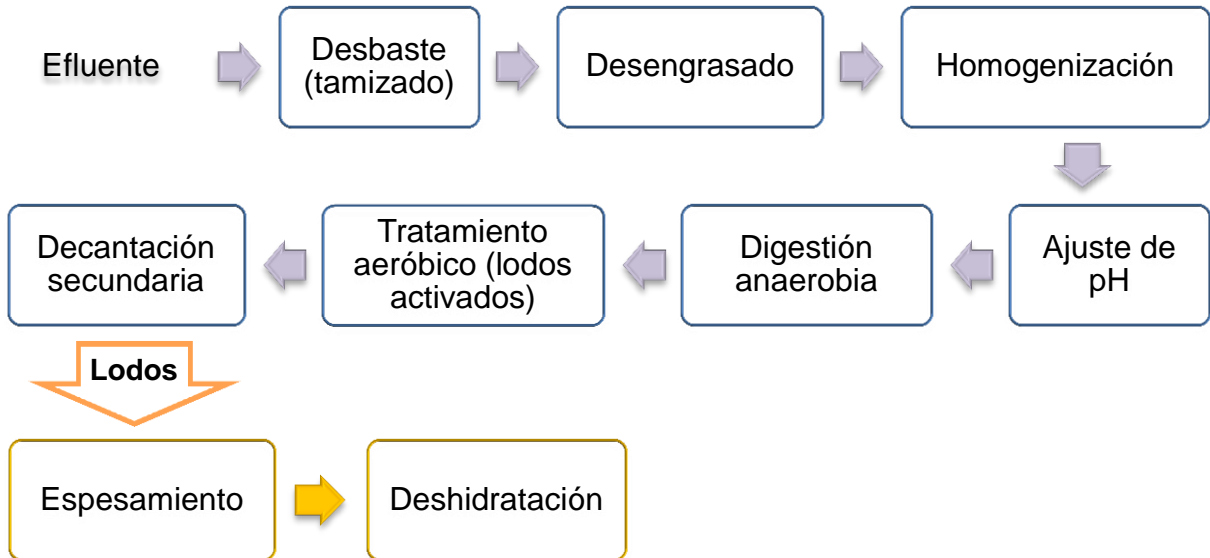


Figura R.1 Proceso para el tratamiento de agua residual proveniente del sector lácteo.

Andrades B. (2008) reportó el rendimiento de un proceso empleado para el tratamiento de las aguas residuales provenientes de una instalación situada en Granada, España que procesa en promedio 300,000 L/d de leche para producir leche en polvo, mantequilla y leche pasteurizada. En las operaciones de lavado se generan en promedio 170 m³/d de efluentes, con una temperatura que oscila entre 30 – 60 °C y un pH que varía entre 2 y 12 unidades.

La planta cuenta con pozo de bombeo, desarenador, tanque de homogenización, tanque de flotación, reactores UASB, filtro percolador y decantador secundario. El sistema de tratamiento fisicoquímico garantiza una calidad apropiada del agua antes de ingresar a los reactores UASB.

La Tabla R.3 muestra la comparación entre las concentraciones de las características fisicoquímicas básicas a la entrada y salida del proceso de tratamiento reportado por Andrades B. (2008).

Tabla R.3 Composición fisicoquímica del efluente del sector lácteo a la entrada y salida de la planta de tratamiento situada en Granada, España (Andrades B., 2008).

Parámetro	Entrada	Salida
DQO (mg/L)	7.000	< 150
DBO ₅ (mg/L)	4.000	< 80
Sólidos suspendidos (mg/L)	1.300	< 100
Grasas y aceites (mg/L)	950	< 50

Por otro lado Gandarillas P. *et al.* (2009) recogieron el diseño de la estación depuradora de aguas residuales de la central lechera situada en Castañeda, España con el fin de cumplir los límites de vertido establecidos por la legislación.

La Figura R.2 muestra el diagrama del proceso descrito por Gandarillas P. *et al.* (2009), destacando que la planta de depuradora empleó como tratamiento biológico un proceso de lodos activados.

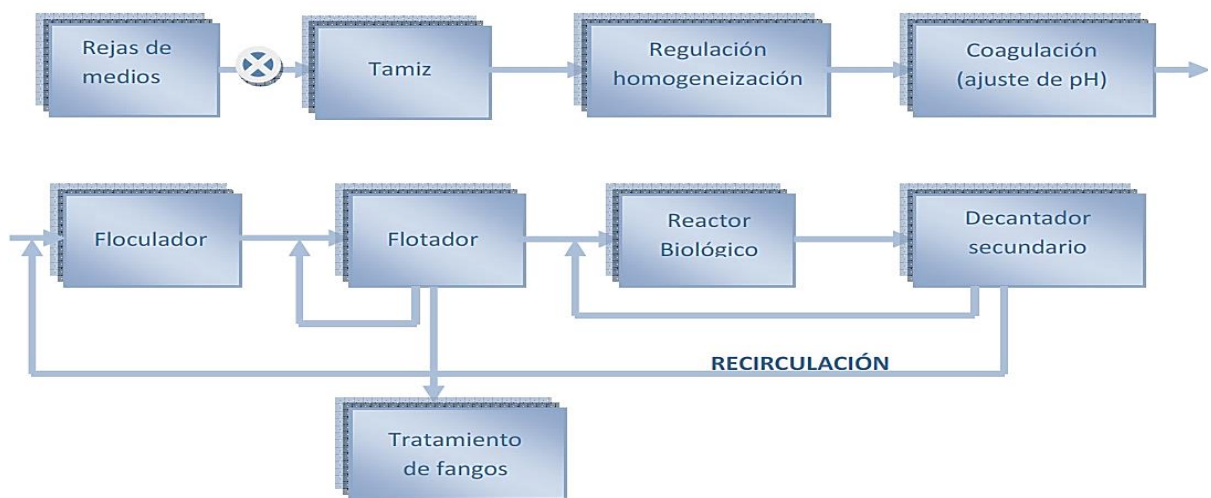


Figura R.2 Proceso para el tratamiento de agua residual proveniente de la central lechera situada en Castañeda, España.

Recientemente Seba-Bautista (2013) evaluó un sistema lagunar in situ a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales lácteas de un municipio del estado de Veracruz, en dicho proceso se empleó una trampa de grasas en lugar de la flotación como pretratamiento de la etapa biológica. La Figura R.3 muestra el diagrama del sistema empleado para el tratamiento del efluente lácteo.

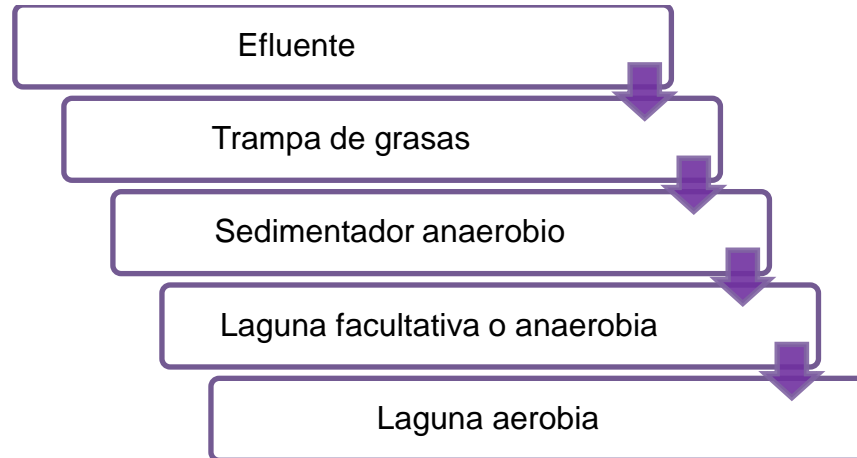


Figura R.3 Proceso para el tratamiento de agua residual láctea empleando un sistema lagunar.

Con base en los resultados reportados por Andrades B. (2008), Gandarillas P. *et al.* (2009) y Seba-Bautista (2013) se hacen las siguientes recomendaciones para mejorar el tratamiento del lactosuero empleando un reactor anaerobio híbrido y poder cumplir con los límites máximos permisibles de contaminantes básicos establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996:

- Evaluar la influencia del proceso de desengrasado (trampa de grasas o sistema de flotación) acoplado como pretratamiento del reactor anaerobio híbrido en la formación de nata en el interior del reactor y la remoción de contaminantes básicos para el cumplimiento de la norma.

- Evaluar las características del efluente final al emplear un proceso aerobio (lodos activados) como postratamiento del reactor anaerobio híbrido para el cumplimiento de la norma.
- Evaluar las características del efluente final al emplear 2 reactores anaerobios híbridos conectados en serie para el cumplimiento de la norma.
- En caso de que ninguno de los procesos sugeridos en los puntos anteriores sea capaz de alcanzar las características requeridas para su disposición con el cumplimiento de la normatividad vigente, se recomienda evaluar los procesos:
 - Desengrasado - tratamiento anaerobio - tratamiento aerobio
 - Desengrasado - tratamiento anaerobio - tratamiento anaerobio

Para el cumplimiento de los parámetros establecidos en la NOM para su disposición en aguas y bienes nacionales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar-Montor, Y. d. (2014). Estudio integral de digestión anaerobia en dos etapas para el tratamiento de la fracción soluble de residuos sólidos orgánicos municipales a nivel laboratorio. Tesis de grado. Maestría en Ciencias en Ingeniería Química. Instituto Tecnológico de Orizaba. México.
- Alvarado-Lassman, A., Rustrián, E., García-Alvarado, M. A., Rodríguez-Jiménez, G. C. y Houbron, E. (2008). Brewery wastewater treatment using anaerobic inverse fluidized bed reactors. *Bioresource Technology*, 99: 3009-3015.
- Andrades B., J. A. (2008). *Los vertidos del sector lácteo*. Escuela de Organización Industrial. Maestría Profesional en Ingeniería y Gestión Medio Ambiental: http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:48159/componente48157.pdf (consultada Noviembre, 2015)
- Arnaiz, C., Buffiere, P., Elmaleh, S., y Lebrato, J. y. (2003). Anaerobic digestion of dairy wastewater by inverse fluidization: the inverse fluidized bed and the inverse turbulent bed reactors. *Environmental Technology*, 24: 1431-1443.
- Burke, D. A. (2001). Dairy waste anaerobic digestion handbook. Environmental Energy Company United States of America.
- Cabrera N., A., Lammoglia V., M. A., Daniel R., I. C., Diaz I., D. L. y Elorza M., P. (2013). Estrategias para la suplementacion becerros lactantes. *Revista Científica Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 1: 59-65.
- Carvalho, F., Prazeres, A. R. y Rivas, J. (2013). Cheese whey wastewater: Characterization and treatment. *Science of the Total Environment*, 445-446: 385-396.
- Cisterna O., P., y Peña, D. (1999). Determinación de la relación DQO/DBO₅ en aguas residuales de comunas con población menor a 25,000 habitantes en la VIII

- región. *Water Environment Federation. Agua y medio ambiente: desafíos del tercer milenio, Chile*, 1-19.
- Comino, E., Riggio, V. A. y Rosso, M. (2012). Biogas production by anaerobic co-digestion of cattle slurry and cheese whey. *Bioresource technology*, 114: 46-53.
- CONAGUA (2013). Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento. Edición 2013.
- Cota-Navarro, C. B., Carrillo-Reyes, J., Dávila-Vázquez, G., Alatraste-Mondragón, F. y Razo-Flores, E. (2011). Continuous hydrogen and methane production in a two-stages cheese whey fermentation system. *Water Science and Technology*, 367-374.
- Dávila-Vázquez, G., Alatraste-Mondragón, F., de León-Rodríguez, A. y Razo-Flores, E. (2008). Fermentative hydrogen production in batch experiments using lactose, cheese whey and glucose: Influence of initial substrate concentration and pH. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33: 4989-4997.
- Dávila-Vázquez, G., Cota-Navarro, C. B., Rosales-Colunga, L. M., de León-Rodríguez, A. y Razo-Flores, E. (2009). Continuous biohydrogen production using cheese whey: Improving the hydrogen production rate. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34:4296-4304.
- Diamantis, V. I., Kapagiannidis, A. G., Ntougias, S., Tataki, V., Melidis, P. y Aivasidis, A. (2014). Two-stages CSTR-UASB digestion enables superior and alkali addition-free cheese whey treatment. *Biochemical Engineering Journal*, 84: 45-52.
- Domínguez-Hernández, E. (2016). Diseño e implementación de un Reactor de Lecho Semifluidizado Inverso para el tratamiento anaerobio de un efluente de la

- industria cítrica. Tesis de grado. Maestría en Ciencias en Ingeniería Química. Instituto Tecnológico de Orizaba. México.
- FAO (2011). Manual de biogás. Chile.
- Ferreira-Rosa, P. R., Santos, S. C., Kimiko-Sakamoto, I., Amâncio-Varesche, M. B. y Silva, E. L. (2014). Hydrogen production from cheese whey with ethanol-type fermentation: Effect of hydraulic retention time on the microbial community composition. *Bioresource Technology*, 161: 10-19.
- Galván D., M. (2005). *Proceso básico de la leche y el queso*. http://www.revista.unam.mx/vol.6/num9/art87/sep_art87.pdf (consultada Marzo, 2015)
- Gandarillas P., L., Sánchez M., T., y Serrano V., R. (2009). *Estación depuradora de aguas residuales de una industria láctea*. Escuela de Organización Industrial. Maestría en Ingeniería y Gestión del Agua http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:36163/componente36162.pdf (consultada Noviembre, 2015)
- García-Calderon., D., Buffiere, P., Moletta, R. y Elmaleh, S. (1998). Anaerobic digestion of wine distillery wastewater in down-flow fluidized bed. *Water Resources*, 32: 3593-3600.
- Gelegenis, J., Georgakakisb, D., Angelidakic, I. y Mavrisa, V. (2007). Optimization of biogas production by co-digesting whey with diluted poultry manure. *Renewable energy* , 32: 2147-2160.
- Gerardi, M. H. (2003). The microbiology of anaerobic digester. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, United States of America.
- Hernández-Herrera, H. (2005). Tratamiento de lactosuero hidrolizado por medio de un reactor UASB. Tesis de grado. Ingeniería Agroindustrial. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. México.
- Hernández P., A. (2003). *Microbiología Industrial*. Costa Rica: UNED.

- IDAE (2007). Biomasa: Digestores anaerobios. Madrid.
- INAES (S/F). Quesos. http://www.inaes.gob.mx/doctos/pdf/guia_empresarial/quesos.pdf (consultada Marzo, 2015)
- Inda C., A. E. (2000). Optimización de rendimientos de quesería. OEA.
- Kavacik, B. y Topaloglu, B. (2010). Biogas production from co-digestion of a mixture of cheese whey and dairy manure. *Biomass and bioenergy*, 34: 1321-1329.
- Kumar, S. y Bharti, A. (2012). Management of Organic Waste. IN-TECH Publication.
- Lugardo-González, D. A. (2013). Caracterización fisicoquímica de lactosuero en municipios de la región central del estado de Veracruz. Trabajo de Experiencia Recepcional. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Veracruzana. México.
- Malaspina, F., Cellamare, C. M., Stante, L. y Tilche, A. (1995). Anaerobic treatment of cheese whey with downflow-upflow hybrid reactor . *Bioresource Technology*, 55:131-139.
- Mollea, C., Marmo, L. y Bosco, F. (2013). Valorisation of Cheese Whey, a By-Product from the Dairy Industry. En Muzzalupo, I., *Food Industry* (Capítulo 24). InTech.
- NOM-001-SEMARNAT-1996. *Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales* . México.
- Noyola, A., y Morgan-Sagastume, J. M. (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas*. UNAM. México
- Oyanedel, V., Garrido, J. y Méndez, R. (2003). Nuevos biorreactores híbridos para el tratamiento de aguas residuales. *Ingeniería Química*, 401: 171-178.
- Perna, V., Castelló, E., Wenzel, J., Zampol, C., Fontes L., D. M., Borzacconi, L., y otros. (2013). Hydrogen production in an upflow anaerobic packed bed reactor

- used to treat cheese whey. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38: 54-62.
- Raganati, F., Olivieri, G., Procentese, A., Russo, M. E., Salatino, P. y Marzocchella, A. (2013). Butanol production by bioconversion of cheese whey in a continuous packed bed reactor. *Bioresource Technology*, 138: 259-265.
- Rajasimman, M. y Karthikeyan, C. (2009). Optimization studies in an inverse fluidized bed bioreactor for starch wastewater treatment. *International Journal of Environmental Research*, 4: 569-574.
- RISE-AT (1998). Review of current status of anaerobic digestion technology for treatment of municipal solid waste. Tailandia.
- Rodríguez F., A., Letón G., P., Rosal G., R., Dorado V., M. y Villar F., S. (2006). *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. Elecé Industria Gráfica. Madrid
- Ronzano, E., y Dapena, J. L. (S/F). *Medida de la contaminación Orgánica*. Universidad de Salamanca. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua (CIDTA): <http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/organica.pdf> (consultada Noviembre, 2015)
- Salazar G., M. (2009). Sistemas integrales de tratamiento de aguas residuales, mediante el uso combinado de digestión anaerobia y microalgas. *Contactos*, 73: 16-22.
- Secretaría de Economía (2012). *Análisis del sector lácteo en México*. México.
- Seba-Bautista. (2013). Evaluación de un sistema lagunar in situ a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales lácteas del municipio de Miahuatlán, Veracruz. Tesis de grado. Ingeniería Química. Universidad Veracruzana. México.

- SEMARNAT (2010). Especificaciones técnicas para el diseño y construcción de biodigestores en México . México.
- SENA (1987). Derivados lacteos, generalidades del queso. http://biblioteca.sena.edu.co/exlibris/aleph/u21_1/alephe/www_f spa/icon/31496/pdf/b5_car1.pdf (consultada Marzo, 2015)
- SIAP-SAGARPA (2014). Boletín de Leche. México
- Souza, R. R., Gimenes, M. L., Costa, S. C. y Müller, C. M. (2008). Eliminación de grasas del suero de queso para obtener proteínas y lactosa. *Información Tecnológica*, Vol. 19 (2): 41- 50.
- Teniza-García, O. (2008). Estudio del suero de queso de leche de vaca y propuesta para el reuso del mismo. Tesis de grado. Maestría en Tecnología Avanzada. Instituto Politécnico Nacional Unidad Tlaxcala. México
- USDA (2014). Dairy: World Markets and Trade. *Foreign Agricultural Service*.
- US EPA (2013). Organics: Anaerobic Digestion Science. <http://www.epa.gov/region9/organics/ad/science.html>. (consultada Febrero, 2015)
- US EPA (2014). Anaerobic digestion. <http://www.epa.gov/agstar/anaerobic/ad101/> (consultada Febrero, 2015)
- Valencia-Denicia., E. y Ramírez-Castillo., M. (2009). La industria de la leche y la contaminación del agua. *Elementos*, 73: 27-31.
- Venetsaneas, N., Antonopoulou, G., Stamatelatou, K., Kornaros, M. y Lyberatos, G. (2009). Using cheese whey for hydrogen and methane generation in two-stage continuous process with alternative pH controlling approaches. *Bioresourse Technology*, 100: 3713-3717.