

UCH-FC
Q. Ambiental
V 294
C.1



FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

“Producción de biogás a través de lactosuero producido por la industria quesera”

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de:

Químico Ambiental

DANIELA PATRICIA VARGAS VÁSQUEZ

Director de Seminario de Título: Francisco Bossel Igor
Profesor Patrocinante: Mag. Julio Hidalgo

Enero de 2015
Santiago – Chile



INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por el o (la) candidato (a):

DANIELA PATRICIA VARGAS VÁSQUEZ

“Producción de biogás a través de lactosuero producido por la industria quesera”

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Químico Ambiental

COMISIÓN DE EVALUACIÓN

Químico Francisco Bossel Igor
Director Seminario de Título

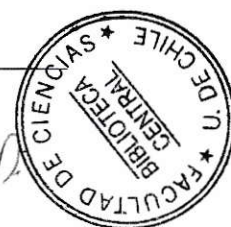
Firma manuscrita de Francisco Bossel Igor sobre una línea horizontal.

Mag. Julio Hidalgo.
Profesor Patrocinante

Firma manuscrita de Julio Hidalgo sobre una línea horizontal.

Dra. María Cecilia Rojas
Presidenta

Firma manuscrita de María Cecilia Rojas sobre una línea horizontal.



M. Cs. Héctor Bravo
Corrector

Firma manuscrita de Héctor Bravo sobre una línea horizontal.

Santiago de Chile, Enero de 2015

INDICE

AGRADECIMIENTOS	iv
ABREVIATURAS	vi
GLOSARIO	viii
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
1.INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes Generales	1
1.1.1 Generación de biogás mediante digestión bacteriana anaeróbica	4
1.1.2 Proceso de fermentación anaeróbica	5
1.1.3 Condiciones del ambiente microbiano requeridas para la digestión anaerobia	14
1.2 Antecedentes Específicos	16
1.2.1 La industria láctea chilena	16
1.2.2 Industria láctea menor	16
1.2.3 Procesos productivos en la elaboración de queso.....	20
1.2.4 Residuos generados durante la elaboración de productos lácteos	23
1.2.5 Características del Lactosuero	24
1.2.6 Valorización del residuo.....	25

1.2.7	Descripción de la problemática a tratar	27
1.3	Objetivos del Seminario.....	28
1.3.1	Objetivo General	28
1.3.2	Objetivos Específicos	28
2.	MATERIALES Y METODOLOGÍA	29
2.1	Materiales	29
2.2	Metodología	30
2.2.1	Análisis de la información disponible.....	30
2.2.1.1	Potencial de cogeneración.....	30
2.2.1.2	Valorización energética del lactosuero.	32
2.2.2	Visitas a terreno.....	34
2.2.2.1	Obtención y caracterización del Residuo Industrial Líquido (RIL).....	34
2.2.2.2	Obtención y caracterización del Inóculo bacteriano	35
2.2.3	Metodología de ensayo de degradabilidad	36
2.2.3.1	Medición de Metano generado.....	41
2.2.3.2	Actividad metanogénica específica de los inóculos (AME)	42
2.2.3.3	Reducción o abatimiento de lactosuero.....	42
3.	RESULTADOS	43
3.1	Potencial de cogeneración de una empresa tipo del sector lácteo menor. .	43

3.2	Potencial energético del sector lácteo menor	43
3.3	Ensayo de degradabilidad	44
3.3.1	Medición diaria de Metano.....	45
3.3.1.1	Generación diaria de Metano de cada inóculo y blanco lactosuero.	45
3.3.1.2	Generación de diaria Metano con lactosuero al 25%v/v.....	46
3.3.2.3	Generación diaria de Metano con lactosuero al 50%v/v.....	47
3.3.2.4	Generación diaria de Metano con lactosuero concentrado.	48
3.3.2	Producción acumulada de Metano.....	49
3.3.2.1	Metano acumulado de cada inóculo y blanco lactosuero.....	49
3.3.2.2	Metano acumulado con lactosuero al 25%v/v.	50
3.2.2.3	Metano acumulado con lactosuero al 50%v/v.	51
3.2.2.4	Metano acumulado con lactosuero concentrado.	52
3.3.3	Determinación de la actividad metanogénica específica (AME).	53
3.3.4	Reducción o abatimiento de lactosuero.....	54
4.	DISCUSIÓN	56
4.1	Inóculo de purín	57
4.2	Inóculo lodo activo	58
4.3	Inóculo lodo granular	59
4.4	Actividad metanogénica específica de los inóculos	60

4.5 Lavado de biogás, cuantificación de Metano	60
5. CONCLUSIONES	61
6. REFERENCIAS	63
7. ANEXOS	66
7.1 Metodología utilizada en el cálculo de sólidos totales y sólidos volátiles. ..	66
7.1.1 APHA, 2540 B.....	66
7.1.2 APHA, 2540 E.....	66
7.2 Metodología para la determinación de la DQO	67
7.3 Cálculos	68
7.3.1 Producción de metano para el abatimiento de 1Kg de DQO.....	68
7.3.2 Producción de metano para una empresa promedio del sector lácteo menor	69
7.3.3 Potencial energético para el sector lácteo menor	69
7.3.3.1 Energía térmica	70
7.3.3.2 Energía eléctrica.....	71
7.3.3.3 Energía total cogenerada.....	71
7.3.4 Cálculo de la actividad metanogénica	72

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Etapas de proceso de selección de un residuo con valor energético	3
Figura 2. Esquema de reacciones de la digestión anaerobia (Cairó y Paris, 1988)	4
Figura 3. Síntesis del Piruvato a partir de glucosa.....	7
Figura 4. Fermentación del piruvato a ácidos de cadena corta y otros productos (continúa).....	8
Figura 5. Oxidación de los ácidos de cadena corta hasta acetato, para la posterior producción de metano.....	12
Figura 6. Variación leche procesada de la industria menor en los últimos años y su precio por Litro	17
Figura 7. Variación de queso y quesillo en la industria menor durante los últimos años.	18
Figura 8. Producción de queso a nivel regional durante los últimos años en la industria menor	19
Figura 9. Producción de Quesillo a nivel regional durante los últimos años en la Industria Menor.....	20
Figura 10. Proceso de producción y generación de RIL de la producción de queso, quesillo. (Elaboración propia).....	21
Figura 11 .Estructura química de la Lactosa, principal componente del lactosuero	25
Figura 12. Esquema del procedimiento de una prueba de degradabilidad.	36
Figura 13. Matriz de 13 ensayos con tres diferentes inóculos y con lactosuero a tres distintas concentraciones.	38

Figura 14. Montaje de ensayo de degradabilidad, (a) Agitador magnético y ensayo, (b) Lavado de biogás generado con una solución alcalina de NaOH al 15%, (c) Medición de biogás por desplazamiento de agua, (d) Baño termorregulador, (e) Termómetro digital.	39
Figura 15. Generación diaria de Metano del blanco y cada uno de los inóculos.....	45
Figura 16. Producción de Metano en los ensayos con lactosuero al 25%v/v con tres inóculos.....	46
Figura 17. Producción de Metano en los ensayos con lactosuero al 50%v/v con tres inóculos.....	47
Figura 18. Producción de Metano en los ensayos con lactosuero al 100%v/v con tres inóculos.....	48
Figura 19. Acumulación de Metano para cada inóculo y blanco lactosuero.	50
Figura 20. Acumulación de Metano a partir de lactosuero al 25%v/v, con tres inóculos.	51
Figura 21. Acumulación de Metano a partir de lactosuero al 50%v/v, con tres inóculos.	52
Figura 22. Acumulación de Metano a partir de lactosuero 100%v/v, con tres inóculos.	53
Figura 23. Actividad metanogénica de lactosuero a distintas concentraciones y tres inóculos.....	54

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Bacterias que participan en el proceso anaeróbico con sus respectivos sustratos y productos en cada una de las fases.....	6
Tabla 2. Reacciones acetogénicas.....	11
Tabla 3. Valores promedio de parámetros físico-químico de RILes de la industria quesera. (Cortés & Montalvo, 2010)	23
Tabla 4.Composición nutricional general de lactosuero. (FAO, 1985)	24
Tabla 5. Materiales utilizados para el ensayo	29
Tabla 6. Equipos utilizados durante el ensayo.....	30
Tabla 7. Reactivos utilizados durante el ensayo.	30
Tabla 8. Parámetros físicoquímicos evaluados en el lactosuero y su metodología	34
Tabla 9. Caracterización física de los inóculos bacterianos y la metodología utilizada..	36
Tabla 10. Condiciones de entrada de cada uno de los ensayos de degradabilidad.	40
Tabla 11. Potencial energético para el sector lácteo menor.....	44
Tabla 12. Parámetros físico-químico de lactosuero e inóculos bacterianos.	44
Tabla 13. Abatimiento de lactosuero, porcentaje de variación de pH y DQO	55



Nací en la ciudad de Curicó un 5 de Marzo de 1989, alegrando a mis padres, Marcelino y Patricia, siendo la hermana chica de Felipe. Juntos crecimos en un pequeño pueblo de la Sexta región, Toquihua, un lugar maravilloso que se convertiría en mi relajó durante el estrés universitario.

Realicé mis estudios básicos y medios en el colegio Santa Inés de San Vicente de Tagua Tagua, en donde exploté mi versatilidad por la música y la ciencia. Es aquí donde tome interés por la Química, cuya labor de mi profesora de la época fue fundamental; tomando a finales de mi enseñanza media la opción de realizar la escuela de verano de Química, para alumnos secundarios que dicta la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de nuestra casa de estudios, reafirmando a que éste sería mi camino profesional y que la Chile sería la Universidad que me diera un sello profesional.

Ingresé a la carrera de Química Ambiental, por el inmenso amor que siento por la naturaleza y a su uso responsable. Durante mi paso por la Universidad me destacué por ser participativa, integré la consejería de Ciencias el año 2009-2010 por el movimiento gremial “La Chile para todos” del cual me siento orgullosa de haber sido parte, por los

proyectos que llevamos a cabo y por los grandes amigos que hice en esa época que hasta el día de hoy son un gran apoyo.

Académicamente, realicé mi unidad de investigación con el Dr. Raúl Morales, Dr. Richard Toro y Dr. Manuel Leiva, en el centro de Ciencias Ambientales, en Química Atmosférica, de la cual, logramos publicar en la *Microchemistry Journal* el trabajo titulado “*Estimating the uncertainty in the atmospheric ammonia concentration in an urban area by Ogawa passive samplers*”. Al egresar, surgió un interés por la contaminación de las aguas, lo cual, me llevó a realizar asesorías en el Consejo Nacional de Producción Limpia, llevamos a cabo un plan estratégico ambiental, con respecto al uso del agua en zonas donde la demanda hídrica de los ríos está sobreexplotada.

Finalmente, llegué a ASQ-Ltda., a desarrollar el proyecto de generación de energía con residuos lácteos, decidiéndome a que éste sería mi Seminario de Título.

.....A mi familia, papá, mamá y pipe

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a en primer lugar a Dios, por darme unos padres excelentes que apostaron a ganadores por sus dos hijos, sacrificándose al frío en invierno y al sol en verano, dejando vacaciones de lado, por entregarnos la mejor educación escolar y lograr enviarnos a las mejores universidades del país. Siempre han creído en mí como hija y como profesional, dándome el apoyo cuando muchas veces quise dejar todo botado, ir a buscar mis cosas y devolverme a mi Toquihua con ellos. Estaré eternamente agradecida por darme las herramientas para tener una mejor vida y ser un aporte a este país.

A Felipe, por cumplir su rol de hermano mayor siempre, desde que terminaste tus estudios y te viniste a trabajar a Santiago, nunca más me eché un ramo en la U, y eso te lo debo gracias a tus retos y apoyo constante.

A los dueños de ASQ, don Francisco Bossel y la Sra. Cecilia López, quienes me dieron la oportunidad de desarrollar mis primeros pasos en el mundo profesional. En especial a don Francisco, por ser pedagógico en su dirección, compartiendo sus conocimientos, enseñarme aspectos de la ingeniería ambiental, diseño de plantas de tratamiento de aguas y llevarme a cuanta salida a terreno saliera. A todos los que compartí en la oficina, la Ale, que me acogió desde el primer día, respondiendo siempre cualquier inquietud que me surgió, a Roberto, don Claudio y Doris, sin duda son un grupo de trabajo muy ameno.

A la profesora Sylvia Copaja, por apoyarme en los momentos que las cosas no resultaron como yo esperaba, facilitándome su laboratorio y equipos para realizar algunos análisis.

A la Dra. María Cecilia Rojas, por su paciencia y exigencia en la revisión de mi trabajo.

A la Dra. Labbé por su comprensión y consejos durante la entrega de este Seminario de Título.

A Grey, por contactarme con María Paz, la cual me facilitó inóculo bacteriano. Sin esto no hubiese podido realizar mis ensayos anaeróbicos. Muchas gracias

A mi amiga Francisca y su familia, por permitirme tomar los residuos de su lechería y quesería, para realizar los ensayos cuantas veces fueron necesarios.

A Marisol, por hacer bien su pega, atendiéndome sin importar el horario, y estar siempre con la buena onda a flor de piel.

A mis amigas de la U, Naty y Tamy, pucha que sufrimos con los ramos, pero nos desquitamos muchas veces, las quiero montones y a cada una de ustedes les deseo lo mejor, que formen una linda familia con sus gatos y perros y logren desarrollarse profesionalmente, gracias por ser *partner* estar siempre dispuestas a ayudarme, compartiendo sus conocimientos sin importar la hora ni el día.

A mis amigas de la vida, (y Daniel) Natito, Nikol, Luzmi, Lily y Marión la compañía de ustedes desde el colegio y después en Santiago fue lo mejor, cada una de ustedes me contuvo, me dio ánimo, alegrías y compañía. Una vez leí, que las verdaderas amigas se hacían en la Universidad, yo diría que las primeras, las tengo desde el colegio.

A mis amigas y amigos en general cada uno de ustedes gracias por entenderme cuando no podía salir, por estudiar y preparar esta etapa final.

Y finalmente a Gonzalo, por hacerme feliz, entregarme su amor incondicional y ser un gran compañero. Te amo.

ABREVIATURAS

AGV: Ácidos grasos volátiles. Son un producto intermediario de la generación de Metano. Principalmente son ácidos carboxílicos de cadena corta, tales como el Propiónico, Butírico y Acético.

AME: Actividad metanogénica específica, corresponde a un ensayo de control que se realiza a los lodos provenientes de tratamientos anaeróbicos, con el fin de evaluar la producción de Metano.

CIIU: Clasificación internacional industrial uniforme. Es la clasificación sistemática de todas las actividades económicas cuya finalidad es la de establecer su codificación armonizada a nivel mundial. Es utilizada para conocer niveles de desarrollo, requerimientos, normalización, políticas económicas e industriales, entre otras utilidades.

DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno. Es un parámetro que mide la cantidad de materia susceptible de ser consumida por medios biológicos que contenga una muestra. Su medición también pretende ser un índice de concentración de materia orgánica y generalmente corresponde al 60% de la DQO de una misma muestra.

DQO: Demanda Química de Oxígeno. Es un parámetro que mide la cantidad de materia orgánica susceptibles a ser oxidadas por la adición de un oxidante. Se utiliza para medir el grado de contaminación de un efluente y se mide el $\text{mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$. Su medición pretende principalmente medir la carga orgánica.

INE: Instituto nacional de estadística. Institución que genera todas las estadísticas oficiales de Chile.

ODEPA: Oficina de estudios y políticas agrarias. Es un servicio público dependiente del Presidente de la República a través del Ministerio de Agricultura.

pH: Medida de acidez o alcalinidad de una solución. Debido a que indica la concentración de iones hidronio presentes en ella.

PTAS: Planta de tratamiento de aguas servidas. Lugar en donde confluyen las aguas servidas de una comunidad o ciudad para su tratamiento biológico y fisicoquímico.

RIL: Residuo(s) industrial(es) líquido(s) descargados por un establecimiento industrial.

ST: Sólidos totales. Corresponde a la suma de sólidos suspendidos y sólidos disueltos en una muestra.

SV: Sólidos Volátiles. Corresponde a la porción de la materia orgánica que puede eliminarse o volatilizarse cuando una muestra se quema en un horno mufla a una temperatura de 550°C.

GLOSARIO

Biocombustible: Se producen a partir de componentes derivados de la biomasa para su quema. Pueden ser de primera y segunda generación. La primera corresponde a aquella biomasa que proviene de productos frecuentemente comestible, tales como maíz, caña de azúcar, almidón, etc. En cambio la segunda proviene de aquellos residuos agroindustriales, que no son utilizados como alimento si no que tienen como única finalidad la disposición en un lugar autorizado.

Cogeneración: Proceso por el cual se obtiene simultáneamente energía eléctrica y energía térmica útil. Utilizando combustible como el biogás, el que se pasa por un motor de combustión interna denominado cogenerador.

Fermentación: Primera fase que experimenta la materia orgánica al ser sometida a un tratamiento anaeróbico, corresponde a un proceso catabólico de oxidación incompleta característico de microorganismos y bacterias, cuyo producto final es un compuesto orgánico como alcohol y ácido, dependiendo del tipo de fermentación.

Inóculo bacteriano: Corresponde a lodo que contiene poblaciones microbianas capaces de generar biogás, tales como, lodos anaeróbicos de PTAS y purín de vaca. Éstos, fueron alimentados con lactosuero para evaluar la generación de Metano de este sustrato.

Mesófilo: Corresponde al rango desde los 20°C hasta los 35°C de temperatura para el crecimiento de ciertas bacterias necesarias para la digestión anaeróbica.

Metanogénesis: Segunda fase que experimenta la materia orgánica al ser sometida a tratamiento anaeróbico, es una etapa anaeróbica estricta en donde las bacterias

metanogénicas sintetizan los productos de la etapa fermentativa para producir Metano y Dióxido de Carbono.

Sustrato: Corresponde a las moléculas sobre las cuales actuarán las enzimas que son metabolizadas por microorganismos presentes en el inóculo bacteriano, es decir, corresponde al alimento de los microorganismos. En el presente trabajo, se denomina sustrato al lactosuero.

Tratamiento anaeróbico: Corresponde a un proceso tecnológico de transformación de la materia orgánica, en ausencia de oxígeno. De este, se obtiene como producto, biogás que puede ser utilizado como fuente de energía, y lodos, que pueden ser aprovechados como fertilizantes.

RESUMEN

La producción de biogás a través de lactosuero proveniente de la industria quesera, surge como una oportunidad de valorización energética de un residuo de la industria láctea menor que no tiene otra finalidad que la disposición final. Aprovechar el potencial energético que éste posee, mediante la digestión anaeróbica del lactosuero altamente concentrado, fue el principal objetivo a desarrollar.

Para este fin, se realizó un ensayo de degradabilidad de lactosuero a tres cargas orgánicas: al 25, 50 y 100%v/v. En donde cada una, fue inoculada de forma independiente con tres poblaciones bacterianas: una proveniente de purín de vaca y dos provenientes de planta de tratamiento de aguas servidas (PTAS). Las mezclas de inóculo mas lactosuero, se sellaron y ambientaron en condiciones anaeróbicas a 35° C, durante 70 días, midiéndose la generación de biogás en cada uno de los ensayos.

De los resultados obtenidos, se encontró que la mejor condición de generación de biogás, corresponde a la mezcla de inóculo granular proveniente de PTAS con lactosuero al 25%v/v. Bajo estas condiciones, se generaron 3035 mL de biogás en 70 días de incubación y se degradó la mayor cantidad de lactosuero, con un 31,91% de abatimiento con respecto a la Demanda Química de Oxígeno de entrada. Se logró mantener un pH neutro de 7,15, el cual es adecuado para el desarrollo de la metanogénesis. Además, el ensayo inoculado con ésta población bacteriana logró generar biogás con una alta carga orgánica (al 100%) permitiendo cumplir con el principal objetivo de esta investigación.

ABSTRACT

Biogas production through cheese whey industry rises like an opportunity of a waste energetic valorization for the minor dairy industries, where the waste doesn't have other destination than final disposition. The main objective in this study was to take advantage of this waste's energetic potential through anaerobic digestion of highly concentrated whey. For this, whey degradability tests were run, using three organic loads: 25, 50 and 100% v/v. Each one was inoculated independently with three bacterial populations: one originated from cow manure and two of them originated in Treatment Plant Sewage (TPS). Inoculums blended with whey were sealed and acclimated in anaerobic conditions at 35°C during 70 days, measuring biogas generation in each test.

From the results, it was found that the best condition for biogas generation includes a granular inoculum originated in a TPS and a cheesewhey concentration of 25%. Due to, under this conditions, 3035mL of biogas was generated in 70 incubation days and the whey degradation was higher, with a 31,91% removal comparing to the COD, achieving a neutral constant pH of 7.15, which is suitable for methanogenesis.

Furthermore, test inoculated with this bacterial population was able to generate biogas with a high organic load (100%), allowing to comply the main objective of this study, the biogas generation with concentrated whey.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes Generales

Los problemas energéticos que enfrenta el país, debido al aumento en la demanda y al creciente costo de la generación de electricidad hacen de la autogeneración de energía eléctrica, una alternativa viable para el desarrollo sostenible de cualquier empresa.

En el caso de la agroindustria, los residuos tienen un alto potencial para producir biocombustibles de segunda generación, por su abundancia, disponibilidad inmediata, y bajo costo.

En la actualidad, muchos de los residuos generados en el sector no tienen otro uso que no sea la disposición final, generando RILES o RISES que implican un gasto para la pequeña industria, por su tratamiento y posterior disposición final, o requieren de una elevada inversión económica para transformarlos en otro subproducto.

Una alternativa para la transformación de estos desechos en energía, es el biogás, el cual ha despertado un gran interés en la última década, como energía renovable, debido a que es una de las tecnologías de más fácil implementación, especialmente, para sectores alejados y de menor urbanización. **(Marín M, 2011)**

El biogás, por su alto contenido en Metano, tiene un poder calorífico algo mayor que la mitad del poder calorífico del gas natural. El biogás, con un 60% de Metano tiene un poder calorífico de 5.500 kcal/Nm^3 equivalentes a $6,4 \text{ KWh/Nm}^3$ (Normal metro cúbico en condiciones normales, 0°C de temperatura y 1 atmósfera de presión). **(Instituto para la diversificación y ahorro de la energía, 2007).**

La producción de biogás se ha desarrollado mayoritariamente en aquellos sectores agroindustriales que generan residuos con un alto contenido de materia seca, (restos de poda, purines, cuesco y restos de fruta) a diferencia de los residuos, denominados biomasa húmeda, tales como: aceites, grasas, orujos, escobajos y alpechín.

El biogás producido se puede utilizar en la generación de energía eléctrica y/o térmica o comercializarse directamente como gas, valorado por su contenido energético para sustituir combustibles fósiles.

Para que un residuo sea valorizado como fuente energética, es necesario que cumpla diferentes etapas y tener antecedente de que viene a solucionar un problema ambiental significativo y que no tenga otro uso establecido. La siguiente figura 1 presenta una orientación para la identificación y evaluación del potencial energético de un residuo y así, permitir la competitividad y un óptimo desempeño de las empresas de menor tamaño del sector. **(Consejo Nacional de Producción Limpia, 2012)**

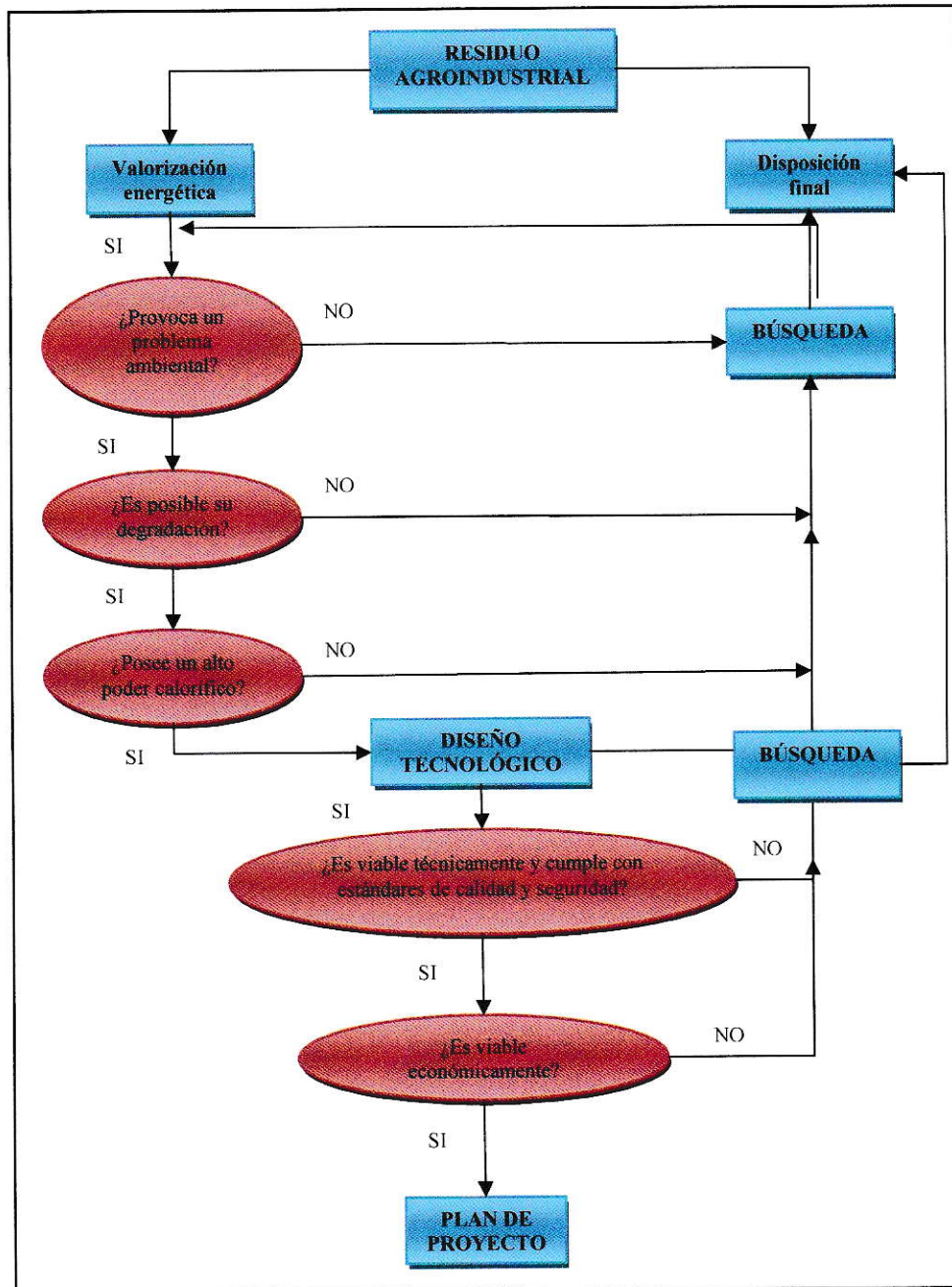


Figura 1. Etapas de proceso de selección de un residuo con valor energético

1.1.1 Generación de biogás mediante digestión bacteriana anaeróbica

La digestión anaeróbica es un tipo de valorización energética de residuos, ésta hace que la materia orgánica, al ser degradada por las bacterias anaeróbicas, genere biogás. Este proceso anaeróbico evolucionó antes de la acumulación de oxígeno en la atmósfera, por lo que ocurre de forma natural, por organismos milenarios y en ausencia de oxígeno molecular. Las cuatro etapas en los procesos de digestión anaeróbica pueden ser representadas según la siguiente figura 2

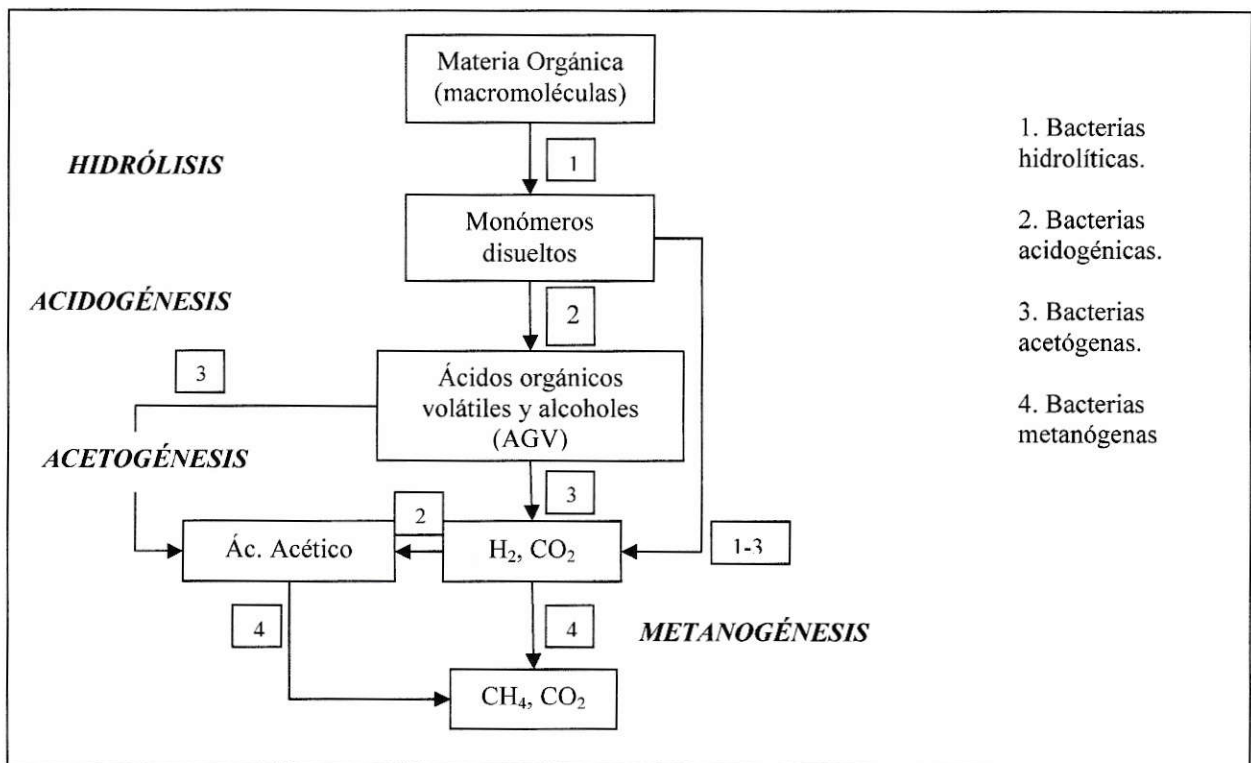


Figura 2. Esquema de reacciones de la digestión anaerobia (Cairó y Paris, 1988)

1.1.2 Proceso de fermentación anaeróbica

Las reacciones de fermentación son procesos biológicos, en este grupo trófico, en los que participan en su mayoría bacterias anaeróbicas, aunque una pequeña fracción es capaz de utilizar oxígeno, como las bacterias del Ácido Láctico. En la actualidad diferentes autores han considerado que la digestión anaeróbica procede en varias etapas sucesivas (S. Montalvo, 2003)

El proceso de anaerobiosis, se compone de dos fases

a. Una fase oxidante

b. Una fase reductora

Estas etapas corresponden a un proceso de óxido – reducción (REDOX), en donde la materia orgánica se oxida a ácidos carboxílicos de cadena corta y estos se reducen a Metano. Si bien, este es el principal fundamento químico de cómo se produce la degradación, este es un proceso biológico de producción de biogás a partir de material orgánico complejo, que ha sido descrito según diferentes mecanismos, en donde los principales responsables de la producción de biogás son las bacterias anaeróbicas.

En la tabla 1 se muestran las principales bacterias que participan en este proceso

Tabla 1. Bacterias que participan en el proceso anaeróbico con sus respectivos sustratos y productos en cada una de las fases.

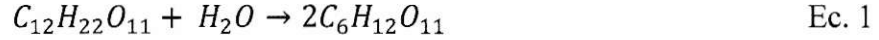
Bacterias	Sustrato	Microorganismo	Productos
Hidrolíticas	proteínas azúcares grasas	<i>Clostridium</i> , <i>Eubacterium</i> , <i>Lactobacillus</i>	<i>Butirovibrio</i> , <i>Bifidobacterium</i> , aminoácidos ácidos grasos
Acidógenas	Glucosa	<i>Escherichia</i> <i>Enterobacter</i> , <i>Propionilbacterium</i>	H ₂ , CO ₂ , Propionato y Butirato
Acetógenas	ácidos de cadena corta	<i>Clostridium aceticum</i> , <i>Acetobacterium woodri</i> y <i>Acetogenium Kivui</i> <i>Syntrophomas</i>	Acetato
Metanógenas	Compuestos nocarbonados, Acetatos, zcla de Hidrogeno y CO ₂	<i>Methanobacterium</i> , <i>Methanosarcina</i> , <i>Maethanococcus</i> , <i>Methanospirillum</i>	Metano y Dióxido de Carbono.

a. **Fase oxidante** La fase oxidativa, es una fermentación cuyo producto final es el Etanol, Ácido Láctico y/o Ácidos Carboxílicos de cadena corta, como Ácido Propiónico y Butírico. La primera etapa de ésta fase, es la hidrólisis, en la cual los compuestos orgánicos son solubilizados por enzimas excretadas por bacterias hidrolíticas que actúan en el exterior.

Las bacterias hidrolíticas, conforman una mezcla muy compleja de muchas especies bacterianas, en el rango mesófilo. Las características nutricionales más generales de este grupo de bacterias y de este primer nivel trófico en la digestión anaeróbica, se pueden inferir por las semejanzas que existen con los sistemas ecológicos del rumen, en los bovinos (P. Bryant, 1974). Este tipo de bacterias puede crecer en ausencia de Oxígeno y ayudan a la formación de precursores del Metano.

La **hidrólisis** es por tanto la conversión de los polímeros en sus respectivos monómeros.

La Lactosa, por ejemplo, es un dímero, que se hidroliza en dos compuestos isómeros, Galactosa y Glucosa.



La segunda etapa de la fase fermentativa, es la **acidogénesis**. En esta etapa los compuestos orgánicos solubles que comprenden los productos de la hidrólisis son convertidos en ácidos carboxílicos de cadena corta, denominados AGV. La acidogénesis se desarrolla en ausencia de Oxígeno, partiendo con la glucólisis de la Glucosa, cuyo producto final es el Piruvato. Éste fermenta, y genera productos que dependerán de los organismos involucrados. La siguiente figura 3, muestra la formación de Piruvato a partir de la Glucosa.

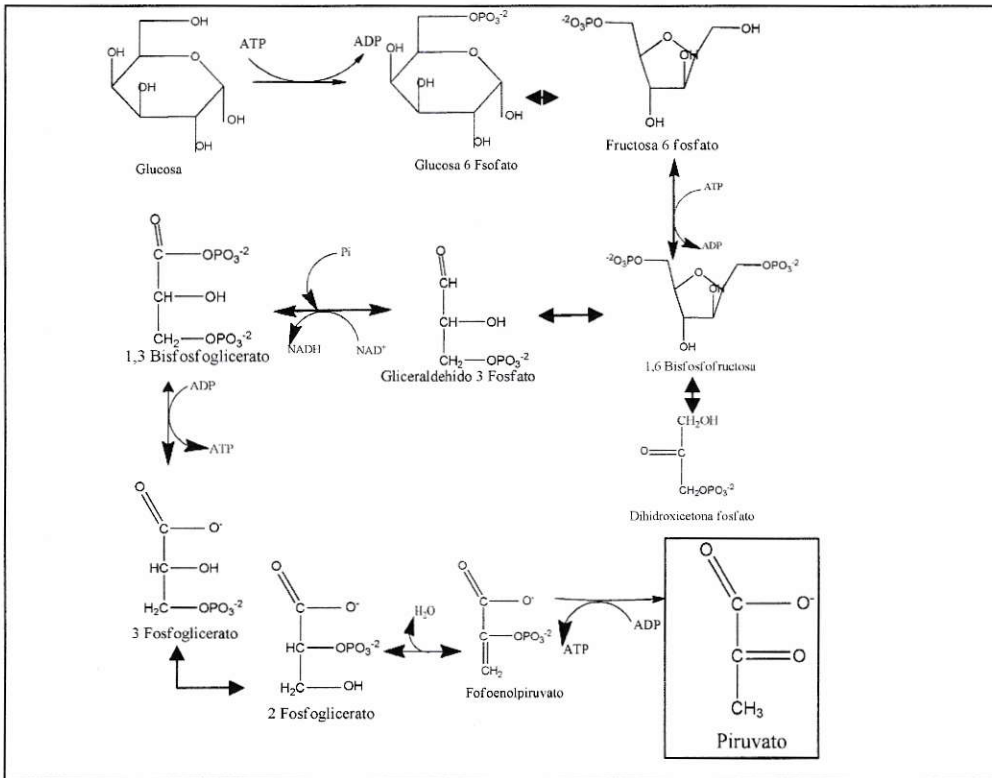


Figura 3. Síntesis del Piruvato a partir de glucosa.

En los reactores anaeróbicos se han encontrado diversos microorganismos, que se detallan en la tabla 1. Éstos son capaces de fermentar el Piruvato hasta ácidos de cadena corta. En la siguiente figura 4 se proponen las siguientes vías de fermentación.

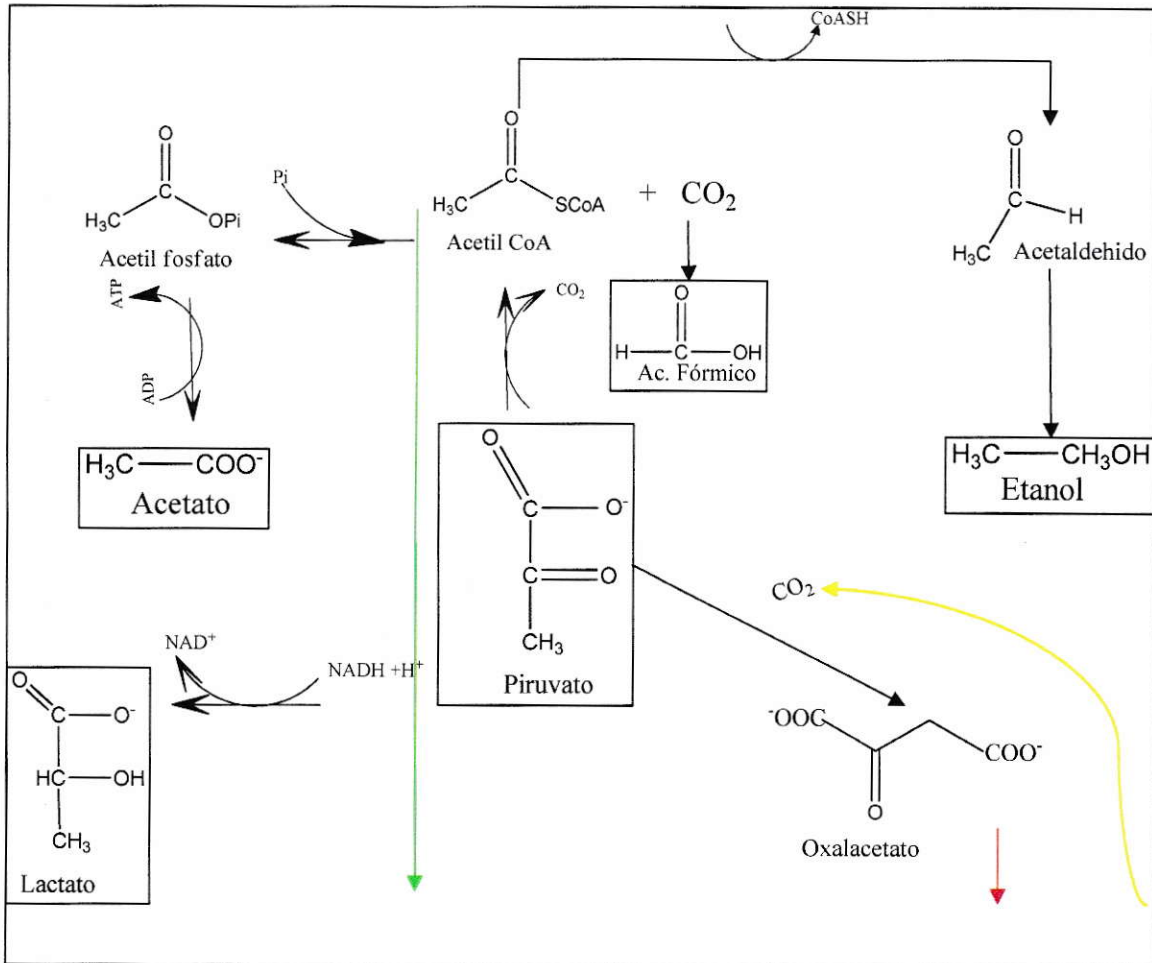
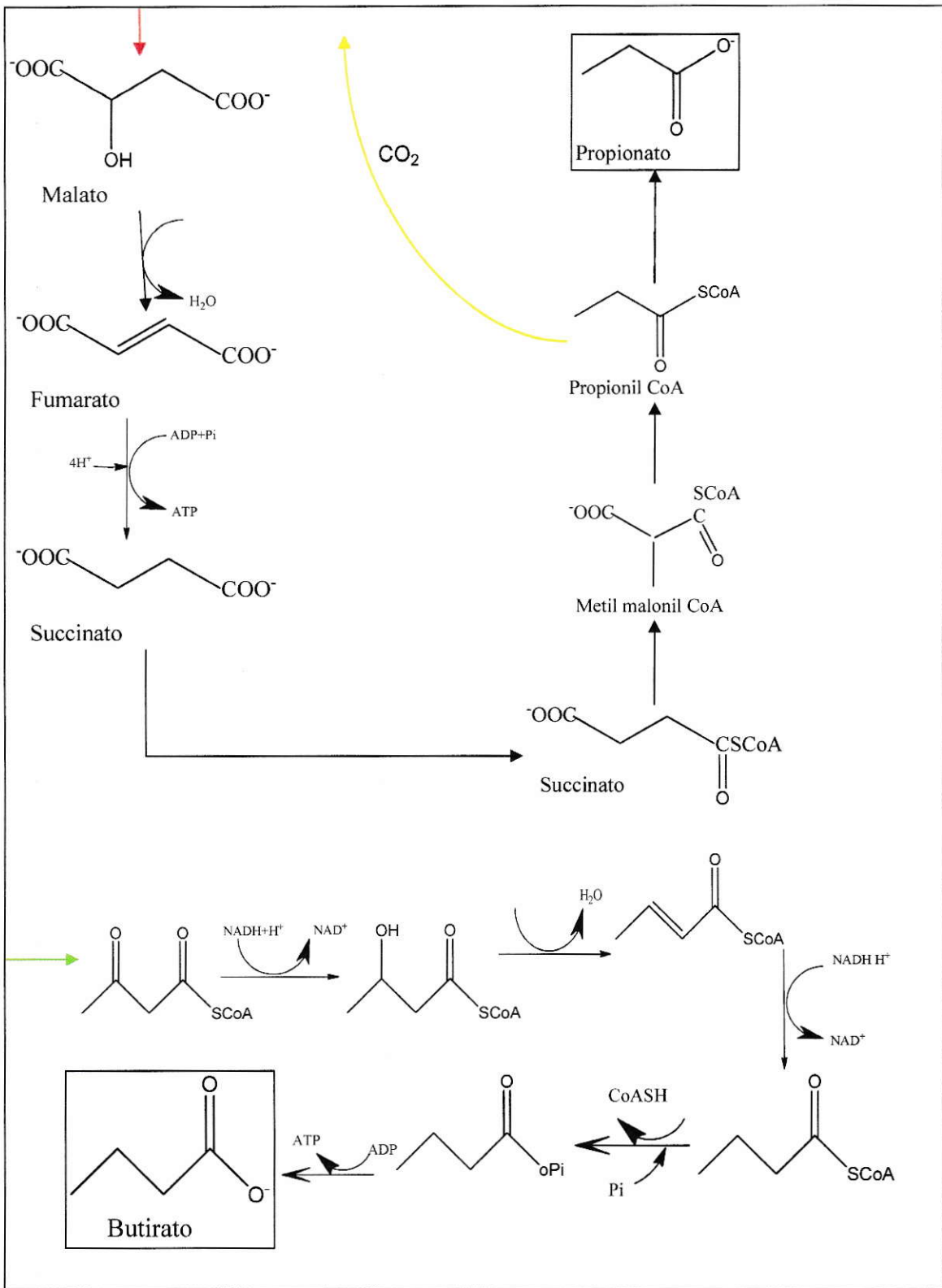


Figura 4. Fermentación del piruvato a ácidos de cadena corta y otros productos (continúa)



La imagen anterior muestra las vías metabólicas de distintas fermentaciones que ocurren en un proceso anaeróbico, tales como

1. Fermentación Láctica
2. Fermentación Ácido Propiónico
3. Fermentación Ácido Mixta
4. Fermentación del Butirato

Pudiendo obtenerse los siguientes productos de acuerdo a cada una de las fermentaciones

1. Lactato.
2. Propionato, Dióxido de Carbono y Acetato.
3. Propionato, Lactato, Formato, Etanol y Acetato.
4. Butirato.

A pH 6, el principal producto de la fermentación de la Glucosa es el Ácido Butírico, pero con incrementos del pH los productos que se obtienen cambian, primero hacia la formación de Ácido Láctico seguido de la formación de otros. (R.E.Hungate, 1966).

Los productos metabólicos en este segundo nivel trófico, dependen del tiempo de residencia celular, a tiempos cortos los principales productos que se forman son el Etanol y el Ácido Láctico, mientras que a tiempos mayores, se produce una mezcla de ácidos carboxílicos, conocidos como ácidos grasos volátiles (AGV).

La última etapa de la fermentación, es la **acetogénesis**, aquí, los productos de la etapa anterior son convertidos en Ácido Acético y/o Acetato, Hidrógeno y Dióxido de Carbono. En esa etapa y tercer nivel trófico, los productos metabólicos de las bacterias

acidogénicas son convertidos en sustratos para las bacterias metanogénicas. El género de bacterias de este grupo más reconocidos son las *Clostridium* y *Acetobacterium*. La acción de estas bacterias es esencial en la degradación de ácidos orgánicos de cadena corta hasta Acetato, mediante la oxidación de estos, debido a que las bacterias metanogénicas solo utilizan Acetato, Metanol, Hidrógeno y Dióxido de Carbono como sustratos.

Las bacterias de esta etapa producen necesariamente Hidrógeno y están en simbiosis constante con los organismos que producen Metano. Los organismos metanogénicos pueden sobrevivir solo a altos niveles de presión parcial de Hidrógeno, si este nivel baja, el Hidrógeno, Dióxido de Carbono y Acetato son producidos por bacterias acetogénicas, en el caso contrario predomina la formación de ácidos: Propiónico, Butírico y etanol. Haciendo, que esta etapa, sea determinante en la continuación hacia la producción de Metano. En la siguiente tabla 2 se muestran las reacciones de la etapa acetogénica.

Tabla 2. Reacciones acetogénicas

Ácido Propiónico	$CH_3CH_2COOH + 2H_2O \rightarrow CH_3COOH + CO_2 + 3H_2$	Ec.2
Ácido Butírico	$CH_3(CH_2)_2COO^- + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COO^- + H^+ + 2H_2$	Ec.3
Ácido Láctico	$CH_3CHOHCOO^- + 2H_2O \rightarrow CH_3COO^- + H^+ + HCO_3^- + 2H_2$	Ec.4
Etanol	$CH_3CH_2OH + H_2O \rightarrow CH_3COOH + 2H_2$	Ec.5
	$2CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_3COO^- + H^+ + 2H_2O$	Ec.6

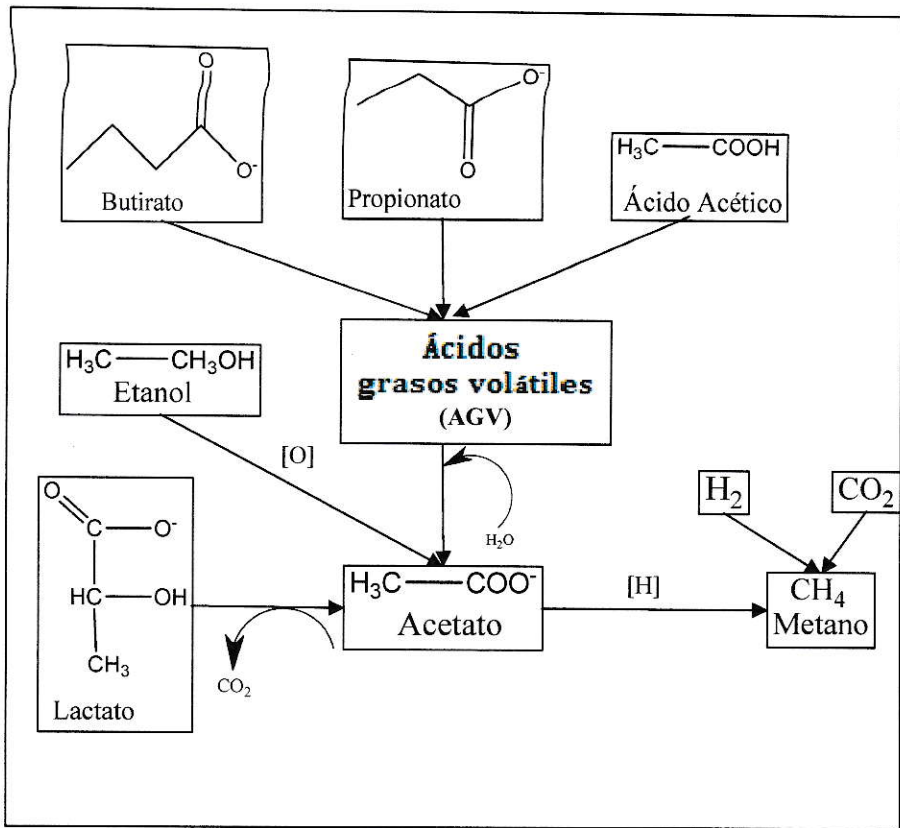


Figura 5. Oxidación de los ácidos de cadena corta hasta acetato, para la posterior producción de metano.

Así, cuando la etapa acetogénica funciona, comienza a funcionar la etapa metanogénica y la fase reductora de los compuestos, de lo contrario si la primera falla, comienza una sobre acidificación del medio haciendo que el pH decaiga a niveles muy bajos.

b. Fase reductora Al finalizar la etapa fermentativa, con la formación de Ácido Acético, Hidrógeno y Dióxido de Carbono, viene la segunda fase de la digestión anaeróbica: la formación del Metano.

La **metanogénesis** es la etapa metabólica en la que el Metano se produce a partir del Ácido Acético o de mezclas de Hidrogeno y de Dióxido de Carbono, pudiendo también, formarse a partir de otros sustratos como el Ácido Fórmico y el Metanol. Las bacterias

metanogénicas: *Methanococcus*, *Methanosarcina*, *Methanobacterium*, *Methanobrevibacter*, constituyen el cuarto nivel trófico, y son un grupo especial de bacterias de diferentes formas celulares que obtienen energía para su crecimiento a partir de la materia orgánica formando Metano.

Estas bacterias están incluidas en el reino de las Arqueobacterias, filogenéticamente asociadas al grupo de microorganismos más primitivos presentes en el origen de la vida, cuando el ambiente se encontraba en condiciones extremadamente reductoras siendo bacterias anaerobias obligadas capaces de utilizar solamente determinados sustratos.



La composición del biogás, dependiendo del sustrato digerido y del tipo de tecnología utilizada, puede ser la siguiente:

- 50-70% de Metano (CH₄).
- 30-40% de Anhídrido Carbónico (CO₂).

≤ 5% de Hidrógeno (H₂), Ácido Sulhídrico (H₂S), y otros gases a nivel trazas. (**Bertin, L., Grilli S., y otros, 2012**).



1.1.3 Condiciones del ambiente microbiano requeridas para la digestión anaerobia.

Las bacterias son sensibles a cambios de temperatura, acidez, carga orgánica, potencial redox, concentración de nutrientes, concentración de sulfuro, sólidos totales, altas concentraciones de metales pesados, amoniaco, antibióticos, pesticidas u otro.

Las siguientes condiciones se utilizan en general para la operación de los reactores anaeróbicos de producción de biogás:

Naturaleza de la biomasa: No solo es necesario que la materia prima posea un alto contenido de materia orgánica como fuentes de carbono y nitrógeno, sino también un equilibrio de sales para el proceso microbiológico. Un alto contenido de humedad favorece el proceso.

Temperatura: Es fundamental para la eficiencia y velocidad del proceso de degradación de la materia orgánica. En términos generales se trabaja en el rango mesófilo .A mayores temperaturas aumenta el grado de actividad bacteriana pero el proceso es más inestable y se elevan los costos de producción.

pH: Las bacterias que participan en el proceso son sensibles a cambios de pH del medio. Los diferentes grupos bacterianos presentes en el proceso de digestión anaeróbica presentan niveles de actividad óptimos cercanos a la neutralidad.

Carga volumétrica: Influye en el tiempo de retención, ya que a medida que se incrementa el volumen de sustrato orgánico cargado diariamente al digestor, disminuye el tiempo que de permanencia en los reactores.

Relación C/N: El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénica. La relación óptima entre estos elementos se encuentra en el rango 30:1 hasta 20:1.

Potencial redox: Para un adecuado crecimiento anaeróbico el valor del potencial redox a pH 7 se debe mantener entre los -220mV a -350 mV.

Porcentaje de sólidos totales: La movilidad de las bacterias dentro del sustrato se limita conforme aumenta el contenido de sólidos, y por lo tanto puede afectar la eficiencia y producción de biogás.

Presencia de compuestos inhibidores del proceso: No deben estar presentes compuestos como metales pesados, amoníaco, pesticidas, sanitizantes, antibióticos u otros compuestos.

1.2 Antecedentes Específicos

1.2.1 La industria láctea chilena

La industria láctea está compuesta por aquellas empresas que utilizan la leche cruda como materia prima para transformarla en productos de mayor valor agregado, los que son llamados a su vez, productos lácteos. De acuerdo a la clasificación de la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), la industria láctea se divide en: industria láctea menor e industria láctea mayor. Sus tamaños relativos se pueden medir en función de su recepción de leche.

Para los efectos de impacto de este estudio, se analiza el mercado chileno lácteo menor, debido a que se pretende realizar una valorización energética para el sector más pequeño del mercado.

1.2.2 Industria láctea menor

La Industria láctea menor corresponde a pequeños productores de lácteos, con instalaciones productivas a nivel mayoritariamente artesanal y con una menor incorporación de nuevas tecnologías en sus procesos. En la figura 6, se observa los volúmenes de leche procesada por el sector, el cual, alcanzó un máximo cercano a los 340 millones de Litros el año 2010.

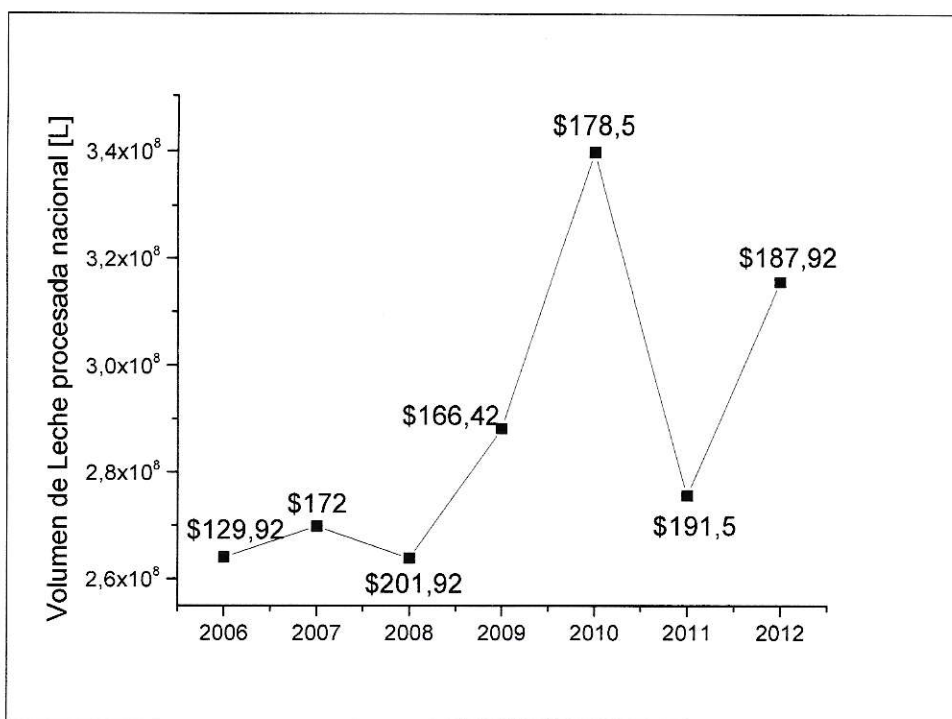


Figura 6. Variación leche procesada de la industria menor en los últimos años y su precio por Litro

Hasta el año 2012 última fecha de la que se tiene registro, informan 125 empresas, 25 más con respecto al año anterior.

La industria menor produce diversos productos lácteos, tales como; queso, quesillo, leche fluida, mantequilla, crema, manjar y yogur. En la figura 7 se detalla la producción de queso y quesillo en los últimos años la cual corresponde aproximadamente a un 8,5% de queso y un 4% de quesillo con respecto al total de leche procesada según corresponda el año. En general el mercado se mantiene estable, tendiente al alza en la producción, con bajas asociadas al alza en el precio de la leche fluida, que encarece el costo de la producción

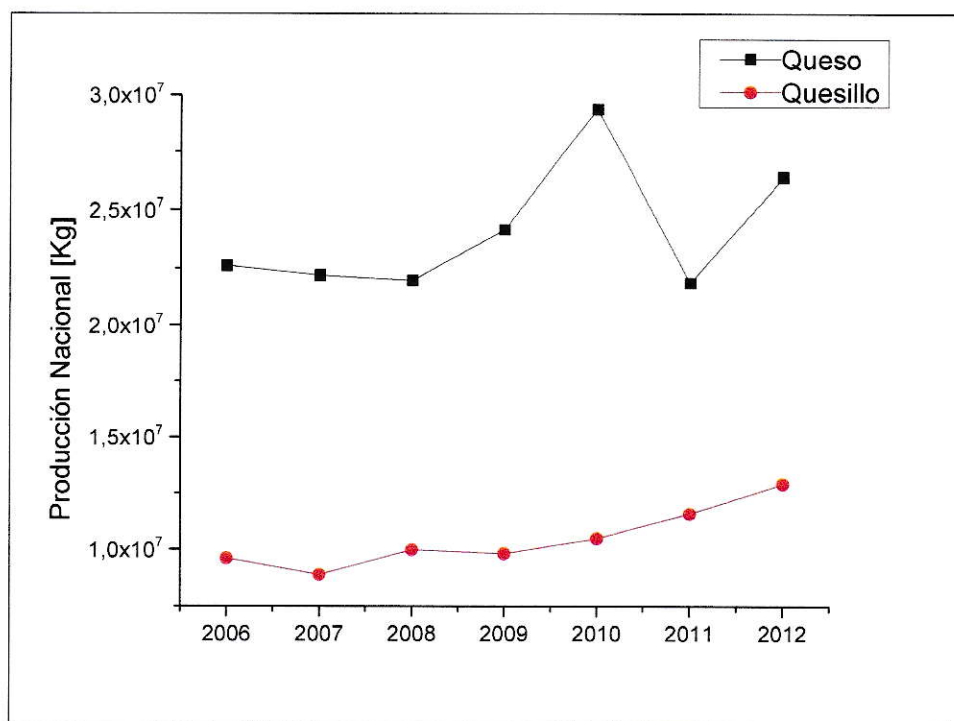


Figura 7. Variación de queso y quesillo en la industria menor durante los últimos años.

Si bien no existe un perfil tan acabado de las características de la industria láctea menor, su tamaño de procesamiento es el 50% de la industria láctea mayor. La gran mayoría también son empresas familiares y cuya actividad principal se centra en la elaboración de queso.

El queso es el producto de la cuajada de leche que tiene una maduración cercana a dos meses, dando un aspecto amarillo, en cambio el quesillo corresponde a la coagulación de la leche luego de su cuajada, también denominado queso fresco y su aspecto es de color blanco. De estos dos subproductos de la leche se obtiene lactosuero, que es el residuo objetivo de análisis.

Zonas de producción láctea en Chile. Es importante identificar las zonas geográficas en donde se desarrolla este sector agroindustrial, para determinar el impacto ambiental

relativo de sus desechos. En la siguiente figura 8, se observa que la producción de queso se concentra en la zona sur, principalmente en la región de los Ríos y en la región de los Lagos.

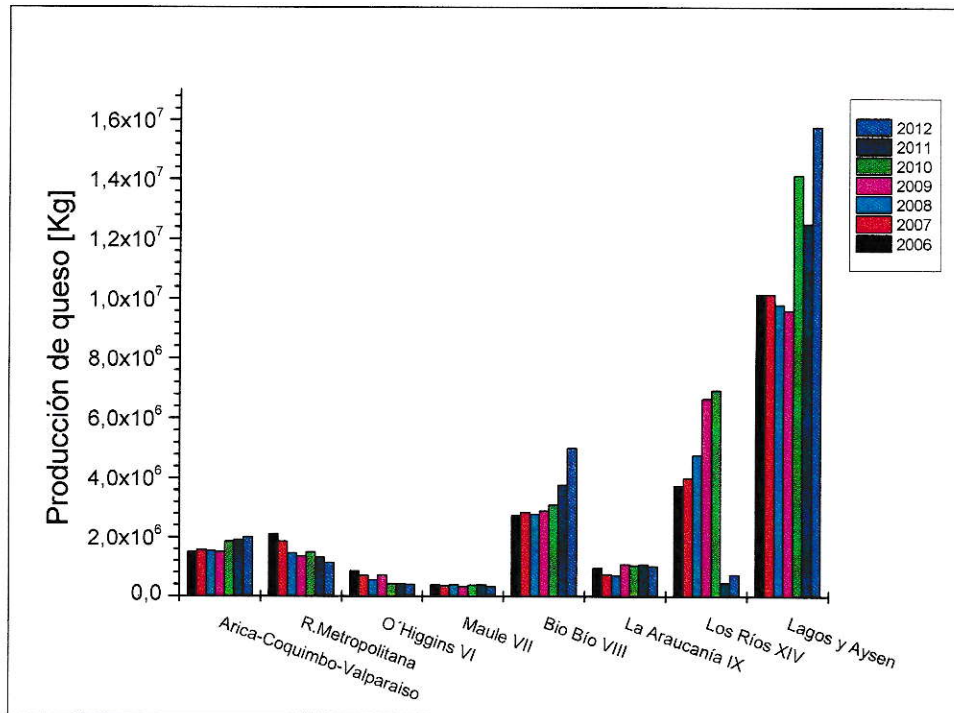


Figura 8. Producción de queso a nivel regional durante los últimos años en la industria menor

Sin embargo, con la producción de quesillo o queso fresco, sucede lo contrario, ya que la mayor concentración, de empresas está ubicada en la región Metropolitana (fig.9). Aunque, se produce la mitad de producto lácteo que en la zona sur, existe una importante generación de lactosuero como residuo de esta actividad,

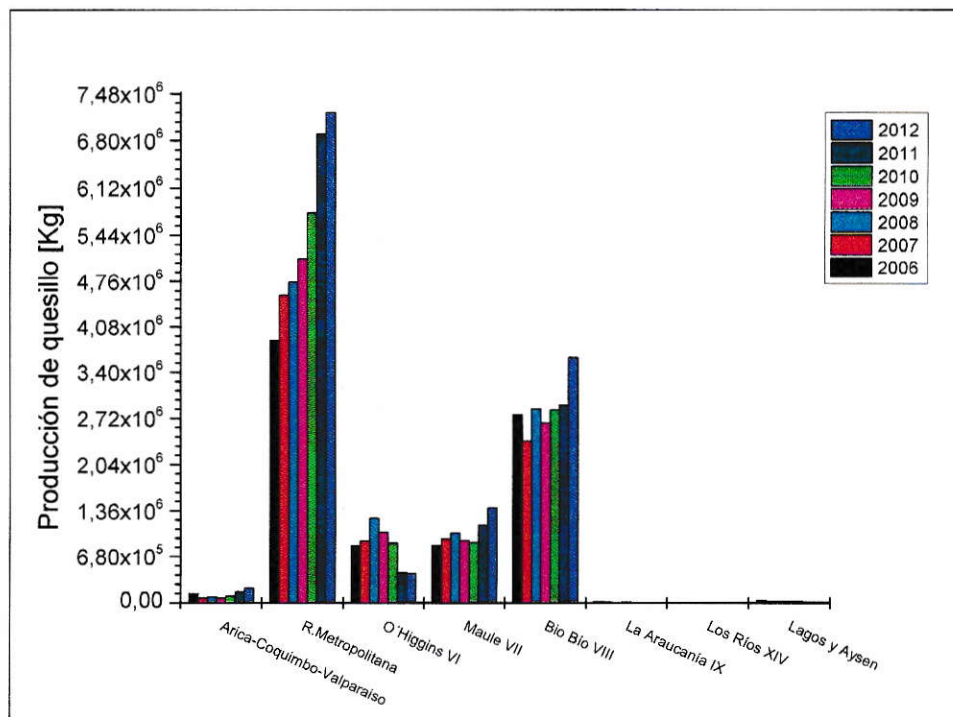


Figura 9. Producción de Quesillo a nivel regional durante los últimos años en la Industria Menor

1.2.3 Procesos productivos en la elaboración de queso

Este sector productivo, cuyo código CIU es el 152020, correspondiente a la producción de queso y cuajada: fresco, curado, de pasta dura o fundido, y la producción de suero: fresco, concentrado o desecado, genera efluentes que dependen de cada proceso unitario. El queso es elaborado a partir de leche fresca o cruda, y su producción consiste básicamente en lograr la coagulación de la caseína (grupo de proteínas contenidas en la leche), mediante el uso de una enzima llamada quimosina que se obtiene a través del uso de bacterias, también conocidas como fermentos, que se agregan y se mezclan con ésta, o se agrega como aditivo químico comúnmente conocido como cuajo. La caseína coagulada, junto con parte de la grasa contenida en la leche, forman este producto lácteo. Dependiendo del tipo de queso, tanto el proceso productivo como el fermento a utilizar, tienen algunas variaciones, pero de forma general, el proceso de fabricación de queso y

quesillo es similar, solo que el primero requiere más pasos que el segundo, como se muestra en la siguiente figura 10

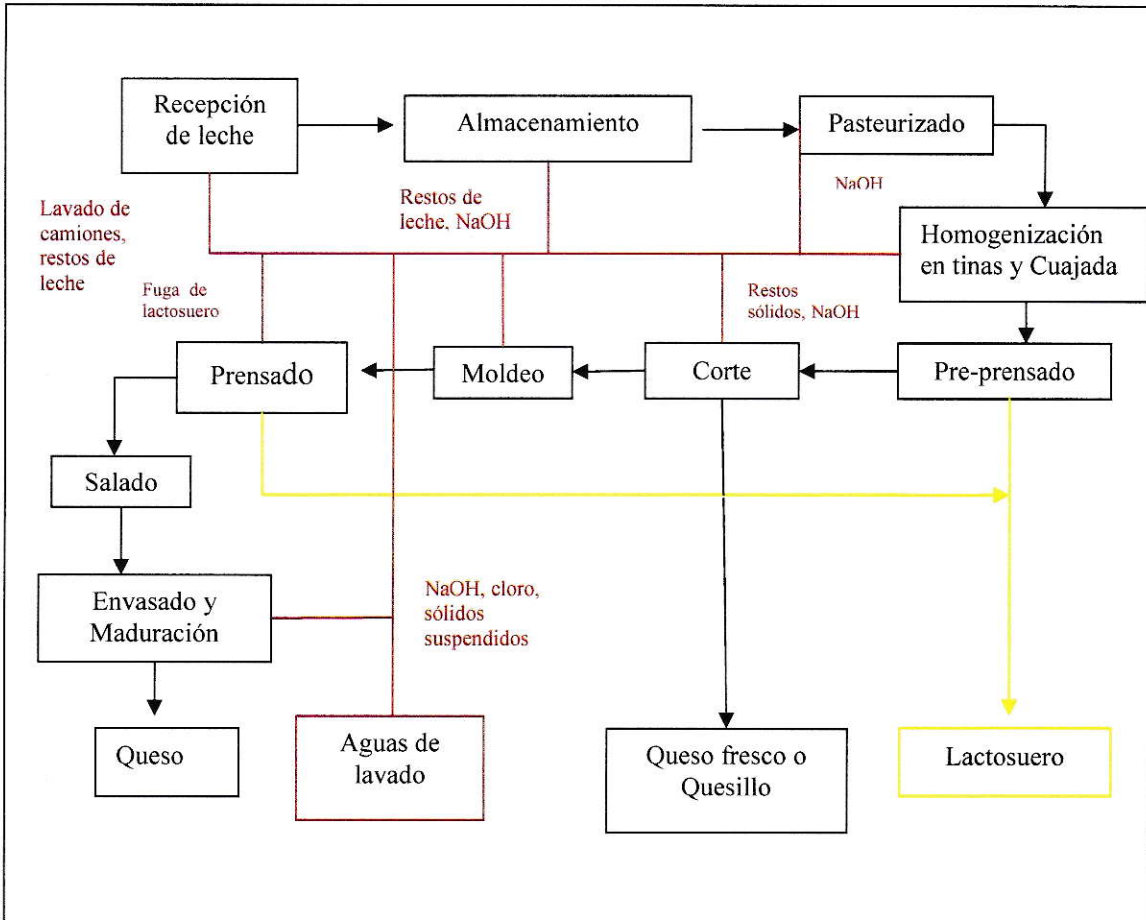


Figura 10. Proceso de producción y generación de RIL de la producción de queso, quesillo. (Elaboración propia)

Los procesos se explican a continuación:

Recepción de leche: la leche es transportada por camiones hasta la planta.

Almacenamiento: la leche recibida es almacenada en silos a una temperatura de entre 4°C a 5°C.

Pasteurizado: mediante el uso de calderas la leche se calienta entre 72°C y 73°C durante 15 segundos aproximadamente, con el fin de eliminar la mayor parte de

microorganismos que puedan afectar el sabor, la maduración, la calidad y la salubridad del queso.

Homogenización y cuajada: la leche pasteurizada es descremada y posteriormente se coloca en tinas especiales en las que se añaden los fermentos con el fin de comenzar el proceso de coagulación. Adicionalmente se le agregan, dependiendo del queso, otros aditivos que ayudan al proceso. Posteriormente la mezcla es suavemente batida a temperaturas que dependen del tipo de fermento utilizado. Durante el proceso, la mezcla empieza a tomar cada vez mayor consistencia hasta quedar completamente cuajada.

Pre-prensado: el cuajo, durante la coagulación, comienza a liberar un líquido llamado suero. Con el fin de ayudar a este proceso, se utiliza una prensa que ejerce presión sobre el cuajo, permitiendo que el líquido escurra con mayor facilidad.

Corte: el cuajo posteriormente es cortado hasta formar una masa de pequeños trozos, si el proceso se corta, aquí se obtiene el quesillo

Moldeo: la masa procedente del proceso anterior, se coloca en recipientes que darán la forma y el tamaño al queso.

Prensado: se aplica presión sobre los moldes mediante el uso de prensas, con el fin de extraer el resto del suero que contiene el queso.

Salado: el queso ya prensado se sumerge en agua con sal durante un tiempo.

Envasado y maduración: el producto se envasa indicando todas las características necesarias y se almacena en bodegas en donde se controla la temperatura a fin de conseguir una buena maduración. En este proceso, el queso va perdiendo progresivamente humedad por medio de la evaporación. Dependiendo del queso, los tiempos de maduración varían.

1.2.4 Residuos generados durante la elaboración de productos lácteos

Los residuos obtenidos del proceso son dos: las aguas de lavado y el lactosuero. Ambos debiesen recolectarse por líneas separadas y evitar el cruce de materia de una línea a otra. En la siguiente tabla 3, se muestra una caracterización promedio de los efluentes del proceso de la elaboración del queso.

Tabla 3. Valores promedio de parámetros físico-químico de RILes de la industria quesera. (Cortés & Montalvo, 2010)

	[mg·L ⁻¹]					
	DBO	SS	SV	ST	Grasas	pH
Aguas de lavado	775-2700	306-396	1391-2698	1500-4516		5,7-7,4
Lactosuero	32000	8000	64000	72000	4000	6,0

De esta tabla se observa que el lactosuero posee una alta DBO la cual corresponde aproximadamente al 60% de la DQO, aportando una gran cantidad de materia orgánica a los RILes del proceso.

1.2.5 Características del Lactosuero

El lactosuero, se obtiene de la precipitación de la caseína de la leche, y corresponde a un líquido más o menos turbio, ácido y poco viscoso, de color amarillo, cuyos principales componentes son Lactosa, proteínas y sales minerales (Vasala y col.,2005).

El lactosuero, representa aproximadamente 90% del volumen de leche total y por cada kilo de queso, se generan aproximadamente 9 Kg de lactosuero (Viogaz S.A., 2012). Esto indica que anualmente se genera un importante volumen de residuo líquido con alto contenido de carga orgánica.

La composición de este, depende del tipo de leche y de los procesos empleados en la elaboración del queso. Siendo además, estos últimos muy variados, de acuerdo al tipo de queso y según el procedimiento específico que emplea cada planta, como ya se señaló en la figura 10. Sin embargo, la composición del suero, en cuanto a macro constituyentes es relativamente poco variable como se observa en la siguiente tabla 4

Tabla 4. Composición nutricional general de lactosuero. (FAO, 1985)

Agua	93%
Sólidos Totales	7%
Lactosa	4.9-5.1%
Materia Grasa	0.3%
Sustancias Minerales	0.6%
Proteínas totales	0.9%

El componente mayoritario del lactosuero, corresponde a Lactosa, la cual, es un disacárido compuesto por Galactosa y Glucosa. (Fig.11)

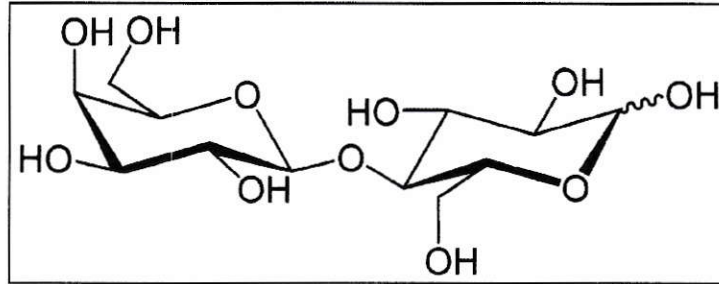


Figura 11 .Estructura química de la Lactosa, principal componente del lactosuero

1.2.6 Valorización del residuo

Actualmente el lactosuero en Chile tiene diversos usos por las empresas queseras, dependiendo del poder de inversión que cada una tenga. Según los datos del Instituto Nacional de Estadística (INE), la industria láctea menor de nuestro país destina este residuo lácteo a alimentación bovina y porcina, riego de praderas, venta a plantas lecheras para ser incorporado a otros subproductos lácteos y otros que no le dan uso. En general se podría clasificar su uso en:

Alimenticio: Existen numerosos usos para la alimentación humana y animal, pero su elevada cantidad de agua, salinidad y rápida acidificación complican su valorización. El suero se seca en una torre de secado para ser comercializado como suero en polvo, como sustituto de leche para terneros, cerdos u otros. Este suele mezclarse con paja picada y harinas. En muchas queseras pequeñas, este suero se utiliza fresco, de forma líquida como bebestible para estos animales.

Por otra parte, en alimentación humana, es un producto que se utiliza en cereales y harinas, para darle mayor gusto y color reemplazando a la leche en polvo por tema de costos. Además son usados en cremas para preparar varios productos derivados de ella, como pastas para untar y batir. Mezclas de suero y proteínas de soya, se utilizan para

productos vegetarianos, similares a la carne. Además, para la preparación de bebidas lácteas y limonadas, sopas en polvo, queso fundido, helados, pastas, panadería y levaduras.

Aprovechamiento industrial: Se puede modificar ciertas fracciones del suero lácteo de manera de obtener coprecipitados, proteínas del suero coaguladas mediante calor o aún proteínas concentradas obtenidas por ultracentrifugación. Estos productos sirven para mejorar el tenor proteico del yogur, pero también de las galletas, productos de panadería y pastelería, budines, helados, etc. Las proteínas coaguladas mediante calor encuentran su mejor aplicación como aditivo: se agregan a los quesos blancos, a los yogures y a todo tipo de productos lácteos fermentados, a los quesos, a los helados y a los pasteles.

Los productos de ultracentrifugación son usados sobre todo en dietética infantil. En efecto, el valor biológico de estas lacteoproteínas de suero concentradas equivale al de las proteínas solubles originales. Los residuos de la ultracentrifugación contienen sobre todo lactosa, nitrógeno no proteico y minerales. La recuperación de estos residuos pasa por la hidrólisis de la lactosa para obtener un jarabe (mezcla de glucosa y galactosa, con un poder endulzante cuatro a cinco veces superior al de la lactosa original).

Tratamiento y disposición final: Dependiendo del lugar de descarga, aplicando la normativa correspondiente, se realiza un tratamiento biológico y/o fisicoquímico.

Valorización energética: Fermentación alcohólica y digestión anaeróbica. Son dos vías de valorización energética, la primera corresponde a la producción de alcohol como el etanol, y la segunda corresponde a la producción de biogás. La digestión anaeróbica se ha desarrollado con empresas bioenergéticas en torno a la producción láctea en Pennsylvania, Texas y Wisconsin, en Estados Unidos, así como también en Leppersdorf,

en Alemania. Un caso particular se desarrolla en la Planta de biogás Moro en Treviso, Italia alimentada solo con suero de leche. Y en nuestro país, Schwager Energy S.A. alimenta una planta de producción de biogás con lactosuero de baja concentración en materia orgánica.

1.2.7 Descripción de la problemática a tratar

El lactosuero producido por la industria quesera, posee una alta carga orgánica, teniendo efectos contaminantes en los cuerpos de agua y suelo que lo reciben sin un previo tratamiento, desperdiándose el potencial energético de este residuo. Por lo que un tratamiento anaeróbico de este RIL, evitaría un problema ambiental en las zonas de descargas, aprovechándose la generación de biogás y la valorización energética de éste. La alta concentración de materia orgánica y la acidificación de este residuo son un problema para la digestión anaeróbica debido a que inhibirían la etapa metanogénica. Por lo que lograr la generación de biogás a alta carga orgánica de lactosuero, es el principal objetivo a cumplir.

1.3 Objetivos del Seminario

1.3.1 Objetivo General

Generar biogás a partir de lactosuero con alta carga orgánica proveniente de la industria quesera.

1.3.2 Objetivos Específicos

- 1 Levantar información con respecto al mercado de la industria láctea nacional, volúmenes de producción y potencial de cogeneración.
- 2 Evaluar, mediante ensayos de degradabilidad la generación de biogás, con diferentes inóculos bacterianos.
- 3 Evaluar mediante ensayos de degradabilidad la generación de biogás, a diferentes cargas orgánicas de lactosuero.

2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1 Materiales

Los materiales, equipos y reactivos utilizados para los ensayos se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 5. Materiales utilizados para el ensayo .

Materiales	Cantidad
Lactosuero	3 Litros
Purín Bovino	1 Kg
Inoculo granular de reactor de PTAS	1 Kg
Inoculo activo de reactor de PTAS	1 Kg
Frascos schott de Borosilicato marca Boeco	13
Barra magnética lisa 30x7 mm	13
Válvulas de cierre para gas	13
Manguera de silicona 5mm	2 metros
Probeta de polipropileno de 500 ml	1
Silicona roja	1 tubo
Poxypol	1
Papel de aluminio	2 tubos
Guantes	GL
Espátula de metal	1

Tabla 6. Equipos utilizados durante el ensayo.

Equipos	Cantidad
pH-metro HANNA HI 8424	1
Balanza marca VETO	1
Agitador Magnético HANNA HI 190-HI200	2
Baño calefactor	1
Fotómetro MERCK Spectroquant NOVA 60	1
Reactor COD HANNA HI839800	1
Mufla Barnstead Thermolyne 1300 Furnce modelo F131310M-33	1
Horno Electro Thermostatic modelo DHG-9147 ^a	1
Termómetro sensor digital marca VETO	1

Tabla 7. Reactivos utilizados durante el ensayo.

Reactivos	Cantidad
Test en cubetas DQO, MERCK 500-10000 mg·L ⁻¹ SPRECTOQUANT	13
Solución de NaOH 5%, 15%	2L

2.2 Metodología

2.2.1 Análisis de la información disponible.

2.2.1.1 Potencial de cogeneración

El potencial de cogeneración de energía del sector industrial lácteo menor, se determinó de forma teórica, utilizando datos de producción del análisis de mercado, de la sección 1.2 extraídos del Instituto Nacional de Estadística (INE). Además de revisar información del Centro de Energías Renovables No Convencionales (CERN) y estudios publicados por el Ministerio de Energía detallados en la referencia.

Del análisis del mercado lácteo menor, se ha estimado un potencial de generación de biogás y energía para el sector. La cantidad de biogás producido en la digestión anaeróbica dependerá de la composición del sustrato lactosuero, la eficiencia de la tecnología, los tiempos de retención hidráulica y la actividad de los microorganismos.

La cantidad de Metano producida por unidad de DQO convertida en condiciones anaeróbicas es de 0,39 L CH₄/ g DQO en condiciones estándar (0°C a 1 atm) (**Castells X., 2012**).

Para determinar la cantidad de Metano en otras condiciones se utiliza la ley universal de los gases, para saber el volumen del gas ocupado por un mol de Metano a cierta temperatura.

$$PV = nRT \quad \text{Ec.9}$$

Según esta ecuación se puede calcular, que por cada kg de DQO eliminada, es decir que la degradación anaerobia completa de 1 kg de DQO, teóricamente se obtienen 2,5 m³ de CH₄, medidos en condiciones mesofílicas (35°C y 1atm). Para más detalle del cálculo ver la sección 7.3.1 en Anexo.

En Chile, la generación de biogás está validada por empresas del sector agroindustrial, utilizando como sustrato purín de vacuno, ave y cerdos, además de biomasa seca como restos de parrones, cuescos de fruta, aserrín y madera, cuya DQO de entrada no supera los 10 g·L⁻¹. Estos sectores tienen un potencial de 2400 MW de electricidad, según los últimos datos entregados por el CER, y por las asociaciones gremiales, en cambio lograr producir biogás con un RIL altamente concentrado en DQO es una innovación para el área de la agroindustria, así, el lactosuero de la industria láctea menor tiene un potencial

de generación de energía eléctrica de 1159 MW, siendo alrededor del 50% de generación del sector agroindustrial ya mencionado.

A raíz del potencial de generación, se realiza una guía para la valorización energética del residuo.

2.2.1.2 Valorización energética del lactosuero.

La aplicación de un método para la valorización de lactosuero producido por la industria láctea, permite el aprovechamiento de un residuo para reducir los costos por concepto de uso de energía de las plantas productoras de queso, como también una solución anexa generada por el manejo y disposición final de este residuo. Buscar una forma de reutilizar este subproducto aprovechando el poder calorífico que tiene el biogás que se produce, tendría los siguientes beneficios para el sector:

- Transformar un problema de generación de residuos en una oportunidad para la generación de energía con fuente de residuos de energías renovables.
- Ahorro en términos de la disposición de residuos y del consumo de energía térmica por parte de la planta.
- Diversificación de la matriz energética en reemplazo de combustibles fósiles.
- Disminución de la contaminación en agua y suelo.
- Disminución de la huella de carbono de las empresas del sector.

El lactosuero si se transforma en un problema para el ambiente, si es que no tiene un uso específico, por lo tanto, pasa a la siguiente evaluación en la que se requiere que sea biodegradable para la producción de biogás.



En este paso, se centran los ensayos de degradabilidad realizados que se describen más adelante.

Luego de corroborar que si hay degradación y producción de biogás, esa generación debe tener una concentración importante de Metano y un alto poder calorífico, en este paso se requieren de otros ensayos en continuo y mediciones de calidad de biogás que no se incluyen en este trabajo.

Una vez superado esta etapa, pasamos al diseño tecnológico, el cual deberá estar disponible en el mercado y ser además, compatible con los estándares de calidad sin un impacto significativo sobre otros medios. De ser así, se debe evaluar su costo, el cual solo podrá llevarse a cabo si es que es viable económicamente para el sector.

Si pasa la evaluación, se desarrollará un plan de valorización energética de residuos. Concepto que se ha incorporado fuertemente en la discusión de la ley de responsabilidad extendida del productor (REP), pues, corresponde al procedimiento previo a la disposición final de un residuo.

2.2.2 Visitas a terreno

Se realizaron visitas a terreno para la obtención de lactosuero a una quesera de la sexta región y de los inóculos bacterianos, a la sanitaria de la región Metropolitana. Realizando una caracterización físico-química de cada uno de ellos, para luego comenzar el ensayo de degradabilidad.

2.2.2.1 Obtención y caracterización del Residuo Industrial Líquido (RIL)

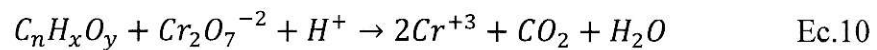
El lactosuero utilizado, fue obtenido de una elaboradora de queso fresco, ubicada en la sexta región en el sector de San Vicente de Tagua Tagua. La empresa, procesa 100 Litros de leche al día, teniendo una producción de 20 Kg de quesillo, para ser vendidos en supermercados de la zona y unos 80 a 90 Litros de lactosuero como residuo que se utilizan como alimento animal y riego de praderas, el cual, se extrajo para realizar la prueba de degradabilidad. El RIL fue almacenado en una botella de polietileno y refrigerada por 8 horas hasta su uso. Se extrajo la mayor cantidad de grasa, en forma manual, para evitar la formación de espuma en el transcurso del ensayo. Se midió su pH, DQO, sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV).

Tabla 8. Parámetros fisicoquímicos evaluados en el lactosuero y su metodología

Parámetro	Metodología
Sólidos totales ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	APHA, 2540 B
Sólidos Volátiles ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	APHA, 2540 E
Demanda Química de Oxígeno ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Espectrofotometría
pH	Potenciométrico

La determinación de sólidos totales y sólidos volátiles se realizó mediante el método gravimétrico descrito por la APHA. Para el detalle de estos análisis, revisar la sección 7.1 en Anexo.

La determinación de la DQO, fue el parámetro a utilizar para determinar las cargas orgánicas de lactosuero, utilizando un método espectrofotométrico el que mide la cantidad de cationes Cr^{+3} , generados a partir de $K_2Cr_2O_7$. Con esta solución se hace un barrido de absorbancia en función de la longitud de onda en el espectrofotómetro. El máximo de transmisión se encuentra entre 410 y 480 nm. Los cationes de Cromo liberados, son proporcionales al Oxígeno presente en la materia orgánica que se pueden reducir utilizando un oxidante fuerte, que suele ser el Dicromato de Potasio en medio ácido, usando un catalizador y a temperatura elevada. La reacción general es la siguiente:



La solución que contiene la muestra, cambia de color anaranjado a verde, a medida que el dicromato se reduce y la materia orgánica se oxida. Mientras más intenso sea el verde, habrá una mayor concentración de materia orgánica oxidable en la muestra.

Para revisar en detalle el procedimiento de la técnica, revisar la sección 7.2 de Anexo

2.2.2.2 Obtención y caracterización del Inóculo bacteriano

Se utilizaron tres tipos de inóculo, dos provenientes de planta de tratamiento de aguas servidas (PTAS): lodo activo y lodo granular, y un tercero proveniente de deyecciones bovinas. En cada caso, el inóculo fue caracterizado con respecto al pH, sólidos totales y sólidos volátiles.

Tabla 9. Caracterización física de los inóculos bacterianos y la metodología utilizada.

Inóculo	Simbología	Parámetro	Metodología
Purín bovino	I _A	pH	Potenciométrico
Lodo activo	I _B	Sólidos totales (mg·L ⁻¹)	APHA, 2540 B
Lodo granular	I _C	Sólidos Volátiles (mg·L ⁻¹)	APHA, 2540 E

2.2.3 Metodología de ensayo de degradabilidad

Se realizó un ensayo de degradabilidad anaeróbica, para determinar la generación de biogás con lactosuero en condiciones específicas, la actividad metanogénica de los inóculos y la degradación del sustrato lactosuero.

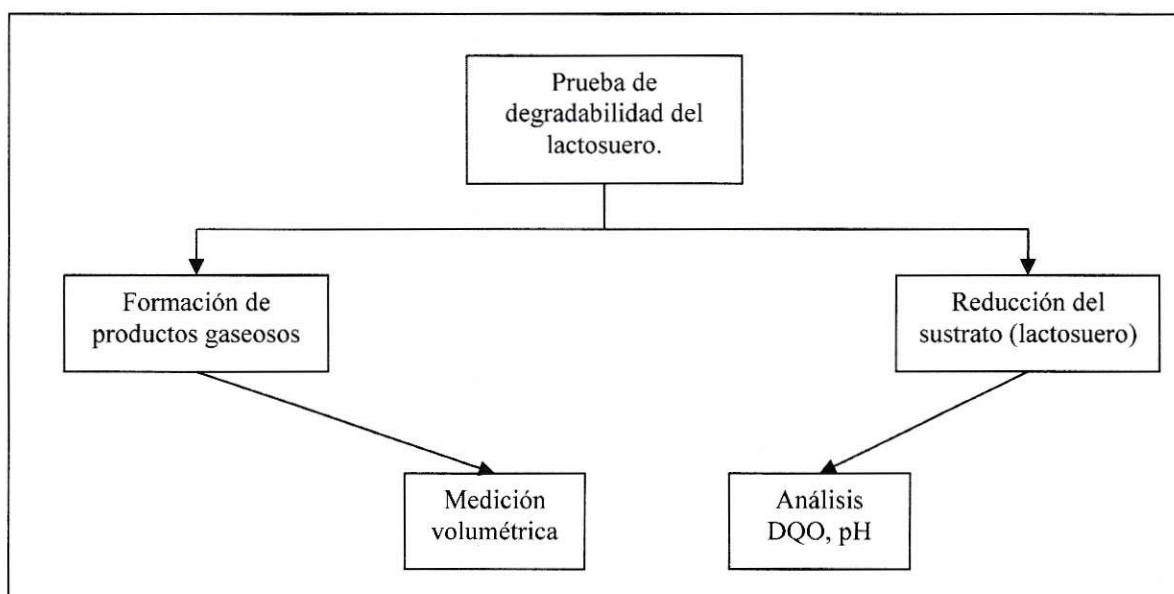


Figura 12. Esquema del procedimiento de una prueba de degradabilidad.

El procedimiento, consiste en tomar una porción de inóculo bacteriano, y ubicarlo dentro de un recipiente hermético en conjunto con el sustrato a degradar.

- a. Como recipiente, se seleccionó una botella schott marca Boeco transparente de 500 ml como volumen total
- b. La mezcla sustrato/inoculo debe ser el 90% del volumen total. El sustrato no debe superar la tercera parte de este.
- c. Se masaron 133g de inoculo y midieron 300 ml de sustrato “lactosuero” a distintas cargas orgánicas, 25%v/v, 50%v/v y 100% v/v, al cual fue necesario modificar pH lo más cercano a neutro, utilizando una solución de NaOH al 5%.
- d. Se consideró un blanco de lactosuero sin inoculación de población bacteriana. Y también se consideraron mezclas de inóculo sin adición de lactosuero
- e. Introducir una barra magnética a cada recipiente antes de sellar. Para darle agitación al sistema y mayor contacto.
- f. Se sella el envase de tal forma que no existan fugas ni sea susceptible a que ingrese oxígeno del ambiente al interior de la botella.
- g. Se cubren con papel de aluminio para darle mayor anaerobiosis al ensayo y se colocan en una incubadora a temperatura fija de 35°C. Se toman medidas del volumen de biogás producido con ayuda de una botella Mariotte con una solución alcalina, NaOH al 15%, la que al ser burbujeadada en ella pasa a una columna de agua midiendo el volumen de agua desplazado durante los próximos días hasta que la producción de gas decaiga o sea constante.
- h. Se construye un gráfico de volumen de metano acumulado vs el tiempo. De éste gráfico se aproxima ($\Delta\text{CH}_4/\Delta t$) como la pendiente más pronunciada entre dos mediciones consecutivas. (Montalvo y Guerrero, 2007)

Cada uno de los pasos descritos se repite en cada uno de los ensayos detallados en la siguiente matriz.

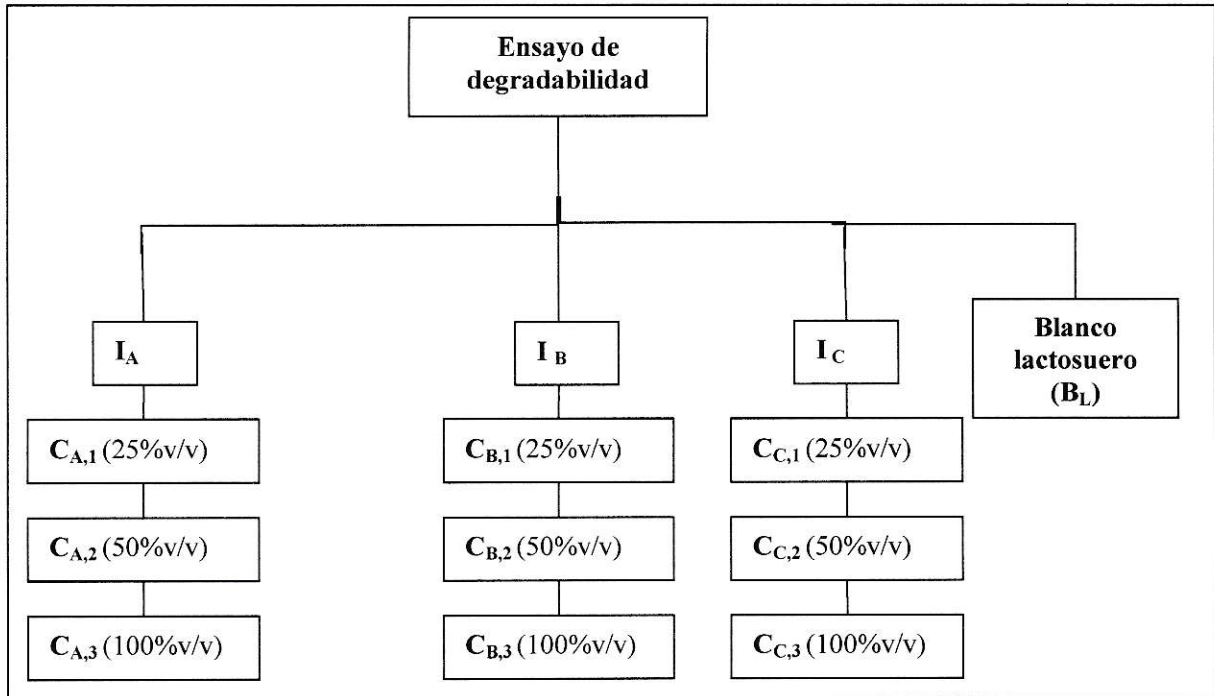


Figura 13. Matriz de 13 ensayos con tres diferentes inóculos y con lactosuero a tres distintas concentraciones.

Se montó cada unidad del ensayo de degradabilidad que se muestra en la siguiente figura

14



Figura 14. Montaje de ensayo de degradabilidad, (a) Agitador magnético y ensayo, (b) Lavado de biogás generado con una solución alcalina de NaOH al 15%, (c)Medición de biogás por desplazamiento de agua, (d) Baño termostático, (e) Termómetro digital.

Se realizaron trece ensayos, utilizando tres concentraciones de lactosuero con cada uno de los inóculos, agregando un blanco (ver figura 13)

La mezcla de la reacción de los ensayos, se realizó utilizando una razón inóculo/sustrato de 1/3. Antes de sellarlos, se ajustó pH con NaOH al 5%, y la DQO del lactosuero se determinó por dilución a partir del concentrado. Los valores se muestran en la siguiente tabla 10

Tabla 10. Condiciones de entrada de cada uno de los ensayos de degradabilidad.

Ensayo	Símbolo	pH	DQO [mgO ₂ ·L ⁻¹]	Inóculo [g]	Lactosuero [mL]	Agua [mL]
Inóculo purín	I _A	7,2		133	0	300
Inóculo lodo activo	I _B	7,54		133,14	0	300
Inóculo lodo granular	I _C	7,57		133,58	0	300
Blanco lactosuero	B _L	7,56	114400	0	300	0
Lactosuero 25%+ inóculo purín	C _{A,1}	7,67	28600	133,05	75	225
Lactosuero 50%+inóculo purín	C _{A,2}	7,54	57200	133,06	150	150
Lactosuero 100% +inóculo purín	C _{A,3}	7,64	114400	133,03	300	0
Lactosuero 25%+inóculo lodo activo	C _{B,1}	7,51	28600	133,4	75	225
Lactosuero 50%+inóculo lodo activo	C _{B,2}	7,55	57200	133,38	150	150
Lactosuero100%+ inóculo lodo activo	C _{B,3}	7,6	114400	133,4	300	0
Lactosuero 25%+ inóculo lodo granular	C _{C,1}	7,58	28600	133,2	75	225
Lactosuero 50%+inoculo lodo granular	C _{C,2}	7,5	57200	133,17	150	150
Lactosuero 100%+inóculo lodo granular	C _{C,3}	7,54	114400	133,4	300	0

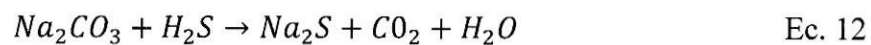
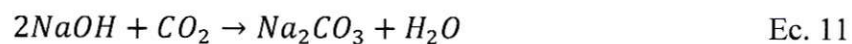
El ensayo de degradabilidad fue realizado durante 70 días, considerándose un tiempo adecuado para evaluar el inóculo bacteriano y el efecto de la concentración del

lactosuero en la generación de Metano. La mezcla de reacción, se incubó a 35°C durante todo el experimento

2.2.3.1 Medición de Metano generado

Se realizó la primera medición de Metano, transcurridas las primeras 24 horas desde su incubación, y luego día por medio. Se colocó la botella schott en un agitador magnético, abriendo las válvulas de cierre conectada a la botella de Mariotte, con una solución alcalina de NaOH al 15%, con el fin de eliminar el CO₂ y H₂S de la fase gaseosa. Ésta a su vez, conectada a una columna de agua para cuantificar la mayor cantidad de volumen de Metano.

Las reacciones que ocurren en este caso, son las siguientes



A partir de estas ecuaciones se obtiene carbonato de sodio en la Ec. 12, y sulfuro de sodio en la Ec.13, quedando en la solución los gases trazas, permitiendo la purificación del gas. El Metano no es soluble en soluciones alcalinas, debido a la apolaridad de su estructura, el Metano es una molécula orgánica simétrica, que no será soluble en una solución alcalina polar, el Hidróxido de Sodio es una molécula polar, que impide que se formen enlaces iónicos con este gas, el que pasa de la botella de Mariotte a una columna de agua graduada para ser cuantificado, por la misma naturaleza que la solución alcalina, el Metano no formará Puentes de Hidrógeno con el agua, permitiendo cuantificar su volumen.

2.2.3.2 Actividad metanogénica específica de los inóculos (AME)

Este parámetro se realizó con el fin de analizar la estabilidad de los inóculos utilizados, tomando como base las curvas de Metano acumulado y utilizando la ecuación 10. Se seleccionó la pendiente más pronunciada y se procedió a realizar el cálculo, el que se detalla en la sección 8.3.4 de Anexos.

$$AME \left(\frac{gDQO_{CH_4}}{gSSV} \cdot t \right) = \frac{\frac{dV_{CH_4}}{dt}}{X_0 V_R f_1} \quad \text{Ec. 13}$$

$\frac{dV_{CH_4}}{dt}$: Volumen de metano (ml)

t: Tiempo (día)

X_0 : Concentración del Lodo (g SSV/L)

V_R : Volumen útil del reactor (L)

f_1 : Factor de conversión ($gDQO \cdot ml_{CH_4}^{-1}$)

El factor de conversión representa el valor de DQO de la unidad de volumen de biogás, que depende de la temperatura del gas, por tanto si se considera una temperatura normal, tiene un valor de 394 g DQO por cada ml de metano (**Fiel y otros, 1988**).

2.2.3.3 Reducción o abatimiento de lactosuero

Una vez transcurrido el ensayo de degradabilidad, se procedió a analizar el lactosuero residual de los ensayos inoculados con purín y con lodo granular, por ser los que obtuvieron mayor actividad metanogénica, mediante el análisis de la DQO de estos. Además, se analizó el pH de la mezcla, para evaluar la capacidad amortiguadora de la misma, frente a la acidificación del lactosuero y a la etapa ácida propia de la digestión anaeróbica.

3. RESULTADOS

3.1 Potencial de cogeneración de una empresa tipo del sector lácteo menor.

Al hacer un cálculo del potencial de generación que tienen las empresas del sector lácteo menor, en términos de generación de biogás, se tomó como ejemplo una planta productora de queso que procesa en promedio 100 m³ diario de leche, la cual potencialmente puede producir 90 m³ de lactosuero que en promedio tiene una carga orgánica de 50.000 mgO₂·L⁻¹, pudiendo llegar a generar unos 1755 m³ de biogás. (Revisar cálculo en la sección 8.3.2 de Anexo).

El combustible que con 60% de Metano, podría ser cogenerado, convirtiéndose en 5290 KWh de energía térmica y 4038 KWh de energía eléctrica en donde el potencial cogenerado es de 9328 Kwh. Se tiene que, el precio del KWh consumido es de \$88,0 (Chilectra S.A., 2014) por lo que una empresa con estos niveles de cogeneración eléctrica podría ahorrar \$820.864.

3.2 Potencial energético del sector lácteo menor.

La siguiente tabla 10, muestra el potencial energético que tiene el sector lácteo menor, utilizando los datos de volumen de producción del año 2012. Durante ese año, se produjeron 26.389.864 Kg de queso y 12.890.077 Kg de quesillo, usándose para su producción 295.962.709 L de leche y generándose en la cuajada de ella unos

266.366.438 L de lactosuero, los cuales, pueden generar 11952MW de energía eléctrica.

Para mayor detalle de este cálculo, revisar sección 8.3.3 en Anexo

Tabla 11. Potencial energético para el sector lácteo menor.

Materia Orgánica [g·m ⁻³]	Volumen de leche (entrada) [m ³]	Volumen de lactosuero (residuo) [m ³]	Generación de biogás [m ³]	% CH ₄	Energía Térmica [KWh]	Energía Eléctrica [KWh]	Energía Total Cogenerada [KW]
50	295.963	266.366	5.261.958	60,0	15.656.502	11.952.488	1.159.578

3.3 Ensayo de degradabilidad

La caracterización físico-química de lactosuero e inóculos, se muestra en la tabla 12

Tabla 12. Parámetros físico-químico de lactosuero e inóculos bacterianos.

Parámetros	Inóculo purín (I _A)	Inóculo lodo activo (I _B)	Inóculo lodo granular (I _C)	Blanco lactosuero (B _L)
Sólidos totales [mg·L ⁻¹]	68.485	821.540	74.319	643.940
Sólidos volátiles [mg·L ⁻¹]	65.515	562.890	66.331	367.220
SV/ST	0,956	0,685	0,893	0,5
DQO [mgO ₂ ·L ⁻¹]	-	-	-	114.400
pH	6,2	7,1	6,9	5,3

Siguiendo los pasos desarrollados en la guía de la figura 1, se realizaron una serie de ensayos para comprobar la generación de Metano a tres cargas orgánicas de lactosuero, mediante digestión anaeróbica probando tres inóculos diferentes.

3.3.1 Medición diaria de Metano

3.3.1.1 Generación diaria de Metano de cada inóculo y blanco lactosuero.

La medición en blanco corresponde a aquella que no se agregó población microbiana. Además se incluyó cada uno de los inóculos sin lactosuero. Los resultados se observan en la figura 15. Se observa la curva azul, correspondiente a inóculo lodo granular (I_C) obtuvo mayor generación de Metano, partiendo con una alta producción al inicio y decayendo con el transcurso de los días. La curva roja, correspondiente a inóculo lodo activo (I_B), obtuvo generación de Metano al principio, la cual bajó con el transcurso de los días. La curva negra, correspondiente a inóculo purín (I_A), presentó una baja generación. La curva verde, correspondiente a blanco lactosuero B_L , generó al principio del experimento, pero no presentó mayor actividad en el transcurso de los días.

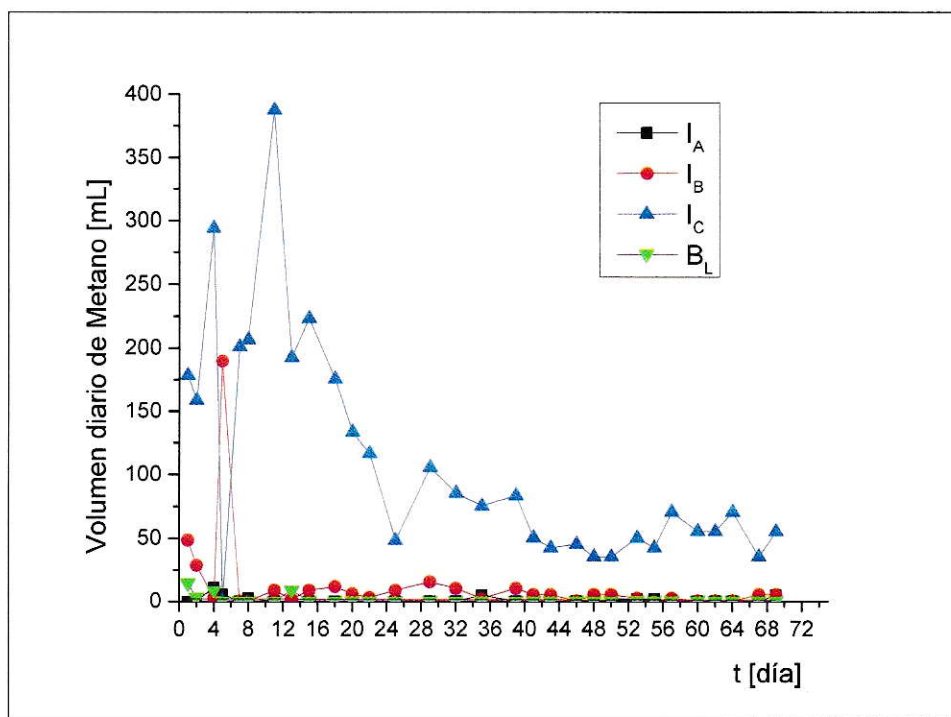


Figura 15. Generación diaria de Metano del blanco y cada uno de los inóculos.

3.3.1.2 Generación de diaria Metano con lactosuero al 25%v/v.

La figura 16, muestra la generación de Metano de cada inóculo mezclado con lactosuero al 25% v/v. En las tres curvas obtenidas, se observa que la mezcla necesitó de un tiempo de arranque o de adaptación, aproximadamente de unos 29 días, para iniciar la producción de Metano. La mezcla correspondiente a purín con lactosuero ($C_{A,1}$) tuvo un peak de producción en el día 43 generándose 585 mL. La segunda mezcla correspondiente a lodo activo con lactosuero ($C_{B,1}$), tiene generación menor. Se observa un peak el día 64, generándose 315 mL de biogás. La tercera mezcla en ensayo, correspondiente a lodo granular con lactosuero ($C_{C,1}$), señala un comportamiento similar al ensayo $C_{A,1}$, pero obtiene un máximo menor de 407 mL el día 39

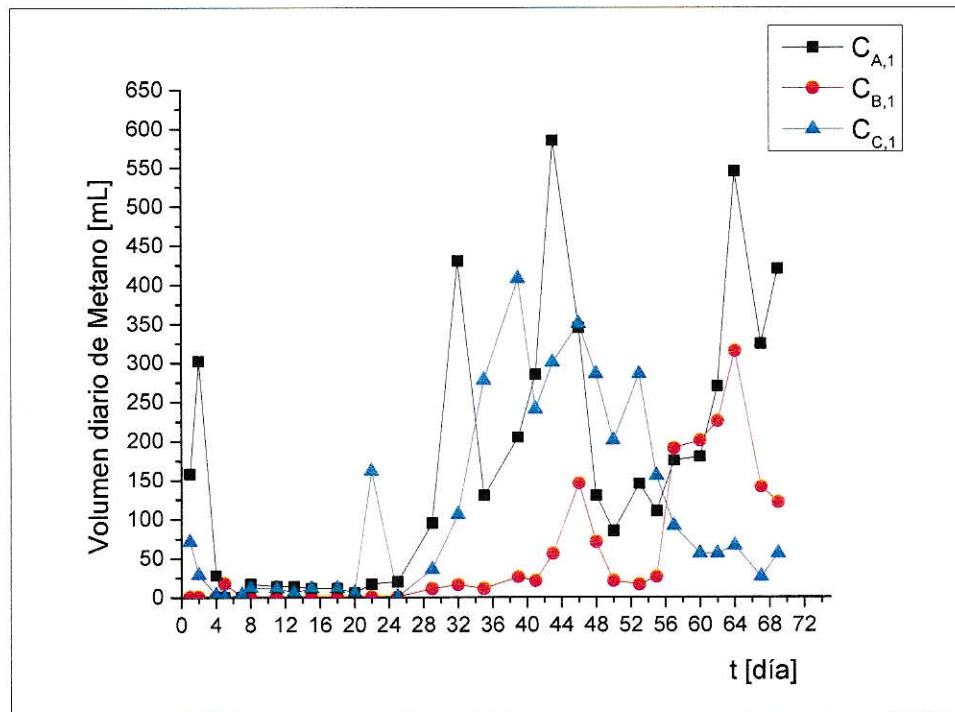


Figura 16. Producción de Metano en los ensayos con lactosuero al 25%v/v con tres inóculos

3.3.2.3 Generación diaria de Metano con lactosuero al 50%v/v.

Se diluyó el lactosuero a un 50%v/v, y se mezcló con tres inóculos distintos, obteniéndose la generación de Metano que se muestra en la figura 17. La mezcla en los tres casos necesitó un menor, tiempo de arranque pero a diferencia del experimento anterior, la generación diaria fue significativamente menor. La mezcla de lactosuero con purín ($C_{A,2}$), partió con casi 410 mL de generación, que decayó al cuarto día, volviendo a aumentar el día 10 hasta 23 mL. La segunda mezcla de lodo activo y lactosuero ($C_{B,2}$), necesitó dos semanas para iniciar la generación de biogás con un máximo de 130 mL. La tercera mezcla de lodo granular y lactosuero ($C_{C,2}$), no generó Metano durante el transcurso de este experimento.

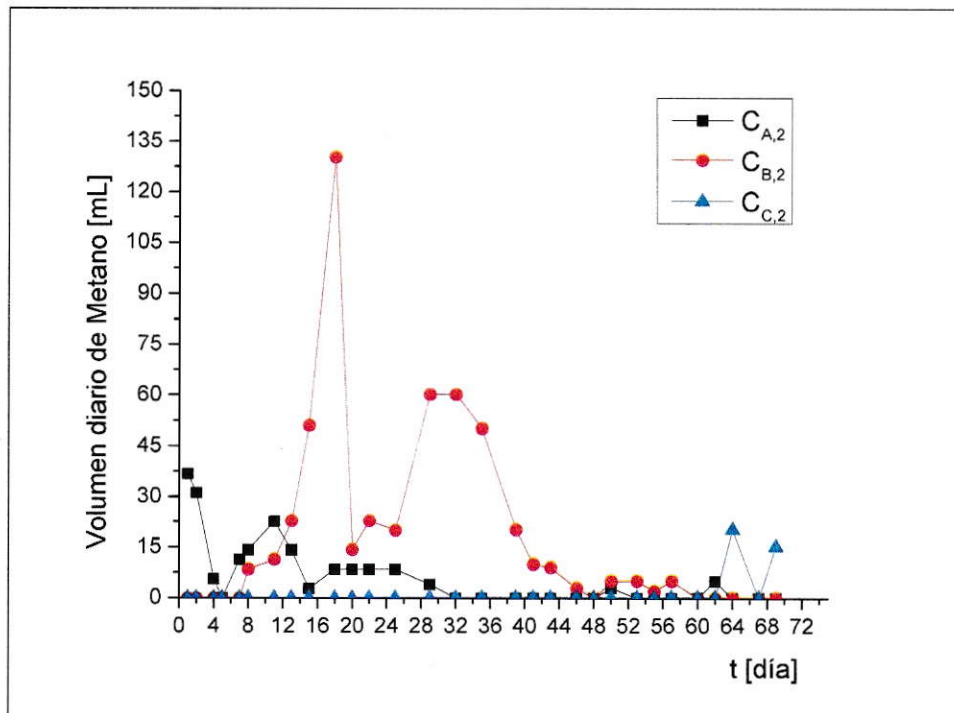


Figura 17. Producción de Metano en los ensayos con lactosuero al 50%v/v con tres inóculos

3.3.2.4 Generación diaria de Metano con lactosuero concentrado.

El lactosuero utilizado no fue diluido, se utilizó tal como sale de la planta quesera, siendo ésta la situación con mayor carga orgánica. La figura 18, correspondiente a los resultados de generación de Metano de cada inóculo mezclados con lactosuero sin diluir (al 100%), muestra que en esta condición el único ensayo que obtiene una generación significativa de Metano es la mezcla de lodo granular con lactosuero ($C_{C,3}$), siendo el único capaz de generar un *peak* de 412 mL al día 25. La mezcla de purín con lactosuero ($C_{A,3}$), presenta una leve generación.

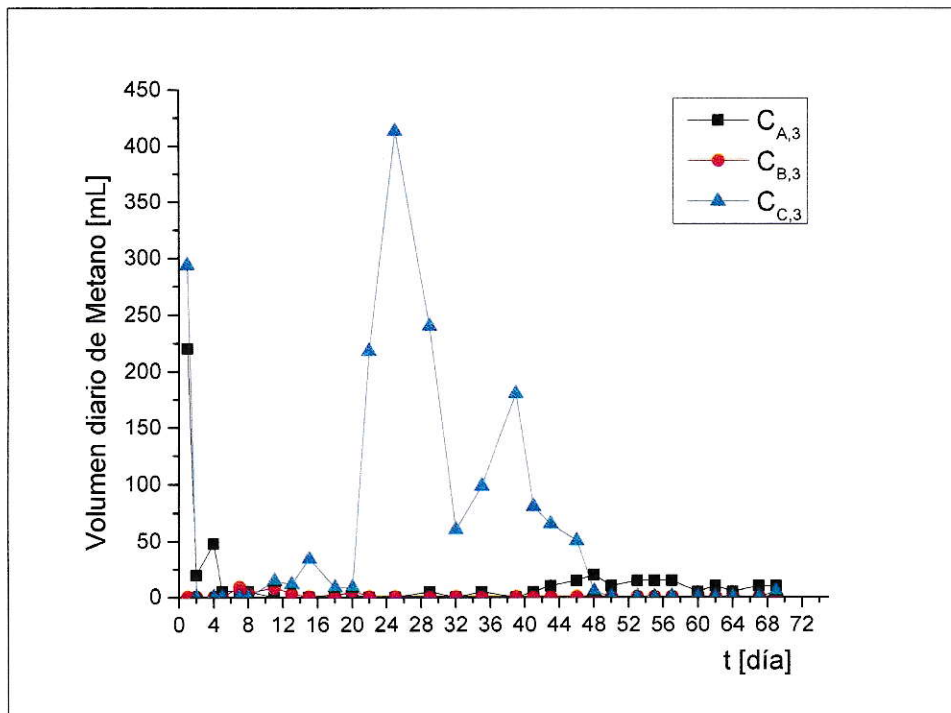


Figura 18. Producción de Metano en los ensayos con lactosuero al 100%v/v con tres inóculos.

3.3.2 Producción acumulada de Metano.

A partir de los datos anteriores se generaron curvas de producción acumulada de Metano para cada uno de los ensayos. Cada medición acumulada registrada, corresponde a la sumatoria de la medición diaria. Esto permitió, estimar la actividad metanogénica de los inóculos en cada condición que se muestran en la sección 3.3.3. En las siguientes figuras se muestran las curvas de Metano acumulado para cada ensayo del experimento.

3.3.2.1 Metano acumulado de cada inóculo y blanco lactosuero.

La figura 19, muestra la producción acumulada de Metano para los tres inóculos y el blanco de lactosuero. El inóculo purín (I_A), logró acumular 36 mL. El inóculo lodo activo (I_B), generó un volumen total de 386 mL y el inóculo lodo granular (I_C), generó un volumen total de 3299 mL. El blanco de lactosuero (B_L) no logró acumular Metano. El volumen acumulado de los ensayos mezclados con lactosuero, se presentan desde la figura 20 a la figura 22.

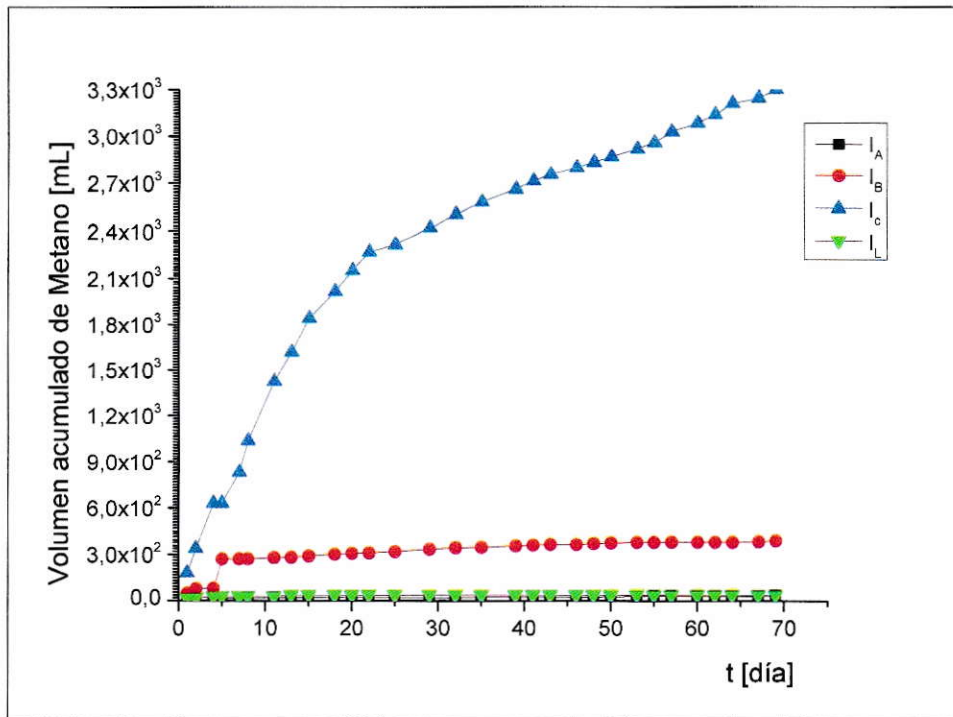


Figura 19. Acumulación de Metano para cada inóculo y blanco lactosuero.

3.3.2.2 Metano acumulado con lactosuero al 25%v/v.

La figura 20, muestra el volumen de biogás acumulado por el lactosuero diluido al 25%v/v en presencia de los tres inóculos. Se observó que el ensayo con purín ($C_{A,1}$) acumuló la mayor cantidad de Metano, 5059 mL, seguido por el ensayo con lodo granular ($C_{C,1}$) que generó 3305 mL. Finalmente el ensayo con lodo activo ($C_{B,1}$) acumuló sólo 1616 mL.

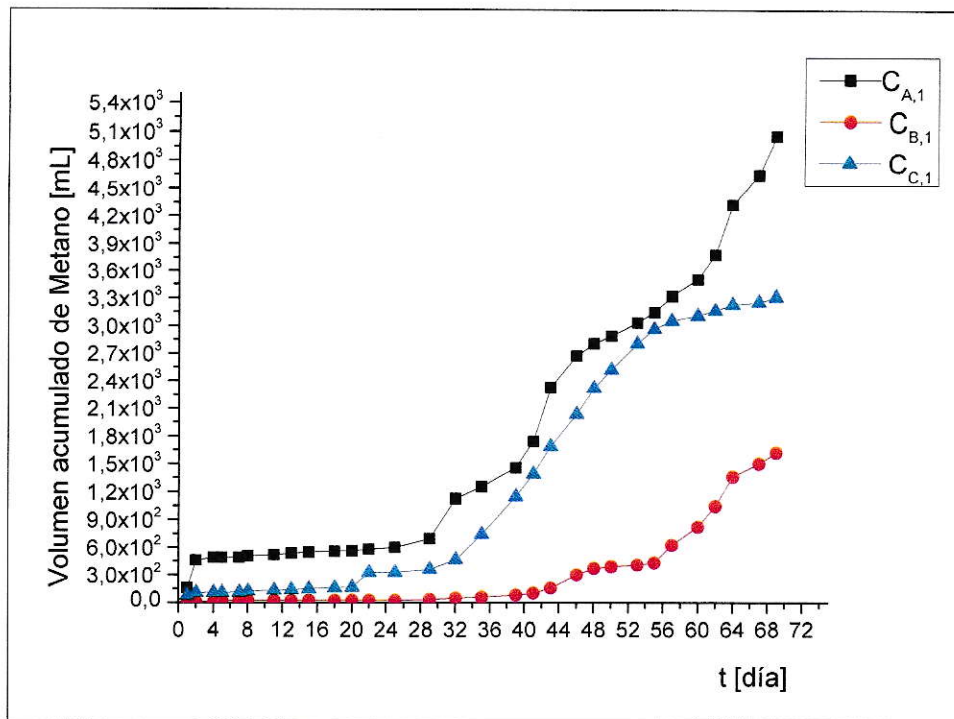


Figura 20. Acumulación de Metano a partir de lactosuero al 25%v/v, con tres inóculos.

3.2.2.3 Metano acumulado con lactosuero al 50%v/v.

La figura 21, corresponde al volumen de Metano acumulado por lactosuero diluido al 50%v/v. Se observó que el ensayo con lodo activo (C_{B,2}) logró acumular la mayor cantidad de Metano, 501,9 mL. Seguido del ensayo con purín (C_{A,2}) que acumuló 179,5 mL. El ensayo con lodo granular (C_{C,2}) no presentó actividad de generación de Metano.

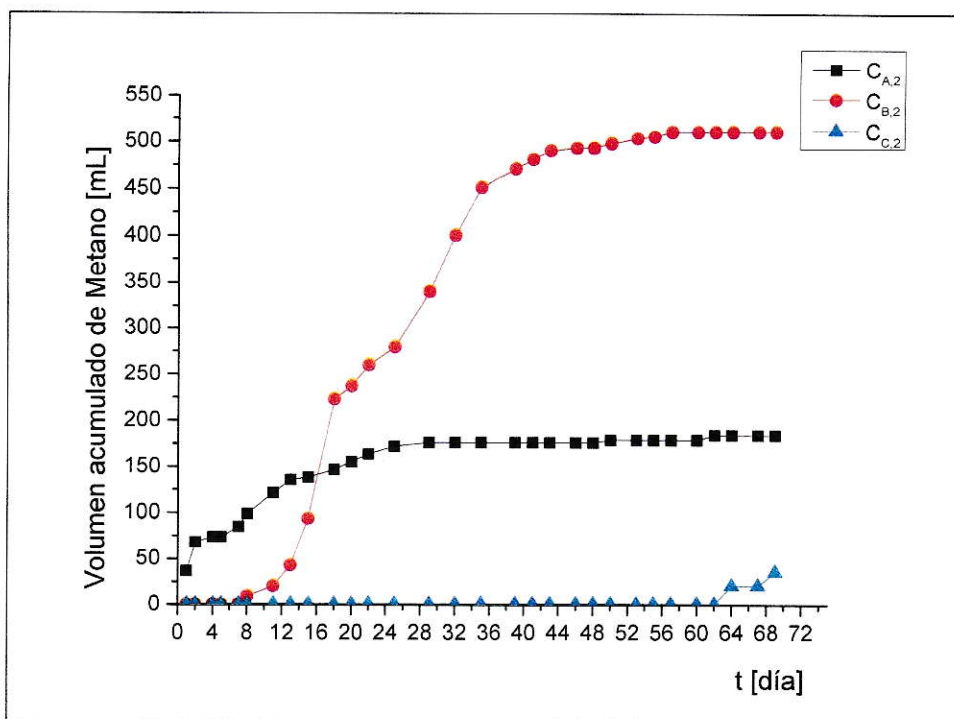
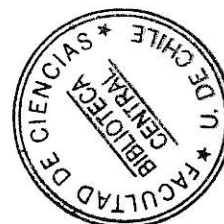


Figura 21. Acumulación de Metano a partir de lactosuero al 50%v/v, con tres inóculos.

3.2.2.4 Metano acumulado con lactosuero concentrado.

La figura 22, muestra el volumen de Metano acumulado por el ensayo con lactosuero concentrado. En el ensayo con lodo granular ($C_{C,3}$), se acumuló la mayor cantidad de Metano: 1778,9 mL, seguido del ensayo con purín ($C_{A,3}$), con 396 mL. El ensayo con lodo activo solo logró acumular 28,6 mL de CH_4 .



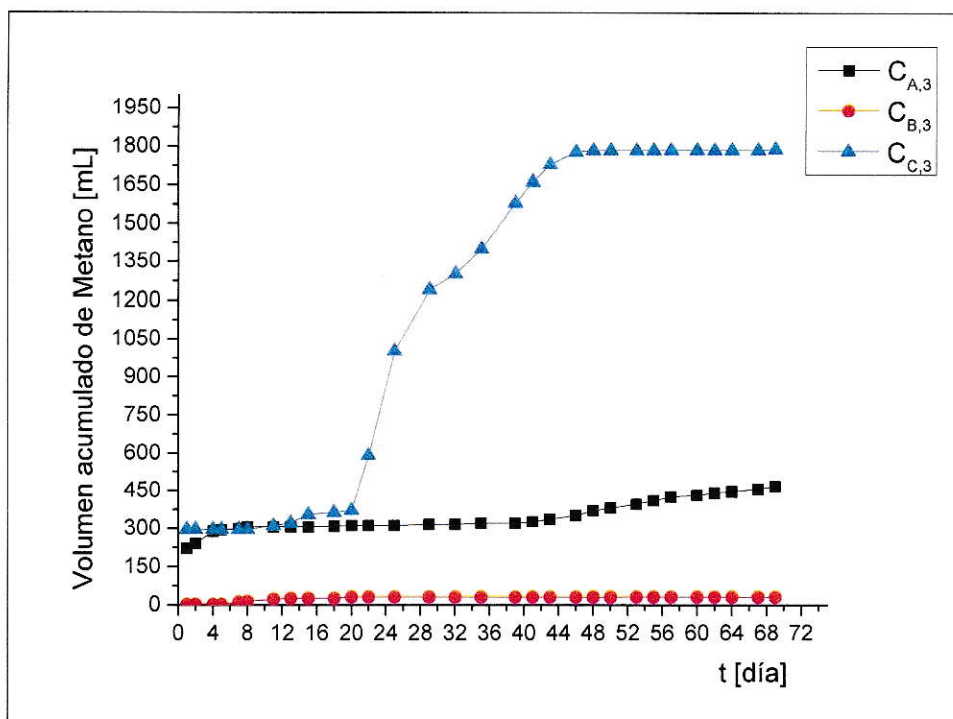


Figura 22. Acumulación de Metano a partir de lactosuero 100%v/v, con tres inóculos.

3.3.3 Determinación de la actividad metanogénica específica (AME).

El cálculo de la actividad metanogénica específica, es un parámetro que se utiliza para determinar la estabilidad de los lodos anaeróbicos. En este trabajo se utilizó para determinar la estabilidad de los inóculos utilizados, la que se expresa en $\text{gDQO-CH}_4/\text{gSSV}\cdot\text{día}$, o sea, la cantidad de gas Metano máxima que se produjo, por cada gramo de bacterias, expresada en los sólidos volátiles presentes en el inóculo

La figura 23 muestra la AME, expresada en $[\text{gDQO}/\text{gSV}\cdot\text{día}]$ obtenida por las mezcla de purín con lactosuero. Las barras rojas, corresponden a lodo activo mezclado con lactosuero. Las últimas barras azules, corresponden a lodo granular mezclado con lactosuero. Cada una de las barras representa una concentración de lactosuero.

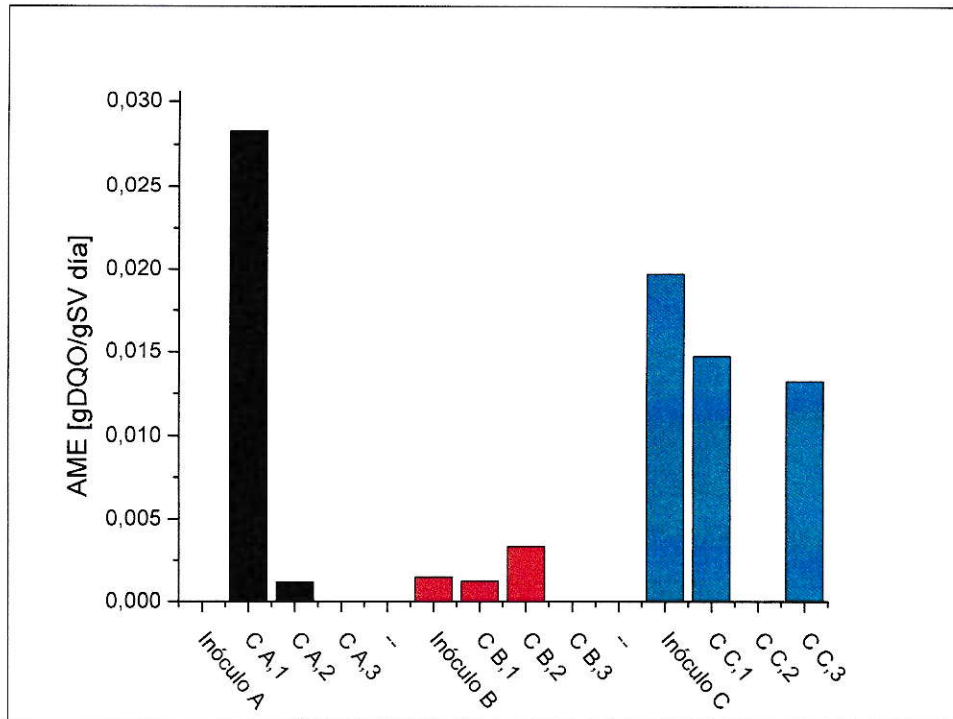


Figura 23. Actividad metanogénica de lactosuero a distintas concentraciones y tres inóculos.

De los ensayos con purín se logró determinar la AME de lactosuero al 25%, y al 50%v/v, siendo 0,0283 y 0,00117[gDQO/ gSV·día]. De los ensayos con lodo activo se logró determinar la AME del inóculo, de lactosuero al 25% y 50%v/v, siendo 0,00174, 0,00122 y 0,00334 [gDQO/ gSV·día] respectivamente. Y por último de los ensayos con lodo granular se logró determinar la AME del inóculo, lactosuero al 25%, y al 100%v/v, siendo 0,0197, 0,0143 y 0,0132 [gDQO/ gSV·día] respectivamente.

3.3.4 Reducción o abatimiento de lactosuero

Una vez transcurrido el ensayo de degradabilidad, se procedió a analizar el lactosuero residual de los ensayos inoculados con purín y con lodo granular, por ser los que obtuvieron mayor actividad metanogénica, mediante el análisis de la DQO de estos.

Además, se analizó el pH de la mezcla, para evaluar la capacidad amortiguadora de la misma, frente a la acidificación del lactosuero y a la etapa ácida propia de la digestión anaeróbica. Los resultados se muestran en la siguiente tabla 13

Tabla 13. Abatimiento de lactosuero, porcentaje de variación de pH y DQO

	Ensayos								
	Purín			Lodo activo			Lodo granular		
	C _{A,1}	C _{A,2}	C _{A,3}	C _{B,1}	C _{B,2}	C _{B,3}	C _{C,1}	C _{C,2}	C _{C,3}
pH entrada	7,67	7,54	7,64	7,51	7,55	7,6	7,58	7,5	7,54
pH salida	6,91	5,61	3,89	6,85	5,52	3,64	7,15	6,87	6,0
DQO entrada	28600	57200	114400	28600	57200	114400	28600	57200	114400
DQO salida	22125	42350	105200				19475	55550	79255
% pH	9,91	25,60	49,1	8,79	26,89	52,11	5,67	8,4	20,4
%DQO	22,64	25,96	8,4				31,91	2,88	30,72

4. DISCUSIÓN

El presente trabajo tuvo como objetivo principal, obtener biogás a partir de lactosuero con alta carga orgánica producido por la industria quesera. el cual corresponde a un residuo de la industria láctea menor. Dado que no tiene mayor transformación que su disposición final y alimento de animales, se visualiza en él un potencial energético, que incluiría a este sector en el concepto de valorización de residuos, el cual, está siendo discutido en la nueva ley de responsabilidad extendida al productor (REP), que espera ser aprobada dentro del año 2015.

Los resultados obtenidos en este trabajo, permitirán establecer las condiciones iniciales para implementar un reactor piloto continuo ya que el lactosuero es un sustrato con una alta concentración de materia orgánica y fácilmente acidificable por la formación del Ácido Láctico.

La quesera que se tomó como ejemplo, tiene un RIL con una DQO de $114,4 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. Por lo que, se investigó el efecto de poblaciones bacterianas presentes en tres inóculos diferentes para la producción de Metano, dos provenientes de PTAS y purín de vacuno.

Aunque se tiene antecedentes de la degradación de lactosuero en condiciones anaeróbicas en nuestro país, el RIL de entrada al reactor anaeróbico, es de una baja carga orgánica, que no supera los $10,0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. Así, la concentración del lactosuero, formó parte de la problemática y de la investigación, por lo que, se establecen tres concentraciones o carga orgánica de entrada a un ensayo de generación de biogás y de degradabilidad de lactosuero. La generación de energía con una alta concentración de la DQO a partir de lactosuero, sería una innovación única en el sector agroindustrial.

Al analizar los resultados obtenidos, es importante identificar los objetivos, que son: efecto del inóculo bacteriano con lactosuero y efecto de la concentración de este en la generación de biogás. Los parámetros de evaluación fueron: pH, degradación, volumen de generación de biogás: Metano diario y acumulado y la actividad metanogénica específica de los inóculos

Se encontró que es necesario adicionar un inóculo al sustrato lactosuero, para que comience a producir biogás, ya que, como se muestra en el blanco, por si solo no es capaz de generarlo, debido a que no presenta las poblaciones bacterianas necesarias, a pesar de que se le dieron las condiciones para su crecimiento.

En términos generales, se observa en las figuras que muestran el Metano acumulado, que cada concentración de lactosuero requiere un tipo diferente de inóculo. El purín funcionó mejor a una concentración de 25%v/v, en cambio al 50%v/v se generó mas gas con lodo activo, y el lodo granular fue el único capaz de generar al 100%v/v.

4.1 Inóculo de purín

En los ensayos mezclados con purín, se logró la generación de Metano a las tres concentraciones o cargas orgánicas de lactosuero, observándose que la concentración del sustrato, afectó inversamente la generación de biogás, lo cual es concordante con los resultados obtenidos en experimentos realizados previamente y que no forman parte de este Seminario. La degradación del lactosuero, fue pareja, logrando un máximo de abatimiento de 25,96% en la concentración al 50%v/v, 22,64% en la concentración de un 25%v/v y no lográndolo con lactosuero concentrado.

Este inóculo a diferencia de los de PTAS, no estuvo acondicionado previamente a ambientes anaeróbicos, lo cual podría explicar en parte los resultados obtenidos, ya que la digestión anaeróbica, se desarrolla a pH, entre 6,5 y 7,5 según la literatura. Los resultados de la medición de este parámetro al dar por finalizado el experimento, demostraron una baja capacidad del inóculo para revertir la acidificación del sistema, llegando a pH 3,89 con lactosuero concentrado. Con lactosuero diluido, es el que presenta una mayor variación del pH, con respecto a los otros inóculos en las mismas condiciones, mostrando una baja capacidad de amortiguación.

4.2 Inóculo lodo activo

Se observó generación de Metano en las tres concentraciones en estudio pero los volúmenes obtenidos fueron menores, observándose nuevamente una relación inversa entre concentración de lactosuero y generación de metano.

La mezcla con lactosuero al 25v/v%, fue el que obtuvo la más baja generación de Metano con respecto a los otros inóculos en las mismas condiciones. La mezcla al 50% de lactosuero, logró generar menor cantidad que la condición anterior, pero generó más que los otros inóculos en las mismas condiciones. Finalmente no hay una generación significativa de biogás con lactosuero concentrado.

Con respecto al pH del sistema, este inóculo, no logró una capacidad de amortiguación frente al lactosuero, siendo el inóculo mas acidificado. La explicación radica en la elevada concentración de sólidos volátiles (SV). Esto provoca una acumulación de ácidos volátiles en el sistema, prolongando la etapa ácida y bloqueando la etapa metanogénica.

Además, este inóculo bacteriano fue extraído de un reactor anaeróbico de PTAS en pleno funcionamiento, a diferencia del granular que es un inóculo con un mayor tiempo de contacto con la materia orgánica y que ya está estabilizado. Por estas razones se decidió descartar la medición de degradación de lactosuero.

4.3 Inóculo lodo granular

Con lodo granular nuevamente se observó una inhibición de la generación de Metano a medida que la carga orgánica de lactosuero se aumentó. Resultado que se traduce en una tendencia en los tres inóculos usados.

En este ensayo no se observó generación de metano con la dilución de lactosuero al 50%, aunque en experimentos anteriores se produjo, menos que la concentración al 25%v/v, pero más que la concentración al 100%.

En esta ocasión el resultado se puede atribuir a fallas técnicas, como fuga al momento de medición y al sello de la mezcla, pudiéndose haber generado un medio oxigenado.

Al analizar la degradación de sustrato, con este inóculo se obtuvo la mayor degradación que experimenta el lactosuero llegando a un 31,91 % y un 30,72% de abatimiento de la DQO al 25%v/v y al 100%v/v respectivamente.

Con respecto al pH del sistema, este inóculo granular presenta la menor variación de pH de salida con respecto al ajustado en la entrada, logrando mantenerse a un pH 6,0 con lactosuero concentrado, cosa que no fue posible con los otros dos inóculos. En las tres concentraciones se mantuvo dentro del rango neutro, mostrando una alta capacidad de amortiguación frente a la acidificación del sistema.

4.4 Actividad metanogénica específica de los inóculos

El inóculo C, correspondiente a lodo granular, fue un lodo de mayor estabilidad, pues en el seguimiento realizado a este, se observa que fue el único capaz de generar un máximo, a diferencia de los otros inóculos utilizados (Fig.23). Esto puede explicarse en términos de una mayor población microbiana por el mayor tiempo de contacto que obtuvo en el reactor anaeróbico de PTAS, en tanto que el lodo activo, como dice el nombre, fue obtenido de un reactor aun en funcionamiento, por esto tiene una estabilidad mucho menor. Finalmente el purín es un inóculo fresco cuya población microbiana anaeróbica aún no se ha desarrollado.

4.5 Lavado de biogás, cuantificación de Metano

Con respecto a la metodología, utilizar la botella de Mariotte para lavar el biogás y obtener una medición lo más aproximada a lo que sería la cantidad de Metano, resultó, pues las muestras de análisis de gas fueron muchas, encareciendo los costos de la investigación. El lavado que se realizó fue con una solución de Hidróxido de Sodio al 15%, asegurándose siempre antes de cada medición que el pH de esta solución estuviese sobre 12. En ella hubo cambio de color y bajas de pH, por lo que, existe un indicio que sí atrapó los gases indeseados en la medición, como el H_2S y el CO_2

Resultado ser un método económico y de fácil aplicación. Aunque, en este tipo de metodologías cualitativas, el Hidrógeno es un interferente de la medición, debido a que es uno de los productos gaseosos que conforman el biogás. Es un gas diatómico apolar y simétrico, pudiendo ser que la medición obtenida fuera Hidrógeno o Metano, o bien, una mezcla de ambos.

5. CONCLUSIONES

- El potencial de generación de biogás para las empresas del sector, está apuntada a la autogeneración de energía, con respecto a la energía eléctrica que pueden cogenerar y la relación con lo que gastan.
- La generación total de biogás, sumando todos los ensayos con lactosuero fue de 5123 mL con inóculo granular 5709 mL con inóculo de purín de bovino y sólo 2152 mL con inóculo activo.
- Se recomienda analizar cromatográficamente la composición relativa del biogás acumulado, para evaluar el porcentaje de Metano en cada uno de ellos.
- El lactosuero concentrado no logró producir biogás por sí solo, pues necesita de la adición de poblaciones microbianas.
- El tipo de inóculo bacteriano influye significativamente en la generación de biogás a partir de lactosuero. No debe contener un exceso de sólidos volátiles.
- Mientras mayor es la concentración del lactosuero menor es la producción de biogás. La mayor generación de biogás se obtuvo a una concentración de 25% v/v de lactosuero con los tres inóculos.
- Se logró generar biogás a partir de lactosuero concentrado al 100%, utilizando como inóculo lodo granular proveniente de una planta de tratamiento de aguas servidas.
- El pH del sistema es un punto importante, debido a que una variación hacia la acidez de este, reduce la capacidad de amortiguación y eventualmente en un

reactor piloto sería dependiente de un controlador de pH y de una solución alcalina como un insumo correctivo.

- El inóculo granular proveniente de PTAS, se recomendaría para utilizar en un reactor continuo ya que con este ensayo, se mantuvo el pH del medio para las tres concentraciones de lactosuero.
- La concentración de lactosuero, es un factor a considerar al momento de realizar una digestión anaeróbica, debido a que en base a este parámetro, se realizan los cálculos hidráulicos para un diseño tecnológico de abatimiento de materia orgánica de un RIL.
- El tamaño del granulo presente en el inóculo granular permitiría aumentar el tiempo de retención microbiano, aumentando el área de contacto entre los microorganismos y el lactosuero, aumentando la producción de biogás.
- Aplicar la digestión anaeróbica al lactosuero concentrado, da un valor agregado a esta industria y bajaría los costos de producción, por concepto de autogeneración de energía limpia. Además, contribuye a una producción sostenible.
- El ensayo de degradabilidad resultó ser una herramienta económica, para la determinación del tipo de inóculo a utilizar en un reactor continuo y el efecto de la concentración de lactosuero.

6. REFERENCIAS

- Cairó J.J. y París J.M., 1988. Microbiología de la digestión anaerobia, metanogénesis: Depuración anaerobia de aguas residuales. Eds. F. Fernández – Polanco, P.A. García, S. Hernando. Universidad de Valladolid. España, página 41-51.
- Castell X., 2012. Tratamiento y valorización energética de residuos. Ediciones Diaz de Santos S.A. Madrid, página 745.
- Chamy R. y Vivanco E. 2007. Potencial de biogás. Identificación y clasificación de los distintos tipos de biomasa disponibles en Chile para la generación de biogás. Elaborado para Comisión Nacional de Energía. Santiago de Chile, páginas 45-65
- CONAMA- Región Metropolitana, 1998. Guía para el control y la prevención de la contaminación industrial: Fabricación de productos lácteos. Elaborado por CONAMA. Santiago de Chile, página 6-8
- Consejo Nacional de Producción Limpia, 2012. Guía de mejores técnicas disponibles para la valorización del alperujo en la obtención de energía calórica para las operaciones de las plantas olivícolas. 16p
- Cortés I. y Montalvo S., 2010. Aguas: Calidad y contaminación. Un enfoque Químico Ambiental. Elaborado por Fundación CENMA. Santiago de Chile, página 147

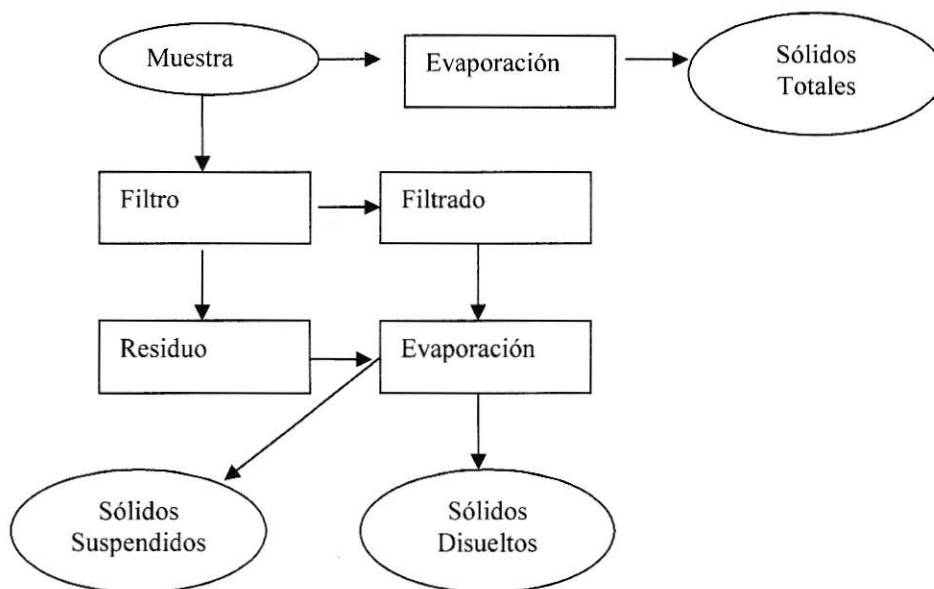
- Bertin L., Grilli S., y otros, 2013. Innovative two-stage anaerobic process for effective codigestion of cheese whey and cattle manure. *Bioresource Technology*. Rev.128: 779–783
- Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO). 1985. Manual de elaboración de quesos. Equipo Regional de Fomento y Capacitación en Lechería para América Latina.
- Field, J., Sierra, A. y Lettinga, G. 1988. Ensayos anaeróbicos. Proc of 4th Symp. On Wastewater Anaerobic Treatment. Valladolid. España, página 52-81.
- IDAE. 2007. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Energías Renovables; Energía de la Biomasa; Digestores Anaeróbicos. Madrid. 48p.
- Marín M., 2011. Purificación biológica de biogás. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile, 53p
- M. Henze y M.P. Harremoes, 1983. Anaerobic treatment of wastewater in fixed film reactors – a literatura review. *Water Science Technology*. Rev.15:1-10.
- Montalvo S. y Guerrero L., 2003. Tratamiento anaerobio de residuos; Producción de biogás. Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, 413p
- M.P. Bryant, 1974. Nutritional features and ecology of predominant anaerobic bacteria of the intestinal tract. *The American Journal of Clinical Nutrition*. Rev.27: 1313-1319.
- Vasala A., Panula J. y Neubauer P., 2005. Efficient lactic acid production from high salt containing dairy by-products by *Lactobacillus salivarius* ssp. *Salicinius*

with pre-treatment by proteolytic microorganisms .Journal Biotechnology.
Rev.117: 421-431.

- Viogaz S.A, 2012. Revista “Informa. El sabor agropecuario”. Conversión de suero lácteo a biogás, un potencial invaluable. Universidad Tecnica Nacional de Atenas, Costa Rica. Rev.60: 41.

7. ANEXOS

7.1 Metodología utilizada en el cálculo de sólidos totales y sólidos volátiles.



7.1.1 APHA, 2540 B

Sólidos Totales: Material residual que queda en una capsula después de la evaporación de una muestra de agua y subsiguiente secado, bajo condiciones especificadas. Es la suma de los sólidos suspendidos y sólidos disueltos de la muestra.

Homogenice la muestra y transfiera a la placa de petri previamente masada una porción de 20 mL de muestra. Evapore la humedad de la muestra utilizando una plancha calefactora hasta que se forme una costra en ella. Deje enfriar la capsula y registre su masa.

7.1.2 APHA, 2540 E

Sólidos volátiles: La pérdida de peso por ignición se llama "sólidos volátiles." Las determinaciones de fijos y sólidos volátiles no distinguen con precisión entre la materia inorgánica y orgánica, porque la pérdida de ignición no se limita a la materia orgánica. Incluye las pérdidas por descomposición o volatilización de algunas sales minerales.

Llevar el residuo producido por el Método 2540 B, hasta peso constante en un horno de mufla a una temperatura de 550 ° C. Encender un filtro de fibra de vidrio en blanco junto con las muestras. Deje el plato o disco de filtro enfriar parcialmente en el aire hasta que

la mayor parte del calor se ha disipado. Pesar plato o disco tan pronto como se haya enfriado para equilibrar la temperatura. Repita el ciclo de encendido, refrigeración, desecación, y con un peso hasta que se obtenga un peso constante o hasta que el cambio de peso es inferior al 4% o 0,5 mg, lo que sea menor. Analizar al menos 10 % de todas las muestras en duplicado.

7.2 Metodología para la determinación de la DQO

El siguiente test, utiliza como principio la fotometría. Cuando se transmite un rayo de luz a través de una solución coloreada, el rayo pierde intensidad. Una parte es absorbida y otra se transmite. Según cual sea la sustancia que se analiza, la absorción tiene lugar a determinadas ancho de banda (λ).

Esta intensidad se puede medir, mediante la tramitancia, que se expresa en la siguiente ecuación

$$T = \frac{I}{I_0}$$

I_0 = Intensidad inicial de la luz

I = Intensidad de la luz transmitida

Otra forma de expresarla, es mediante la absorvancia que se relaciona con la tramitancia pero a su vez directamente con la concentración de la sustancia

$$A = -\log T$$

$$A = \varepsilon \cdot c \cdot d$$

A = Absorvancia

T = Tramitancia

ε = Absortividad Molar [L/mol·cm]

c = Concentración del analito [mol/L]

d = Longitud del paso de la cubeta [cm]

El equipo Spectroquant NOVA 60, utiliza cubetas, Merck que vienen con los reactivos necesarios para realizar el análisis. El principio básico, es que por medio de reactivos el componente de una muestra a analizar se convierte en un compuesto coloreado que a cierto ancho de banda emite una señal en el equipo. La muestra se oxida con una solución sulfúrica caliente de dicromato potásico y sulfato de plata como catalizador. Los cloruros son interferentes, por lo que son enmascarados con sulfato de mercurio, luego se determina fotométricamente la concentración de iones Cr^{+3} en el equipo, que es proporcional a las sustancias orgánicas oxidables.

La reacción general es la siguiente,



Técnica:

- Agitar por balanceo la cubeta de reacción para poner en suspensión el sedimento.
- Verter 1ml de la muestra cuidadosamente sobre el reactivo en la pared interna de la cubeta de reacción mantenida inclinada.

- Cerrar firmemente la cubeta con tapa roscada.
- Tomar la cubeta solo por la tapa.
- Mezclar vigorosamente el contenido de la cubeta.
- Calentar la cubeta durante 120 minutos a 148°C en el termorreactor precalentado.
- Sacar del termorreactor la cubeta caliente y colocarla en un soporte para tubos de ensayo para que se enfríe.
- Al cabo de 10 min agitar la cubeta por balanceo y para enfriarla a temperatura ambiente volver a colocarla en el soporte para tubos de ensayo (tiempo de enfriamiento mínimo 30 minutos)
- Medir en el fotómetro, el cual entregará una medición en mg O₂/L.

7.3 Cálculos

7.3.1 Producción de metano para el abatimiento de 1Kg de DQO

Se calcula el volumen que ocupa un mol de metano en condiciones mesofílicas, ocupando la ley de gases ideales

$$PV = nRT$$

Donde,

$n = 1$ mol de CH₄

$R =$ Constante de los gases ideales $0.082057 \frac{L \cdot atm}{mol \cdot K}$

$T =$ Temperatura en el rango mesofílico de 35° C, expresada en Kelvin

$P =$ Presión en atmosferas

$V =$ Volumen en Litros

$$V = \frac{1 \text{ mol} \cdot 0,082057 \frac{\text{L} \cdot \text{atm}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 308,15 \text{ K}}{1 \text{ atm}}$$

$$V = 25,29 \text{ L de } CH_4$$

Entonces, sabemos que 1 mol de CH_4 tiene 64g de DQO, por lo tanto

$$\frac{25,29 \text{ L de } CH_4}{1 \text{ mol de } CH_4} \cdot \frac{1 \text{ mol de } CH_4}{64 \text{ g DQO}} = 0,39 \text{ L de } CH_4/\text{g DQO}$$

Por lo tanto,

$$\frac{0,39 \text{ L de } CH_4}{1 \text{ g DQO}} \cdot \frac{1000 \text{ g DQO}}{X} = 2564,1 \text{ L de } CH_4 \approx 2,5 \text{ m}^3 \text{ de } CH_4$$

7.3.2 Producción de metano para una empresa promedio del sector

lácteo menor

De acuerdo a lo redactado en la introducción, el lactosuero corresponde al 90% del volumen de la leche, por lo tanto, de la producción promedio de una empresa del sector lácteo se puede calcular la producción de lactosuero que tendrá,

$$100 \text{ m}^3 \cdot 0,9 = 90 \text{ m}^3 \text{ de lactosuero}$$

Este volumen de lactosuero, tiene en promedio unos $50 \text{ gO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ de DQO, de tal forma que del ejemplo anterior se sabe que

$$\frac{0,39 \text{ L de } CH_4}{1 \text{ g DQO}} \cdot \frac{X}{50 \text{ g DQO}} = 19,5$$

Así, de forma diaria se generarían unos

$$19,5 \text{ m}^3 \text{ de } CH_4 \cdot 90 \text{ m}^3 \text{ de lactosuero} = 1755 \text{ m}^3 \text{ de metano.}$$

7.3.3 Potencial energético para el sector lácteo menor

El sector lácteo menor, el año 2012, utilizó 295.962.709 Litro de leche para su producción de queso y quesillo, generándose unos 266.366.438 Litros de lactosuero,

siguiendo los ejemplos anteriores es posible calcular la generación de gas metano de aproximadamente 5.261.957 m³ de biogás. Este volumen de combustible, tiene un determinado porcentaje de metano en el, el cual le proporcionará el poder calorífico necesario para ser cogenerado. Para estimar la energía eléctrica generada a partir de biogás se deben considerar los siguientes factores:

- Contenido de metano (%).
- Poder calorífico (Kcal/m³) biogás
- Energía recuperada de los gases de combustión (%).
- Energía disponible en el agua de alta temperatura (%).
- Energía disponible en el agua de baja temperatura (%).
- Rendimiento caldera de recuperación (%).
- Rendimiento de los intercambiadores de calor (%).
- Eficiencia motor de cogeneración (%).

7.3.3.1 Energía térmica

La energía térmica recuperada de los gases del motor de combustión se obtiene:

$$E_G = m^3 \text{ biogas} \cdot A \cdot B \cdot E$$

Donde:

E_G = Energía de gases.

A = Poder calorífico del biogás (Kcal/m³), al 60% de metano

B = Energía recuperada de los gases de combustión (%).

E = Rendimiento caldera de recuperación (%).

Utilizando los datos de producción del año 2012,

$$E_G = 5.261.957 \cdot 5141,4 \text{Kcal} \cdot m^{-3} \cdot 0,318 \cdot 0,65 \cdot \frac{1 \text{Kwh}}{860,11 \text{Kcal}} = 6501524 \text{ Kwh}$$

La energía disponible en el agua de alta temperatura se calcula mediante la siguiente expresión:

$$E_{AT} = m^3 \text{ biogas} \cdot A \cdot C \cdot F$$

Donde:

E_{AT} = Energía agua de alta temperatura.

A = Poder calorífico del biogás (Kcal/m³).

C = Energía disponible en el agua de alta temperatura (%).

F = Rendimiento de los intercambiadores de calor (%).

Utilizando los datos de producción del año 2012,

$$E_{AT} = 5.261.957 \cdot 5141,4 \text{Kcal} \cdot m^{-3} \cdot 0,197 \cdot 0,98 \cdot \frac{1 \text{Kwh}}{860,11 \text{Kcal}} = 6072492 \text{ Kwh}$$

7.3.4 Cálculo de la actividad metanogénica

Se seleccionó la pendiente mayor de los gráficos que muestran las curvas de biogás acumulado.

La siguiente tabla muestra utilizando la ecuación 9,

$$AME \left(\frac{gDQO_{CH_4}}{gSSV} \cdot t \right) = \frac{\frac{dV_{CH_4}}{dt}}{X_0 V_R f_1} \quad \text{Ec. 9}$$

$\frac{dV_{CH_4}}{dt}$: Volumen de metano (ml)

t: Tiempo (día)

X_0 : Concentración del Lodo (g SSV/L)

V_R : Volumen útil del reactor (L)

f_1 : Factor de conversión (gDQO·ml_{CH₄}⁻¹)

Los resultados obtenidos, se muestran en la siguiente tabla.

Ensayo	dV/dt [mL CH ₄]	f ₁ [g DQO/mL CH ₄]	V _r [L]	X ₀ [SV/L]	AME
B_A	0,0	394	0,4	65,5	0
C _{A,1}	292,5	394	0,4	65,5	0,0283
C _{A,2}	31,1	394	0,4	65,5	0,00117
C _{A,3}	0,0	394	0,4	65,5	0
B_B	189,5	394	0,4	821,5	0,00147
C _{B,1}	157,5	394	0,4	821,5	0,00122
C _{B,2}	43,4	394	0,4	821,5	0,00334
C _{B,3}	0,0	394	0,4	821,5	0
B_C	206,4	394	0,4	66,3	0,0197
C _{C,1}	150,0	394	0,4	66,3	0,0143
C _{C,2}	0,0	394	0,4	66,3	0
C _{C,3}	137,6	394	0,4	66,3	0,0132