



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS VETERINARIAS Y PECUARIAS

ESCUELA DE CIENCIAS VETERINARIAS

**ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA
GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE PURINES MEDIANTE
BIODIGESTORES ANAEROBIOS**

FRANCISCO MANUEL LAGOS SUSAETA

Memoria para optar al Título

Profesional de Médico Veterinario

Departamento de Fomento de la Producción Animal

PROFESOR GUÍA: MARIO MAINO MENÉNDEZ

SANTIAGO, CHILE

2013



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS VETERINARIAS Y PECUARIAS

ESCUELA DE CIENCIAS VETERINARIAS

**ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA
GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE PURINES MEDIANTE
BIODIGESTORES ANAEROBIOS**

FRANCISCO MANUEL LAGOS SUSAETA

Memoria para optar al Título

Profesional de Médico Veterinario

Departamento de Fomento de la Producción Animal

PROFESOR GUÍA: MARIO MAINO MENÉNDEZ NOTA: FIRMA:

PROFESOR CORRECTOR: JUAN IGNACIO NOTA: FIRMA:

EGAÑA MORENO

PROFESOR CORRECTOR: MARÍA SOL NOTA: FIRMA:

MORALES SILVA

SANTIAGO, CHILE

2013

A mis padres, Rodrigo Lagos Gómez y Pilar Susaeta Urrutia y hermanos Rocío y Diego Lagos Susaeta, mis amigos y hermanos por elección, y a todas las personas que me acompañaron durante mis años de Universidad. En forma muy especial, a cada uno de los profesores que participaron en mi proceso de formación, corresponsables todos de mi formación profesional en sus distintas etapas y ámbitos. A mi profesor guía Dr. Mario Maino Menéndez y mis profesores correctores, colaboradores y por sobretodo consejeros Dra. María Sol Morales Silva y Dr. Juan Ignacio Egaña Moreno.

También le dedico este trabajo a toda persona que lo lea, a seguir trabajando porque la vida en nuestro país y el mundo sea cada vez más justa y amable con nuestro planeta.

I. Índice de capítulos

1. Resúmenes ejecutivos.....	1
2. Introducción.....	4
3. Revisión Bibliográfica.....	7
3.1. Realidad lechera nacional.....	7
3.2. Generación de purines en la industria lechera.....	7
3.3. Biodigestión anaeróbica.....	11
3.4. Biogás.....	12
3.5. Biodigestores anaerobios.....	14
3.5.1.Generalidades.....	14
3.5.2.Sustratos de los biodigestores.....	14
3.5.3.Tipos de biodigestores.....	15
3.5.4.Productos de los biodigestores.....	17
3.5.5.Limitantes de los biodigestores.....	19
4. Objetivos.....	23
4.1. Objetivo General.....	23
4.2. Objetivos Específicos.....	23
5. Material y métodos.....	24
6. Resultados.....	25
6.1. Principales aspectos de la generación de biogás en lecherías.....	25
6.2. Espacios de desarrollo tecnológico que habilita el biogás.....	27
6.3. Experiencias de biogás en Chile.....	29
6.4. Análisis del beneficio de los sistemas de biogás para los productores lecheros.....	39
6.4.1.Identificación del segmento de posibles beneficiarios.....	39
6.4.2.Producción de purines en los sistemas lecheros.....	40
6.4.3.Capacidad energética de los purines en sistemas de biogás.....	41
6.4.4.Posibilidades de habilitación de tecnologías de los sistemas de biogás.....	43
6.5. Modelos de biodigestores.....	50
7. Conclusiones.....	56
8. Discusión.....	58
9. Bibliografía.....	60

II. Índice de tablas

Tabla Nro. 1: Principales parámetros de los diferentes modelos de biodigestores.....	17
Tabla Nro. 2: Desaparición de microorganismos entéricos durante la digestión anaeróbica.....	18
Tabla Nro. 3: Efecto de la concentración de algunas sales en los biodigestores.....	22
Tabla Nro. 4: Número de explotaciones lecheras y número de vacas lecheras a nivel nacional.....	39
Tabla Nro. 5: Cálculo de producción de purines en un predio de tipo pastoreo con 100 vacas en ordeña promedio año.....	41
Tabla Nro. 6: Contenido energético de los desechos de varios animales.....	42
Tabla Nro. 7: Litros de leche por vaca a nivel nacional.....	43
Tabla Nro. 8: Índices de requerimientos energéticos para la refrigeración de leche.....	44
Tabla Nro. 9: Cantidad de vacas estabuladas permanentemente o en pastoreo, volumen total del Biodigestor con 60 días de retención, versus producción de biogás y electricidad.....	46
Tabla Nro. 10: Potencial eléctrico del sector lechero nacional.....	48
Tabla Nro. 11: Principales variables involucradas, en sus cantidades recomendadas, en sistemas de digestión anaerobia para diferentes especies animales.....	49

III. Índice de ilustraciones

Ilustración Nro. 1: Esquema de la sustentabilidad en la cadena de producción de biogás.....	6
Ilustración Nro. 2: Vista aérea de planta de biogás Los Ángeles, HBS Energía.....	30
Ilustración Nro. 3: Residuos de cosecha y estanques de hidrólisis.....	30
Ilustración Nro. 4: Piscinas de acumulación de purines.....	31
Ilustración Nro. 5: Estanque de acumulación de agua caliente, los dos fermentadores y estanques de hidrólisis (de izquierda a derecha).....	31
Ilustración Nro. 6: Canales de conducción de los purines desde los corrales de alimentación de las vacas.....	34

Ilustración Nro.7: Corrales de alimentación con purines acumulados y sistema de barrido de estos.....	34
Ilustración Nro.8: Estanque de pre mezcla y fermentador al fondo.....	35
Ilustración Nro.9: Acopio de fase sólida del digestato.....	35
Ilustración Nro.10: Fase líquida del digestato.....	36
Ilustración Nro.11: Planta de biogás “Quebrada Honda”, rebaño lechero de 300 bovinos, producción de biofertilizante aplicado a praderas y 40 a 70 kW/día.....	37
Ilustración Nro.12: Planta de biogás “Chacra Puñadi”, rebaño lechero de 20 bovinos, producción de biofertilizante aplicado a praderas y 5 a 10 kWh/día suficientes para realizar ordeña 100% a biogás, aprovechamiento de calor mediante caldera.....	38
Ilustración Nro.13: Planta de biogás “Fundo El Coihue”, rebaño lechero de 900 bovinos, producción de biofertilizante aplicado a praderas y 40 a 70 kWh/día.....	38
Ilustración Nro. 14: Esquema básico de un biodigestor de flujo continuo.....	51
Ilustración Nro. 15: Biodigestor de flujo continuo.....	51
Ilustración Nro. 16: Biodigestor de flujo continuo para 50 vacas, Puerto Octay.....	52
Ilustración Nro. 17: Biodigestor flujo continuo para 24 vacas, Osorno.....	52
Ilustración Nro. 18: Esquema de funcionamiento de un biodigestor de mezcla completa.....	54
Ilustración Nro. 19: Esquema de funcionamiento de un biodigestor de tipo laguna cubierta.....	55
Ilustración Nro. 20: Biodigestor de tipo laguna cubierta.....	55
Ilustración Nro. 21: Biodigestor de tipo mezcla completa.....	55

IV. Índice de gráficos

Gráfico Nro. 1: Producción de electricidad (kW/día) por cantidad de vacas en ordeña según horas de patio al día.....	47
--	----

1. Resúmenes ejecutivos.

a) Resumen

Los sistemas productivos del mundo viven un desafío importante de sustentabilidad y giro hacia tecnologías más limpias. La digestión anaerobia es una tecnología que puede atenuar el impacto que producen los sistemas pecuarios en el medio, además de generar un nuevo recurso, el biogás, junto con otros beneficios ambientales, económicos y sociales. Por tales razones se desarrolló el presente trabajo, que tuvo por objetivo describir la situación actual del uso de purines para la generación de biogás mediante digestión anaeróbica, y generar modelos de biodigestores anaerobios aplicables a lecherías en Chile.

En base a revisión bibliográfica y visita de experiencias, se recabaron aspectos teórico-prácticos de generación de purines lecheros; digestión anaerobia de purines con el biogás como principal producto; biodigestores anaerobios; y sobre proyectos de biodigestores anaerobios en lecherías chilenas y en un sistema de bovinos de engorda. La biodigestión anaerobia es un proceso bacteriano que logra rescatar cerca del 65% de la energía contenida en los purines, siempre que los parámetros sean manejados adecuadamente, especialmente la temperatura y el pH, además de limitantes como el sulfuro de hidrógeno, oxígeno, fibra y espuma. El principal producto de la digestión anaerobia es el biogás, el que tiene una constitución similar al gas natural. Comúnmente se establecen 4 tipos de biodigestores anaerobios: lagunas cubiertas, mezcla completa, flujo continuo y película fija. Para la elección del modelo de biodigestor se deben considerar los volúmenes de purín producidos, la cantidad de sólidos contenida y el volumen de biogás a generar. Además, los distintos modelos tienen distintas eficiencias y demandas externas de mezcla, temperatura, etc. En Chile existen alrededor de 6 plantas de biogás funcionando en base a purines, lo que denota una baja implementación nacional de estos sistemas, atribuido principalmente a: la falta de información en cuanto a los beneficios potenciales, escasos elementos de fomento, alta inversión requerida, dificultades técnicas y falta de profesionales especialistas.

En base a recopilación bibliográfica y entrevistas a profesionales, se identificaron posibles beneficiarios de sistemas de digestión anaerobia de purines en relación a los volúmenes y capacidad energética de los purines producidos, y tecnologías posibles de implementar gracias a la generación del biogás, usado como sustrato energético para las lecherías. Mediante la combustión del biogás es posible generar calor, frío, energía mecánica y electricidad. La industria lechera presenta un gran potencial en este aspecto, ya que por la energía contenida y los grandes volúmenes de purines producidos, se puede suplir hasta el 100% de requerimientos energéticos como la ordeña mecánica

y la refrigeración de la leche. El producto más interesante del biogás es la electricidad, para la cual es necesario analizar la factibilidad de generación dadas las posibilidades de inversión, y los volúmenes de purín generados.

Toda la información y experiencia sirvió como sustrato para la generación de dos modelos teóricos de biodigestores anaerobios para lecherías en Chile; uno para pequeñas lecherías y otro para lecherías de tamaño mediano, especificando sus características y requerimientos, así como los modelos de biodigestores a usar, productos generados e inversión aproximada.

b) Abstract

Production systems in the world live an important sustainability challenge and a shift to cleaner technologies. Anaerobic digestion is a technology that can reduce the impact that livestock systems produce in the environment and generate a new resource, biogas, along with other environmental, economic and social benefits. For these reasons the aim of this work is to describe the current use of manure to generate biogas through anaerobic digestion, and generate models of anaerobic digesters applicable to dairies in Chile.

Based on literature review and site visits some theoretical and practical aspects were collected: dairy manure generation; anaerobic digestion of manure with biogas as the main product; anaerobic digesters; and anaerobic digesters projects in Chilean dairies and in one cattle feedlot system. The anaerobic digestion is a bacterial process that rescues about 65% of the energy contained in the slurry if parameters are properly managed, especially temperature and pH, as well as limitants such as hydrogen sulfide, oxygen, fiber and foam. The main product of anaerobic digestion is biogas, which has similar constitution to natural gas. There are commonly established 4 types of anaerobic digesters: covered lagoons, complete mix, plug flow and fixed film. For choosing the digester model there are factors to consider including volume of manure produced, amount of solids contained and the volume of biogas to be generated. Furthermore, models differ in efficiencies as well as in external demands of mixing, temperature, etc. In Chile there are about 6 operating biogas plants based on manure, which indicates a low national implementation of these systems mainly attributed to lack of information about its potential benefits, scarce promotion initiatives, high investment required, technical difficulties and lack of specialists.

Based on bibliography and interviews with professionals it has been identified potential beneficiaries of anaerobic digestion systems of manure in relation to the volume and energy of the manure produced and possible technologies to be implemented by generating biogas, used as

substrate energy for dairies. The combustion of biogas can generate heat, cold, mechanical power and electricity. The dairy industry has great potential in this regard because of the energy content and the large volumes of manure produced, which can supply up to 100% of energy requirements of mechanical milking and milk cooling. The most interesting product of biogas is electricity, for which it is necessary to analyze the feasibility of generation taking into account investment opportunities and the volumes of manure generated.

All information and experience served as a substrate for the generation of two theoretical models of anaerobic digesters for dairies in Chile; one for small dairy farms and another for medium sized dairies, specifying their characteristics, requirements and biodigester models to use as well as products generated and an approximation of required investment.

2. Introducción

La sociedad actual y en forma especial la agricultura, se enfrentan a un desafío muy importante, suplir la creciente demanda de bienes básicos bajo un nuevo paradigma de desarrollo y producción; la producción ecológica y socialmente sustentable.

Es bien sabido que la especie humana extrae del planeta una cantidad de recursos que este no puede renovar a la misma velocidad, así como no puede amortiguar de buena manera los desechos del paso de las personas por la tierra, por la rapidez con que se generan y la naturaleza de estos mismos.

Surgen entonces como desafíos esenciales de este nuevo enfoque de desarrollo, el crecimiento poblacional y la producción sustentable, acompañados siempre de la realidad de una población humana aún en constante crecimiento, además del permanente aumento en las restricciones en la disponibilidad y calidad de recursos naturales, bajo un permanente aumento de la demanda energética, todo a la sombra del cambio climático que sigue avanzando como consecuencia del comportamiento en sociedad (Trigo y Villarreal, 2012).

Se podría afirmar que el mundo se encuentra en la última fase del largo periodo de crecimiento y desarrollo que se inicia con el descubrimiento del petróleo, y que se está ante un punto de inflexión a partir del cual resulta necesario identificar y desarrollar nuevas estructuras que permitan continuar el sendero iniciado años atrás, buscando alcanzar los objetivos propuestos de igualdad, equidad y calidad de vida (Trigo y Villarreal, 2012).

Durante el siglo XIX las economías de muchos países estaban basadas en el carbón lo que fue variando paulatinamente hacia economías basadas en el petróleo en el siglo XX. Sin embargo, en el siglo XXI es posible un cambio desde las economías basadas en combustibles fósiles hacia economías basadas en la producción biológica, donde la agricultura se verá rejuvenecida como fuente de bioenergía y biomateriales y ya no solo en su rol tradicional como exclusiva proveedora de alimento y fibra (Parris, 2004).

De forma particular el rubro pecuario –como todo rubro productivo– debe enfrentar este desafío sorteando sus propias dificultades y aprovechando sus propias ventajas. Frente a esta realidad surgen las energías renovables no convencionales (ERNC) como una herramienta importante para la producción limpia. Y es que las ERNC en general otorgan una solución eficiente, local, independiente, sustentable y económica para el abastecimiento energético de la pequeña, mediana y gran agricultura.

Se entiende, como energías renovables a aquellas que se producen de forma continua y son inagotables a escala humana: energía solar, eólica, hidráulica, geotérmica, mareomotriz y de biomasa, entrando bajo esta última los combustibles elaborados en base a materia orgánica como el biogás (Álvaro, 2004).

La sustentabilidad de la producción bovina de leche es un tema priorizado por el Consorcio Lechero, donde participan productores lecheros, la industria y centros tecnológicos. Dentro de la sustentabilidad del negocio lechero, la mantención o el mejoramiento de las condiciones sanitarias del rebaño, la inocuidad de la producción y el cuidado del medio ambiente son fundamentales para el futuro del sector tanto en el mercado interno como para la exportación (Oltra, 2012).

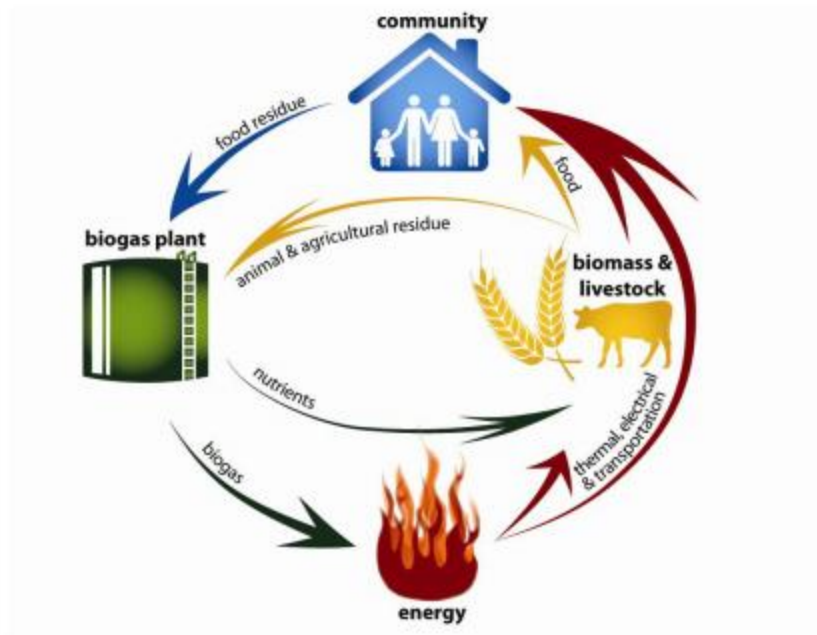
El presente trabajo pretende abordar el tema de las ERNC abocándose a un capítulo en específico como es la producción de biogás a partir de las excretas animales. La idea es elaborar un marco teórico lo suficientemente amplio al respecto y demostrar las ventajas y desventajas que tiene esta fuente de energía, específicamente en las lecherías.

Se ha elegido esta fuente de ERNC por ser la que se vincula en más aspectos con la producción animal, al ser un insumo energético para el sistema productivo cuyo origen es un desecho del mismo sistema. Los desechos de las vacas lecheras (purines, agua y restos de alimento) pueden ser llevados a un biodigestor el que por un lado generará energía para el sistema, ayudando en la obtención de este importante factor productivo, y por otro lado generará como remanente un material utilizable como fertilizante para las praderas del mismo sistema de producción, generando además otras externalidades positivas a detallar más adelante.

Otra ventaja importante de las ERNC para el ámbito rural es la capacidad de otorgar acceso a servicios básicos en zonas alejadas, otorgando electricidad, comunicación, calor, etc.

Es entonces la producción de biogás en las lecherías el principal foco del presente escrito. La idea es abordar de una forma lo más completa posible todos los aspectos en relación a su naturaleza, producción, beneficios, factibilidad, etc. La siguiente ilustración muestra en términos generales los intercambios de sustratos y productos en el ciclo de producción de biogás.

Ilustración Nro. 1: Esquema de la sustentabilidad en la cadena de producción de biogás.



Essential Consulting Oregon (2009)

3. Revisión Bibliográfica

3.1. Realidad lechera nacional

Según el VII Censo Nacional Agropecuario y Forestal del año 2007, Chile cuenta con un total de 486.534 vacas lecheras, reunidas en un total de 19.737 predios a nivel nacional. Cerca del 72% de esas vacas se encuentran concentradas en las regiones XIV y X en 9.427 predios (48% de los predios del país). Siguiendo a las anteriores regiones se encuentra la IX región con cerca del 9% de las vacas lecheras y luego la VIII con el 8,7% aprox. (Muchnik *et al.*, 2008).

En cuanto al tamaño de las lecherías, en las regiones X y XIV, y luego en la Región Metropolitana, el número de vacas por predio es bastante mayor al resto del país⁽¹⁾ con 36,9 y 25,3 vacas/predio respectivamente, mientras que a nivel nacional la cifra es de 12,6 vacas/predio (Muchnik *et al.*, 2008).

Al caracterizar el sector lechero nacional en cuanto a su tamaño por el número de vacas, se encuentra que, por lejos, la mayor cantidad de explotaciones nacionales tiene menos de 20 vacas, superando las 16.000 explotaciones (cerca del 82% de los predios lecheros de Chile). En cuanto a la tenencia de animales, los predios que tienen entre 100 y 300 vacas y los que tienen más de 300 vacas representan en conjunto la mayor masa de animales, con más de 150.000 en cada segmento (Muchnik *et al.*, 2008).

En tanto, al clasificar las explotaciones según la superficie, se puede ver que la mayor tenencia de vacas lecheras está en los predios de 200 a 500 ha, mientras que el tamaño de predio más común dentro del campo lechero está entre las 20 a 50 ha. (Muchnik *et al.*, 2008).

3.2. Generación de purines en la industria lechera

Se denomina como purines a una mezcla de fecas, orina, aguas lluvia, aguas sucias de lavado y restos de alimentos que provienen de galpones, patios de alimentación y patios de espera donde los animales son mantenidos (Navarro *et al.*, 2006).

En términos generales, la fuente de producción de purines en lecherías se puede agrupar en cuatro orígenes: a) animal, b) aguas sucias del lavado de equipos de lechería (equipo de ordeña y estanque de leche), c) agua del lavado de pisos y construcciones, d) aguas lluvia (Salazar, 2012).

⁽¹⁾ Excluyendo a la III Región, la que tiene una alta cantidad de vacas/predio, pero de las existencias totales son muy reducidas.

Lo que tiene una mayor incidencia es el uso de agua de limpieza y la contribución de aguas lluvias, representando casi la mitad del volumen de purines generados en los predios de la zona sur, dada las altas pluviometrías del sector y el uso indiscriminado de agua limpia para el lavado de pisos y construcciones. Esto hace que, en términos prácticos, los pozos de almacenamiento de purines se llenen fácilmente en este período y que los purines generados tengan muy bajos contenidos de materia seca. Estos altos volúmenes de purines generados tienen, por lo tanto, un mayor costo asociado a la energía utilizada para el bombeo del agua y almacenamiento de los mismos (Salazar, 2012).

Antecedentes dados para las lecherías de las regiones de Los Ríos y Los Lagos indican que una vaca en ordeña produce en promedio 105 litros de purín/vaca/día, variando entre 34 y 260 litros. Esta gran variación está dada por varios factores, como el manejo a nivel predial y el sistema de producción (confinado, pastoreo) (Salazar, 2012).

Es muy importante conocer los volúmenes generados y la proporción de los distintos líquidos o sólidos que contribuyen a la generación de los purines, con la finalidad de poder hacer su manejo eficiente, tendiente a una optimización, maximizando los beneficios económicos y con menor riesgo ambiental (Salazar, 2012). Para el desarrollo de los sistemas de biogás son especialmente relevantes los volúmenes y características de los purines generados, ya que la cantidad y porcentaje de sólidos de los desechos determina aspectos tan importantes como; el volumen del biodigestor, tipo de carga (continua o discontinua), hidratación previa de los purines, eficiencia de producción del biogás, entre otras.

En cuanto a los planteles de la zona central, estos se han visto en la obligación de innovar en sus procesos productivos, además de incorporar técnicas de trabajo que les permitan cumplir con las actuales normativas y exigencias ambientales, de higiene y salud ocupacional. Pese a lo anterior, en relación a los problemas o dificultades ambientales del sector, no existen normativas claras que establezcan límites y márgenes específicos al respecto, por lo que frente a acusaciones de incumplimiento se hace difícil establecer responsabilidades, disminuyendo la velocidad de avance en la adopción de medidas concordantes con estas normas poco precisas. Debido a lo anterior es que durante el 2009 se suscribió un acuerdo de producción limpia, el que agrupó a los productores de leche de la zona central (APROLECHE Centro) frente al Consejo Nacional de Producción Limpia (CPL). Dentro de los objetivos específicos declarados en este acuerdo, adquieren relevancia para el presente trabajo los siguientes puntos (APROLECHE CENTRO Y CPL, 2009):

- Mejorar el manejo y disposición de los purines y guanos de lecherías, a través de su reutilización en el predio, eliminando el 100% de las descargas a cursos superficiales.
- Disminuir los impactos que generan los pozos purineros existentes, en las aguas subterráneas.
- Mantener las poblaciones de moscas y roedores por debajo del umbral de daño económico y con el mínimo riesgo o impacto para las personas, animales y medio ambiente.

Se trata esencialmente de un acuerdo de cooperación público-privado, ceñido a la normativa vigente, que busca minimizar el impacto ambiental de los sistemas productivos lecheros de este sector (APROLECHE CENTRO Y CPL, 2009).

Muchos de los planteles lecheros de pequeños productores de la zona central, practican un sistema de pastoreo durante gran parte del año, siendo suplementadas solamente durante el invierno con concentrados y heno de alfalfa. En estos modelos productivos, las vacas acceden a la sala de ordeña 1 a 2 veces por día y nuevamente vuelven a potrero. En la zona central muchos planteles con más de 100 vacas en ordeña en promedio practican sistemas de mayor confinamiento, manteniendo a los animales estabulados todo el día, y alimentándolos principalmente con heno de alfalfa y concentrados. En estos sistemas los animales son mantenidos en pisos de tierra bajo sistemas de tipo californiano o bien en corrales con piso de cemento y cubículos de descanso individuales cuyo sustrato de cama es de arena, paja, aserrín, piso de goma, etc. Los corrales de piso de cemento en general presentan sistemas de retiro de purines diario mediante palas de goma automáticas o acopladas a tractores (SAG, 2006).

En términos de porcentajes nacionales, en la zona central del país prevalecen los sistemas bajo confinamiento en aproximadamente 80% de los casos, debido al mayor valor de los terrenos, proporción que va disminuyendo hacia el sur del territorio (Ubilla, 2012).

En los sistemas de confinamiento en patios de tierra o californiano, los animales permanecen en un patio de tierra durante gran parte del día y pasan a la sala de ordeña dos veces al día. De esta manera, la mayor parte de los residuos generados quedan en el patio, de donde son retirados por lo general una vez al año, dado que los productores prefieren no intervenir el suelo para no soltarlo y evitar mayores anegamientos durante el invierno. Se estima que la producción de guano, en estas condiciones fluctúa entre 4,0 a 5,8 m³/vaca/año. Estos guanos son aplicados directamente al campo o quedan disponibles para su venta (SAG, 2006).

Los purines producidos en la sala de ordeña, pasillos y corrales de los animales son retirados diariamente (excepto en los sistemas de confinamiento en piso de tierra) mediante alguno de los siguientes procedimientos (SAG, 2006):

- Lavado con agua de canal que van directamente a las acequias de riego y de ahí al sistema de riego predial.
- “Manguereo” y junto al agua de limpieza los residuos van a un pozo purinero, para luego derivarlos a potrero.
- Paso de una tolva por los pasillos que remueve gran parte los sólidos y líquidos, los cuales son transportados a una “guanera”, de dimensiones variables, donde se amontonan. La fracción líquida se infiltra en el suelo y el sólido es retirado en verano para ser utilizado en el campo propio y/o venta.
- Limpieza de los pasillos con pala mecánica con tractor, tres veces al día, residuos que se depositan en un pozo purinero. Se agrega agua para diluir y se bombea a una piscina acumuladora con agitador o directamente al campo.

Se estima que la producción de estiércol depositado por los animales en la sala de ordeña es de aproximadamente 25 kg. de guano/día/animal, con un 85% de humedad, es decir de 3 a 4 Kg de MS/día/animal (SAG, 2006).

En general, los productores no llevan registros, ni tienen estimaciones de la producción de purines, ni guano seco. Sin embargo, la literatura indica que la producción de estiércol de ganado lechero, bajo condiciones de la zona central de Chile, para un animal de 635 kg. es de 52,2 Kg/día, con una humedad promedio de de 87,3%, del mismo modo, la disposición en campo de estos residuos se hace sin ninguna consideración técnica, desconociéndose las tasas de aplicación por unidad de superficie (SAG, 2006).

Dentro de los efectos ocurridos por el almacenamiento y utilización de purines se mencionan los siguientes (SAG, 2006):

- Traspaso de nutrientes y coliformes fecales al agua superficial de riego.
- Lixiviación de nutrientes contenidos en los guanos almacenados en los patios de ordeña y en los sitios destinados a almacenar guanos y purines.

En consideración a los volúmenes y a la composición de los purines generados en las lecherías, muchos productores optan por reutilizarlos en el mismo predio o fuera de él, como fuentes de materia orgánica y de nutrientes, para mejorar las propiedades físicas y biológicas de los suelos y para la fertilización de cultivos y praderas. Si se aplica directamente al suelo se deben tomar en cuenta criterios ambientales y balances de masa al nitrógeno, demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y oligoelementos entre la oferta (flujo de purines) y la demanda (cultivo presente) (CPL, 2012).

3.3. Biodigestión Anaeróbica

La digestión anaerobia se puede definir como una fermentación bacteriana por medio de la cual la materia orgánica es descompuesta, en ausencia de oxígeno disuelto, para producir una mezcla de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y otros gases. La producción de metano es la parte fundamental del proceso al ser la forma en la cual queda reducida la materia orgánica, además de ser un compuesto de alto valor comercial (Expósito, 2004).

La digestión anaerobia es un proceso que ocurre naturalmente en los sitios de disposición de los residuos, sin embargo es llevado a un biorreactor para acelerar la degradación mediante la manipulación de los principales parámetros involucrados (Saucedo *et al.*, 2007).

El primer paso de la biodigestión es la hidrólisis de compuestos de alto peso molecular (proteínas, polisacáridos y lípidos) en moléculas más sencillas utilizables por las bacterias. Este proceso es llevado a cabo por exoenzimas excretadas por las bacterias fermentativas. La velocidad de la hidrólisis está directamente relacionada con el tamaño de partícula (Expósito, 2004).

En una segunda fase los materiales orgánicos simples son convertidos a ácidos grasos volátiles (AGV), alcoholes, cetonas, aldehídos, agua, formiato, acetato, dióxido de carbono e hidrogeno, todo esto por acción de las bacterias acidogénicas, disminuyendo el pH por debajo de 6,8 (Saucedo *et al.*, 2007). En la acidogénesis las bacterias toman los sustratos generados por la hidrólisis y los incorporan en sus procesos metabólicos llevando a cabo la descomposición y tomando los nutrientes que necesitan ellas mismas para mantenerse y reproducirse (Expósito, 2004). Posterior a esto, los productos resultantes de la acidogénesis son convertidos en ácido acético, formiato, hidrógeno y dióxido de carbono por la acción de las bacterias acetogénicas. En la cuarta fase también llamada metanogénica, intervienen las bacterias del mismo nombre, convirtiendo los sustratos como el acetato, hidrogeno y dióxido de carbono a metano y agua, aumentando los valores de pH a 7.4 (Saucedo *et al.*, 2007).

Intervienen en esta biorreacción variables muy importantes a considerar:

- La temperatura aumenta la velocidad y eficiencia de las reacciones hasta un límite superior de 60°C donde sufre una inhibición importante. En un rango entre los 20 – 40°C la reacción no presenta variaciones significativas (Saucedo *et al.*, 2007).
- El pH es considerado el parámetro más importante a controlar y es entendido como un modulador del sistema, puesto que influye en varios equilibrios químicos, como es el caso del equilibrio amonio/amoniaco (Saucedo *et al.*, 2007). Los indicadores más apropiados para evidenciar la inhibición de la digestión anaerobia son el incremento de los AGV, disminución en la producción de metano y el nivel de pH (Expósito, 2004).
- Los digestores anaeróbicos operan de mejor forma con menos de un 10% de sólidos, por esto la biomasa más adecuada es la de alto contenido en humedad (Saucedo *et al.*, 2007).
- Para el crecimiento y la actividad las bacterias tienen que disponer de carbono, nitrógeno, fósforo, azufre y algunas sales minerales. Una óptima relación de C/N en la digestión anaerobia debe variar entre 20 y 30. Altas relaciones C/N indican un rápido consumo de nitrógeno por los metanógenos y da como resultado bajas producciones de gas. Sin embargo, una baja relación C/N causa la acumulación de amonio y un aumento en el pH mayor a 8.5, que se vuelve tóxico para los metanógenos.

Según Wilkie (2005), los mayores beneficios de la digestión anaeróbica para las granjas lecheras son: estabilización de residuos, control de olores, producción de energía, reducción de patógenos, inactivación de semillas de malezas, conservación y mineralización de nutrientes, producción de fibra (subproducto), cumplimiento regulaciones de emisiones atmosféricas, imagen "verde" y mejor aceptación social.

3.4. Generación y usos del Biogás

El biogás consiste en una mezcla de metano (60%), dióxido de carbono (40%), vapor de agua en nivel de saturación, trazas de sulfuro de hidrógeno (100 – 7.000 ppm) y amoniaco, además puede contener hidrógeno (0 – 2%), monóxido de carbono (0 – 1%), nitrógeno (0 – 1%) y oxígeno (0 – 1%). El hidrógeno es un intermediario en el metabolismo anaeróbico y algunas bacterias pueden producir trazas de CO. (Carrillo, 2003; Wilkie, 2005).

El oxígeno es consumido por los microorganismos facultativos dejando el nitrógeno residual por tanto la presencia de oxígeno o altas cantidades de nitrógeno puede indicar una entrada accidental de aire y esto constituye un grave peligro debido al riesgo de explosiones por ser el biogás un elemento inflamable. Tanto el azufre orgánico, presente en algunos aminoácidos, como el inorgánico pueden ser reducidos a ácido sulfhídrico, un gas muy tóxico y altamente reactivo con los metales tales como hierro y cobre, originando la corrosión. Por otra parte el amonio liberado, por ejemplo durante la desaminación de las proteínas, permanece en solución (Carrillo, 2003). Debido a la corrosión mencionada los sistemas de conducción de biogás deben contar con un filtro de sulfuro de hidrógeno para evitar el perjuicio de los motores o cañerías en las cuales derivará el biogás para su uso.

El biogás se produce como resultado de la fermentación de la materia orgánica en ausencia de aire, por la acción de un grupo de microorganismos (Fernández y Saavedra, 2007). Hasta el 90% de la fracción orgánica biodegradable del estiércol puede ser estabilizado mediante tratamiento anaeróbico y convertido en gas metano (Wilkie, 2005).

Dado que el proceso utiliza un cultivo mixto de organismos ubicuos, no se requieren etapas de esterilización y la separación del biogás de la fase acuosa se produce espontáneamente. También, puesto que el metano producido es relativamente insoluble, no se acumulan en concentraciones inhibitorias en la mezcla de fermentación (Wilkie, 2005).

El biogás posee un potencial energético de 600 Btu/ft^3 es decir unos $6,2 \text{ kWh/m}^3$, suponiendo un contenido de metano de 60% aproximadamente. A modo de referencia, el contenido energético del diesel es de $10,68 \text{ kWh/m}^3$. En términos prácticos el contenido neto de energía del biogás proveniente del estiércol de una vaca lechera (descontando un 35% en la mantención de la temperatura del propio digestor) es de $18.000 \text{ Btu/vaca/día}$, es decir unos $5,27 \text{ kWh}$ de energía contenida, lo que al convertirlo en energía eléctrica se puede traducir anualmente en 385 kWh/año , suponiendo la conversión a energía eléctrica con una eficiencia de un 20%. Una lechería promedio de Estado Unidos consume 550 kWh/vaca/año , por lo que bajo un análisis simple se podría suplir el 70% de sus necesidades de electricidad con biogás (Balsam, 2006).

El biogás puede ser utilizado como cualquier otro combustible, tanto para la cocción de alimentos, en sustitución de la leña, el queroseno, el gas licuado, etc., como para el alumbrado, mediante lámparas adaptadas. Mezclas de biogás con aire, con una relación 1:20, forman un gas detonante altamente explosivo, lo cual permite que también sea empleado como combustible en motores de combustión interna adaptados. Es importante aclarar que este gas puede usarse como combustible

sólo cuando el metano se encuentra en concentraciones mayores o iguales a 50 % (Urbáez *et al.*, 2007). De la misma manera, el biogás puede ser usado como combustible para generar calor, frío y electricidad (Balsam, 2006), como también para operar máquinas agrícolas y bombear agua (Fernández y Saavedra, 2007).

3.5. Biodigestores Anaerobios

3.5.1. Generalidades

Los biodigestores anaerobios (o digestores anaeróbicos) constituyen una buena solución a la dependencia energética y la contaminación de fuentes de agua; por un lado brindan un sistema para el tratamiento de aguas residuales (aguas verdes), previo a su utilización como fertilizante en los potreros y, por otra parte, durante el proceso de descomposición, generan un gas con altos contenidos de metano, lo que posibilita su uso como fuente de energía, recirculando el carbono en el sistema de producción lechero y generando como externalidad positiva la posibilidad de calentar agua y generar electricidad para el predio (Viquez, 2009). Producto de la digestión controlada que generan los biodigestores, se obtiene energía y efluentes enriquecidos en su calidad fertilizante, todo bajo la normativa medioambiental vigente, teniendo además la gran ventaja de ser posibles de construir, operar, mantener y controlar en zonas rurales. Los biodigestores dan así un valor agregado a los residuos de la explotación agroindustrial (Urra, 2009).

El efluente de la digestión –también llamado lodo estabilizado o digestato- está compuesto por diversos productos orgánicos e inorgánicos y se puede utilizar en la fertilización de suelos, con excelentes resultados. La aplicación del efluente al suelo actúa como mejorador de las características físicas, facilitando la aireación, aumentando la capacidad de retención de humedad, la capacidad de infiltración del agua y la capacidad de intercambio catiónico. Además actúa como fuente de energía y nutrientes para el desarrollo de núcleos microbianos que mejoran la solubilidad de los compuestos minerales del suelo (Metcalf *et al.*, 2003).

3.5.2. Sustratos de los Biodigestores

Para maximizar la producción de biogás, muchos digestores en Europa y Estados Unidos realizan una co-digestión de otros elementos como desechos de la industria de alimentos y otros desechos orgánicos e incluso cultivos especialmente destinados a la biodigestión. La co-digestión representa una excelente oportunidad para ayudar a una producción basal de biogás por parte de los digestores, además de aumentar la producción de biogás generada (Shelford, 2012). La principal ventaja de la co-digestión radica en el aprovechamiento de la sinergia de las mezclas, compensando las carencias

de cada uno de los sustratos por separado. Este efecto puede deberse a un aumento de la biomasa activa, resultando en una mayor resistencia a fenómenos de inhibición. También las partes inorgánicas de algunos de estos co-sustratos, como es el caso de las arcillas y los compuestos de hierro, han mostrado un efecto positivo frente a los procesos de inhibición por amonio o ácido sulfhídrico (Vidal *et al.*, 2009).

De esta manera, los sustratos susceptibles de usar en un sistema de digestión anaerobia podemos clasificarlos en (Carrillo, 2003; Vidal *et al.*, 2009):

- Residuos de origen animal: Purín de vacunos, cerdos, pavos, pollos, etc., camas de aves, desechos de matadero (sangre, vísceras), desperdicios de pesca, restos de lana y cuero, desechos de establos (estiércol, orina y paja).
- Residuos de cosechas: rastrojo, ensilaje y grano de maíz u otros cultivos, malezas, paja, maloja de caña de azúcar.
- Residuos agroindustriales: tortas de oleaginosas, bagazo, salvado de arroz, desechos de tabaco, semillas, desperdicios de procesamiento de hortalizas y frutas, residuos de té, etc.
- Residuos forestales: pequeñas ramas, hojas, corteza.
- Plantas acuáticas: Camalote, algas marinas.

3.5.3. Tipos de biodigestores

El tipo de digestor que se utiliza variará en relación al contenido de sólidos y la consistencia de la materia prima utilizada, el capital a invertir y el propósito del sistema de digestión. Altas tasas de carga orgánica optimizan la producción volumétrica de metano, mientras que velocidades de carga bajas maximizan la eficiencia del tratamiento. Existen experiencias de aplicaciones de digestión anaerobia se han realizado a temperatura ambiente (15 – 25°C), mesófilas (30 – 40°C) o temperaturas termófilas (50 – 60°C). Normalmente en los digestores agrícolas se emplean a temperaturas mesófilas (Wilkie, 2005)

Una clasificación general sería según el régimen de carga de los digestores, de régimen estacionario o lotes, régimen semi-continuo, horizontales de desplazamiento y de régimen continuo. Los digestores de lotes o estacionario, se cargan una vez o en intervalos por varios días, y se descargan cuando se degrada en su totalidad la biomasa y ya no se produce biogás. Régimen semi-continuo, se

utilizan en zonas rurales, dependen del tiempo de retención para su carga, y esta se realiza una vez al día. Los horizontales o de desplazamiento, se asemejan a un canal, están enterrados y son de flujo semi-continuo. Los de régimen continuo, se emplean para digestores de gran tamaño, utilizan agitación y controles de alimentación y descarga (Urre, 2009).

Específicamente para lecherías existen digestores de baja carga, dentro de los que están las lagunas cubiertas y digestores de flujo continuo, y los de alta carga dentro de los que están los digestores de mezcla completa y digestores de contacto (Urre, 2009), misma clasificación en 4 tipos que hacen Wilkie (2005) y Balsam (2006), para los biodigestores usados actualmente para la digestión anaerobia en planteles lecheros: a) Lagunas cubiertas, b) Mezcla completa c) Flujo continuo d) Película fija (o de contacto).

- a) **Lagunas cubiertas:** Básicamente consisten en una piscina de purín cubierta por una membrana o alguna cubierta flotante la que llega hasta el límite del líquido previniendo el escape del gas acumulado a la atmosfera (Balsam, 2006). Estos tipos de digestores están diseñados para funcionar con un contenido de sólidos menor al 2% y funcionan a temperatura ambiental (Wilkie, 2005), por lo que su rendimiento se ve fuertemente afectado por variaciones de la temperatura estacional (Urre, 2009) y normalmente son usados en regiones cálidas (Balsam, 2006). Los tiempos de retención hidráulica para estos modelos van desde los 35 días en las zonas más cálidas a 60 días en las más frías (Wilkie, 2005). Son los modelos menos costosos de instalar y operar (Balsam, 2006).

- b) **Mezcla Completa:** También llamados digestores de agitación continua, son sistemas en que el contenido es agitado por agitación mecánica, recirculación de efluentes o recirculación del biogás (Wilkie, 2005), consisten en estanques tipo silo, donde el estiércol es mezclado y calentado. Están diseñados para trabajar con un 2 – 10% de sólidos (Balsam, 2006). Pese al nombre, el mezclado del contenido tiende ser intermitente más que continuo. Los estanques son fabricados de concreto o acero recubierto. Por las características de mezclado y adición de calor estos modelos tienen tiempos de retención de 20 – 25 días (Wilkie, 2005), convirtiéndose en un modelo más eficiente pero en el más caro de instalar y operar (Balsam, 2006).

- c) **Flujo Continuo:** Son sistemas sin mezcla del contenido, el cual fluye de forma semi-continua a través de un reactor horizontal, el reactor puede ser un depósito tubular enterrado en la tierra o una trinchera cubierta revestida de hormigón (Wilkie, 2005). El gas y el

digestato producido es empujado hacia uno de los extremos por el estiércol alimentado al reactor por el otro extremo (Balsam, 2006). Este tipo de diseño permite un contenido de sólidos de un 10-14% por lo que son adecuados para predios en los que los residuos de los animales son barridos y no diluidos en agua. Generalmente operan bajo temperaturas mesofílicas y los tiempos de retención hidráulica van de 20 a 30 días (Wilkie, 2005).

- d) Película Fija:** Este tipo de digestores mantiene a las bacterias dentro del reactor, previniendo el lavado de la biomasa microbiana (Wilkie, 2005). La conservación de la biomasa bacteriana se realiza separando, concentrando los sólidos y volviéndolos al afluente, el proceso tiene la ventaja en la eficiencia de convertir materiales que se digieren lentamente tales como celulosa en un reactor altamente concentrado (Urrea, 2009). Este diseño funciona para residuos con un porcentaje de sólidos menor al 2% y puede operar a temperatura ambiente (15-20°C) o más altas. A temperatura ambiente la baja tasa metabólica es compensada por la alta masa microbiana. El tiempo de retención hidráulica de estos sistemas es de 2-4 días y es recomendado para predios que colecten sus purines mediante lavado con agua (alta dilución) (Wilkie, 2005).

La siguiente tabla reúne los principales parámetros a considerar en la elección del modelo de biodigestor a usar en un predio.

Tabla Nro. 1: Principales parámetros de los diferentes modelos de biodigestores.

Tipo de Digestor	Sólidos totales (%)	Tiempo de retención (días)	Temperatura
Laguna Cubierta	< 2%	35 – 60	Ambiente
Película Fija	< 2%	2 – 4	Ambiente/Mesofílico
Mezcla Completa	3-10%	20 – 25	Mesofílico
Flujo Continuo	10-14%	20 – 30	Mesofílico

Adaptado de Wilkie (2005).

3.5.4. Productos de los biodigestores

Como se mencionó anteriormente, el producto de mayor interés generado por los biodigestores es el biogás, un gas proveniente de la mezcla de Metano, dióxido de carbono, vapor de agua, sulfuro de hidrógeno y otros compuestos en menores cantidades; sin embargo existen varios otros procesos y residuos que también pueden constituirse en productos de estos sistemas.

El contenido energético del biogás puede definirse como el primer producto de los biodigestores, sin embargo, hay otros productos a considerar. Bajo ciertas condiciones, un sistema de digestión anaeróbica puede convertir un sitio de acumulación permanente de estiércol dentro de una operación ganadera, en combustible para generar calor, frío, electricidad, energía mecánica, etc., además los sólidos remanentes de la digestión pueden ser usados como fertilizantes del suelo, para aplicar en la misma granja o ser vendidos (Balsam, 2006) surgiendo así un segundo producto luego de la energía del biogás.

Al producto remanente que queda posterior a la digestión anaerobia se le llama digestato. Este elemento puede utilizarse directamente en el campo o bien ser sometido a un proceso de separación de las fases sólido/líquido con posterior estabilización de la fase sólida (mediante compostaje) (Vidal *et al.*, 2009) y constituir una alternativa para mejorar los suelos, entre otras cosas, porque el contenido de nitrógeno es mayor en el estiércol digerido que en el fresco (Carrillo, 2003).

Otro producto, a veces no visto de los biodigestores, es el control de microorganismos entéricos que genera el proceso, para lo que es útil servirse de la información aportada por la siguiente tabla.

Tabla Nro. 2: Desaparición de microorganismos entéricos durante la digestión anaeróbica

Organismos	Temperatura (°C)	Tiempo de residencia (días)	Desaparición
Salmonella spp.	22 – 37	6 – 20	82 – 96%
Salmonella typhi	22 – 37	6	99%
Mycobacterium bovis	30	-	100%
Poliovirus	35	2	98,5%
Quistes de protozoos	30	10	100%
Áscaris spp.	29	15	90%

Adaptado de Carrillo (2003).

Por lo tanto, el control de microorganismos entéricos se constituye un tercer producto de estos sistemas, siendo de marcada relevancia para la ruptura de los ciclos parasitarios de estos.

Otro producto generado por los biodigestores es su efecto ambiental, con la disminución de emisión de olores y de gases de efecto invernadero, además del apropiado manejo de residuos, lo que conlleva a un cumplimiento del marco legal de acuerdo a la normativa nacional vigente contenida en el Código Sanitario y Decretos Supremos N°90/2000 y N°46/2003 (Salazar, 2012).

La contribución asociada a la combustión del metano cumple un rol de marcada importancia, y un importante ingreso en los proyectos de este tipo en Europa, lo que augura una nueva fuente de ingreso para el país mediante los bonos de carbono asociados con la destrucción del metano (mediante la combustión del mismo) y conversión a dióxido de carbono, el que puede ser capturado nuevamente por las plantas retornando al ciclo del carbono. Cuando los purines son arrojados directamente a los campos, cuentan con una importante aireación y descomposición aeróbica por lo que su generación de metano es muy baja. Sin embargo, en los sistemas de almacenamiento de purines, tales como lagunas, se genera un ambiente anaeróbico propicio para la formación de metano, el cual si no es utilizado para algún propósito, se libera al ambiente ocasionando un importante impacto negativo. De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, el metano es 21 veces más potente como gas de efecto invernadero que el dióxido de carbono, por lo que los sistemas de almacenamiento de purines pueden constituir una gran fuente de gases de efecto invernadero, y por el contrario, la conversión de metano a dióxido de carbono mediante su combustión constituye una práctica ambientalmente muy favorable (Shelford, 2012).

Entonces, los productos o beneficios de la digestión anaeróbica de los purines de lechería van desde lo económico (reducción de costos energéticos, ingreso por venta de exceso de electricidad producida, calor, etc.); lo ambiental (reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, mejor control de la aplicación de abono sobre los cultivos, etc.) a lo social (a través de la reducción de la emisión de olores durante el almacenaje y aplicación de purines) (Shelford, 2012) por lo que considerar tan solo el valor energético del biogás sería un error, deben ser considerados todos los productos que este genera, sean o no tangibles y medibles.

3.5.5. Limitantes de los biodigestores

El metano es un recurso energético muy prometedor y valioso; sin embargo, los otros componentes contenidos en el biogás como el sulfuro de hidrógeno, dióxido de carbono y vapor de agua, tienden a inhibir la producción de metano y, con excepción del vapor de agua, son peligrosos para la población y/o el ambiente. Es por esta razón, y otras más a detallar en el presente capítulo, que el biogás producido debe ser de alguna manera purificado. El metano también representa un peligro importante debido a que es inodoro e incoloro y por tanto su dificultad de ser detectado, sobre todo porque es altamente explosivo cuando entra en contacto con el aire atmosférico en proporciones de 6 – 15% de metano. Por estas y más razones, es recomendado que los edificios donde se trabaje con biogás deben tener una adecuada ventilación, los motores, cables de electricidad y luces deben ser a prueba de explosión y se debe contar con extintores de fuego en las líneas donde se transporta el gas además de dispositivos con alarmas para detección del mismo (Balsam, 2006).

La condensación del vapor de agua en los sistemas de conducción del biogás es con frecuencia un problema debido a que el biogás está generalmente más tibio que las cañerías por donde pasa. Es esencial disponer de una trampa de agua y puntos de drenaje en la tubería (Carrillo, 2003), o bien, la remoción de esta humedad mediante el flujo del biogás a través de una bobina refrigerada. El uso de biogás en equipos de generación de calor y motores de combustión interna puede causar tempranas fallas en estos equipos por la naturaleza corrosiva de el vapor de agua y el sulfuro de hidrógeno (Balsam, 2006). Otro sistema utilizado en equipos de combustión de biogás para evitar el vapor de agua es un intercambiador de calor entre el motor y la cañería de biogás, lo que anticipa la condensación del vapor y permite retirarlo antes de entrar al motor.

Es importante recalcar que el biogás proveniente de la digestión de desechos animales no tiene varios de los contaminantes presentes en el biogás de rellenos sanitarios o plantas de tratamiento de aguas servidas, por lo que es más simple de purificar. Pese a esto deben tomarse algunas precauciones (Balsam, 2006). Tanto el azufre orgánico proveniente de algunos aminoácidos, como el inorgánico pueden ser reducidos a sulfuro de hidrógeno, un gas muy tóxico y altamente reactivo con el hierro y el cobre originando la corrosión (Carrillo, 2003). Es por esto y por su mal olor que el sulfuro de hidrógeno debe ser removido. Esto puede hacerse mediante la inyección de menos de un 6% de aire dentro del reservorio del biogás, mediante la adición de cloruro de hierro a la corriente de entrada del digestor, o haciendo pasar el gas a través de bio-astillas de madera impregnadas con óxido de hierro (esponja de hierro) o a través de filtros de carbono activado (Balsam, 2006).

Para aumentar el poder explosivo del biogás, este puede ser pre tratado para disminuir su contenido de dióxido de carbono, mediante filtros depuradores (Balsam, 2006); sin embargo esta, no es una práctica muy habitual, sino que la remoción del sulfuro de hidrógeno y el vapor de agua constituyen las principales medidas.

Los sólidos muy fibrosos, como restos de alimentos y pajas de las camas, constituyen una limitante para la digestión anaerobia y deben ser removidos previo a la digestión en el caso de los digestores de tipo laguna cubierta y película fija, posterior a la digestión en el caso de los de flujo continuo y en cualquiera de los dos momentos en el caso de los de mezcla completa (Balsam, 2006). Pese a lo recién mencionado, en la experiencias de biodigestores en lecherías visitadas en Osorno, se observó que la no remoción de sólidos previa a la digestión en los digestores de flujo continuo puede ocasionar problemas de bombeo del contenido y taponamiento del flujo, por lo que se recomienda remover sólidos fibrosos previo a la entrada al digestor (Ávila, 2013)⁽²⁾. De la misma manera, en la

⁽²⁾ Ávila, M. 2013. [Comunicación Personal]. Ingeniero Mecánico, Representante de Biotecsur. Osorno, Chile.

experiencia visitada en el sector de Tinguiririca, se vio que la arena de las camas de las vacas arrastrada hacia los biodigestores ocasiona graves problemas de corrosión en las cañerías de los purines, así como acumulación en los estanques de digestión. Es por lo anterior, que se debe tratar de prevenir la entrada de arena en los digestores por medio de trampas de arena o mediante la utilización de otro tipo de sustrato en las camas de los animales como los pisos de goma (Wolff, 2013)⁽³⁾.

La formación de espuma en los biodigestores constituye un impedimento físico para el proceso, por lo que se debe evitar mediante el mezclado del contenido del digestor ya que, junto con otras causas, son las más importantes de una excesiva acumulación de ácidos volátiles dentro del digestor, limitante del crecimiento bacteriano (Carrillo, 2003).

Existen variados elementos esenciales para una adecuada digestión anaeróbica, la que en general se lleva a cabo de manera satisfactoria entre el 3 – 10% de sólidos. La demanda bioquímica de oxígeno, el nitrógeno y el fósforo son parte de esos elementos esenciales y se ha establecido una relación de 700 : 5 : 1 como ideal. Además para el crecimiento óptimo de los metanógenos es necesario la presencia de cuatro elementos en concentraciones muy bajas: Fe, Co, Ni y Mo (Carrillo, 2003).

Los antibióticos y antihelmínticos empleados en las explotaciones pecuarias llegan a los excrementos pero, no suelen afectar mayormente la digestión debido a la dilución que estos sufren. Si es importante mencionar que los metanógenos son sensibles a los antibióticos que afectan la síntesis de sus proteínas y lípidos y a los interfieren con la función de la membrana citoplasmática (Carrillo, 2003) como los Imidazoles y Polimixinas.

Otra limitante a considerar dentro de estos sistemas es la concentración de nitrógeno amoniacal, la que debe ser inferior a 1,5 g/L; si es mayor, como suele ocurrir con el guano de pollo, resulta tóxico. También son tóxicas las sales de zinc, cobre y níquel, aunque este último es necesario en ínfimas cantidades. Algunas otras sales pueden ser estimulantes o inhibitorias según su concentración como se detalla en la siguiente tabla (Carrillo, 2003).

⁽³⁾ Wolff, H. 2013. [Comunicación Personal]. Ingeniero de Proyectos en Genera4. Tinguiririca, Chile.

Tabla Nro. 3: Efecto de la concentración de algunas sales en los biodigestores.

Cación	Concentración (g/L)		
	Estimulante	Inhibitoria	Muy Inhibitoria
Sodio	0,1 – 0,2	3,5 – 5,5	8,0
Potasio	0,2 – 0,4	2,5 – 4,5	12,0
Calcio	0,1 – 0,2	2,5 – 4,5	8,0
Magnesio	0,075 – 0,15	1,0 – 1,5	3,0

Adaptado de Carrillo (2003).

En relación a los desinfectantes, los del tipo clorado son muy tóxicos, aún a bajas concentraciones (<1 mg/L) pero su toxicidad dura muy poco ya que son rápidamente absorbidos por los sólidos e inactivados. La mayoría de los detergentes sintéticos son degradados fácilmente, pero si su concentración es mayor que 20 mg/L, pueden afectar la digestión. Los compuestos de amonio cuaternario son persistentes y tóxicos a bajas concentraciones (1mg/L). Los solventes clorados y sus derivados son tóxicos en concentraciones de 1 mg/L. La toxicidad de los sulfatos se manifiesta a concentraciones mayores que 1 g/L y la inhibición total ocurre por sobre 4,5 g/L (Carrillo, 2003).

Como último factor importante a manejar y que se puede transformar en una limitante está el mezclado. Este influye tanto como el tamaño de las partículas, pues expone nuevas superficies a la acción bacteriana y previene la disminución de ésta por agotamiento puntual de los nutrientes o acumulación de metabolitos (Carrillo, 2003).

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

Describir la situación actual del uso de purines en sistemas pecuarios, para la generación de biogás mediante digestión anaeróbica, y generar dos modelos de biodigestores anaerobios, aplicables a diferentes sectores del agro chileno, considerando el perfil de los receptores y las necesidades que suplen.

4.2. Objetivos Específicos

- a) Recopilar, sintetizar y organizar de manera coherente la bibliografía respecto al uso de purines como sustrato energético y su aprovechamiento mediante digestión anaeróbica en lecherías.
- b) Analizar el sector lechero nacional de modo de identificar a los posibles receptores de estos modelos.
- c) Evaluar económicamente la incorporación de estas tecnologías e identificar los espacios de desarrollo tecnológico que se abren al contar con esta fuente.
- d) Generar dos modelos de aprovechamiento de biogás. Un modelo para lecherías de la pequeña agricultura, y otro para planteles lecheros de tamaño medio.

5. Material y Métodos

El presente estudio contempla cuatro etapas para su implementación y desarrollo, cada una de ellas coincide con el logro de los objetivos específicos antes mencionados. Se expone en los siguientes párrafos la metodología utilizada según los objetivos propuestos.

Desde un punto de vista metodológico para alcanzar el **objetivo específico a)** se realizó en primer lugar una **revisión bibliográfica** en profundidad considerando fundamentalmente los sistemas de generación de biogás a partir de purines animales existentes, así como los sustentos teóricos respectivos a los procesos generados dentro de este sistema. Posteriormente se realizaron **visitas a distintas experiencias** de uso de esta tecnología en el país, lo que permitió profundizar los conocimientos sobre estos sistemas y cuales se aplican en Chile.

Para alcanzar el **objetivo específico b)**, que dice relación con la caracterización del sector lechero nacional de modo de **identificar a los posibles receptores** de estos modelos, se utilizó la información del censo agropecuario 2007 otorgada por Muchnik *et al.* (2008). Con esto se hizo una **estimación de los potenciales usuarios** teniendo en consideración dos características prediales que explican la cantidad y disponibilidad de purines como son; número de vacas y sistema de alimentación (pastoreo o en confinamiento).

Para cumplir con el **objetivo específico c)** de evaluar económicamente la incorporación de estas tecnologías e identificar los espacios de desarrollo tecnológico que se abren al contar con ésta fuente, la propuesta metodológica comprendió en primer lugar el uso de la metodología de **consulta a experto** centrada básicamente en **identificar los espacios de desarrollo tecnológico** que habilita el biogás en las explotaciones lecheras. Para esto se entrevistaron 5 expertos⁽⁴⁾ sobre la base de una encuesta semi estructurada.

Finalmente, y para dar cuenta por lo solicitado por el **objetivo específico d)** se elaboraron dos **modelos de biodigestores** utilizables en diferentes escalas de lecherías nacionales. Tomando la información recabada a lo largo de los puntos anteriores se da cuenta de los requerimientos de los diferentes modelos, así como de los tipos de biodigestores a utilizar, escalas de aplicabilidad y productos generados.

⁽⁴⁾ Se consideró experto a profesionales con competencias en las áreas de sistemas productivos lecheros, economía pecuaria y sistemas productivos agrícolas.

6. Resultados

6.1. Principales aspectos de la generación de biogás en lecherías

Si bien la práctica de recolección de purines parece ser un manejo ya adoptado y asimilado dentro de los productores de leche de distintos tamaños, su utilización y disposición es un aspecto que toma variadas formas dentro de la industria y por consiguiente, diferentes impactos ambientales según su uso. El impacto puede llegar a ser incluso legal, ya que la legislación prohíbe explícitamente la liberación de estos residuos a cuerpos de agua, arriesgando incluso el cierre del establecimiento (Alfaro y Ramírez, 2012). Los volúmenes de purines generados al año en las lecherías son del orden de 36.000 litros/año/vaca (Salazar, 2012), lo que lo constituye en un problema por la gran cantidad de residuo a manejar, pero también una oportunidad por la posibilidad de aprovechar su energía mediante la digestión anaeróbica, además de hacer un correcto manejo ambiental de estos pudiendo aprovechar también, de forma más ordenada y segura, los nutrientes contenidos en estos desechos.

La digestión anaerobia de fecas y orina es un proceso que ocurre naturalmente en el ambiente donde se depositan, sin embargo al reunirla y disponerla en un sistema completamente libre de oxígeno, además de controlar parámetros como temperatura, pH, etc. se puede acelerar la degradación del sustrato y maximizar la producción de metano. Las bacterias son las protagonistas de este proceso, haciendo pasar al contenido de los biodigestores por una etapa de hidrólisis de compuestos de alto peso molecular, acidogénesis y acetogénesis para finalmente producir el metano en la metanogénesis. Los géneros bacterianos participantes de la metanogénesis son: *Methanobacterium*, *Methanococcus*, *Metanosarcina* y *Methanospirillum* entre otros (Caamaño, 2011).

El principal producto final del proceso de digestión anaerobia es el biogás, mezcla de metano y dióxido de carbono principalmente, compuesto que constituye el foco de interés de este proceso. Además del biogás, un elemento de bastante interés es el remanente de la biodigestión, también llamado digestato. Este constituye un producto con alto contenido de nutrientes y mayor estabilidad y durabilidad que el purín sin tratamiento, además contiene mucho menos olor, menor carga de microorganismos patógenos y dilución e inactivación parcial de residuos de fármacos (Carrillo, 2003). Otros productos de este proceso son intangibles y ligados al tema ambiental. El mejoramiento de la imagen predial, cumplimiento de la normativa ambiental, disminución de olores y moscas, adecuada disposición de residuos, disminución del efecto invernadero producido por los

desechos, constituyen importantes productos del proceso, además del ahorro, por el uso más eficiente de los residuos como abono.

Los biodigestores anaeróbicos son estanques cerrados donde se llevan a cabo, en forma separada o conjunta, los procesos de la biodigestión anaerobia antes mencionados. Los hay de distintas formas, tamaños y esquemas de funcionamiento detallados en el punto 3.5.3. Uno de los factores más importantes al momento de elegir un modelo de biodigestor, es considerar las características del purín que se utilizará en él. En primer lugar, es importante saber si solo se utilizará purín, o se complementará con algún residuo de cosecha. El contenido de sólidos es otro factor crítico al momento de seleccionar el tipo de digestor, por lo que también debe ser evaluado previamente. Otras características importantes a considerar son los volúmenes de purines producidos, el tratamiento previo o ausencia de este que se les haga y las condiciones del ambiente en el que se situará el digestor (temperatura como un factor crítico).

El biogás en sí es un compuesto con un 60% de metano y 40% de dióxido de carbono, además de menores proporciones de otros gases. Es un compuesto de importante interés económico, por su contenido energético y potenciales usos en la generación de electricidad, calor, frío, energía mecánica, etc. Es relevante, previo a la instalación de un sistema de generación de biogás, un intento por medir lo más precisamente posible las aplicaciones directas que puede tener el biogás en el predio a instalarlo. Además de lo anterior, es de gran relevancia revisar acuciosamente las inversiones a incurrir v/s los ahorros o nuevos beneficios que este sistema es capaz de otorgar. Balsam (2006), Shelford (2012) y Pérez, (2010), relevan como beneficiosos, rentables y convenientes estos sistemas, dado que los productos capaces de otorgar entregan un retorno a mediano plazo a los gastos incurridos; sin embargo, recalcan siempre la importancia de evaluar cada situación en particular.

Aunque obvio, es importante aclarar que no todos los purines producidos son posibles de recolectar, por lo que, para los rebaños lecheros a pastoreo, solamente los purines producidos en la sala de ordeña y establos son un recurso utilizable. De la misma manera es importante recalcar las limitantes de eficiencia que, como todos los sistemas de intercambio de energía, tienen estos sistemas de digestión anaerobia. Según Balsam, 2006, de la producción de biogás total de un biodigestor, aproximadamente el 35% es ocupada en la mantención de la temperatura del mismo digestor, variando según la época del año y la localización geográfica. En la misma línea, la conversión de biogás en electricidad tiene una eficiencia aproximada de un 20%, por lo que de la

energía contenida en el biogás producido, solo un 13% sería convertido a electricidad según este autor.

En base a lo recabado, queda clara la enorme cantidad de energía contenida en los desechos generados por las vacas lecheras, los que constituyen un insumo de alto contenido energético y de una cada vez mayor conveniencia ambiental de su recolección y acopio, así como una conveniencia económica de su aprovechamiento. El más claro y cuantificable es el incentivo económico que genera el proveer este nuevo insumo energético, por la posibilidad de reemplazar otras fuentes energéticas utilizadas en el predio, generando así un ahorro. Más fuerte aún es el impacto en predios que no cuenten con fuentes de energía estables, en los que este nuevo producto que es el biogás, los habilita a incorporar nuevas tecnologías a su lechería, como son la refrigeración de la leche cruda o sus subproductos, ordeña mecánica, etc. Además de lo anterior, el impacto ambiental es sustantivamente importante, siendo este sistema un medio para disminuir los impactos que generan los predios al medio.

6.2. Espacios de desarrollo tecnológico que habilita el biogás

Se describen a continuación los posibles beneficios productivos que se podrían obtener en un predio gracias a la incorporación de un sistema de generación de biogás, tratando de buscar las tecnologías que este podría habilitar o abaratar, además de posibles externalidades negativas.

En una primera instancia se recabó información en relación a las tecnologías productivas posibles de incorporar, o procesos productivos demandantes de energía presentes en los predios, en los cuales se pueda generar un ahorro importante mediante sistemas de biogás. Respecto a esto todos los expertos consultados coinciden en identificar el tema energético como el más importante beneficio del biogás. Dentro de esto, son los posibles ahorros energéticos que se puedan generar, mediante el reemplazo de fuentes de energía tradicionales por biogás y sus derivados el aspecto más interesante. Sin embargo, destacan por su factibilidad de implementar, las siguientes aplicaciones para el biogás:

- a) **Energía térmica:** Generación de agua caliente para limpieza de equipos y utensilios, para limpieza de pisos, para cocina de casino y ducha de operarios, descongelamiento de semen, reconstitución de sustitutos lácteos y calefacción de ambientes o bien para otra unidad productiva del predio.

- b) **Energía eléctrica:** Por ser la fuente energética requerida para la bomba de vacío para el equipo de ordeña, sistema de refrigeración de la leche, de vacunas, iluminación, cadena de frío de subproductos como el queso fresco, automatización de procesos como el lavado de la sala de ordeña, electricidad para oficina, cercos eléctricos y movilización de desechos.
- c) **Otras aplicaciones:** Combustible para maquinaria, bombeo de agua, molienda de granos y mezcla de sales.

Respecto al impacto que podrían tener los sistemas de digestión anaeróbica en los predios lecheros se destacaron impactos **económicos, ambientales y sociales**.

En el ámbito **económico**, como era de esperar, se identificó por parte de todos los expertos, la disminución de costos energéticos como la principal consecuencia positiva de estos sistemas, impactando sobre los costos de producción cuando logra reemplazar fuentes energéticas externas por internas, generando un ahorro energético. Ahora bien, este impacto queda supeditado a los costos de inversión de estos sistemas, y a la proporción del gasto energético posible de suplir, dependiente de los volúmenes de biogás alcanzables. En definitiva, el impacto económico depende de los costos y rentabilidad que le otorguen estos sistemas al usuario potencial. Pese a esto, de alcanzar cifras interesantes, se pueden constituir en herramientas de independencia energética, al aportar con energía propia incluso al sistema general y, de paso, disminuir la presión sobre otros tipos de fuentes de energía para la generación de electricidad.

En relación a lo **ambiental**, la eliminación de olores es un aspecto identificado como beneficioso por los expertos, al generar una adecuada disposición y acopio de los residuos orgánicos, permitiendo además disminuir la presencia de moscas, percolados de nitrógeno a aguas subterráneas, etc.

Adicionalmente a lo anterior, los biodigestores constituyen una opción para un mejor aprovechamiento de los purines al dar la posibilidad de preservar el poder fertilizante e incorporarlos al suelo, agregando más valor al poder fertilizante de estos. La generación de un efluente líquido sin coliformes fecales, listo para usar como fertilizante, constituye un aporte muy importante a los sistemas lecheros. El digestato remanente del proceso de generación de biogás, es identificado como un sustrato interesante, por su valor como fertilizante estable utilizable para las praderas.

En el ámbito **social**, el impacto sobre el pequeño agricultor constituye un punto muy importante y pocas veces considerado. Sistemas que puedan automatizar las tareas diarias del campesino

dedicado al rubro lechero podrían impactar muy positivamente en su bienestar. Puede que desde el punto de vista netamente económico algunos de estos sistemas no sean rentables, pero puede deberse a la no valoración del bienestar de las personas. Por esta vía la electricidad hace una contribución que podría no estarse viendo.

Como información adicional destaca que actualmente una parte importante de las lecherías tiene sistemas de manejo de purines y su recolección es una práctica que ya se utiliza e incluso en algunos planteles se hace una separación entre una fase más sólida que va a los potreros y una más líquida que se hace decantar. Dada la costumbre de acopiar los purines y no eliminarlos directamente al ambiente, la incorporación de un sistema de biogás no supone un cambio muy importante en la forma de su manejo, por lo que no debiera ser muy difícil la adopción de esta tecnología.

6.3. Experiencias de biogás en Chile

Pese a todo lo señalado en los puntos anteriores, la factibilidad real de los sistemas siempre debe ser probada en terreno, para dar cuenta real de los procesos y ver en ellos implicados todos los factores de ambiente y manejo. En los puntos 4.3.3. y 4.3.4. se dan cifras que hacen bastante convenientes los sistemas de digestión anaeróbica de purines casi a cualquier escala, sin embargo, es importante revisar las experiencias realizadas en nuestro país al respecto para tener un panorama más real de la factibilidad de estos proyectos y los beneficios que pueden otorgar.

En un panorama general, en nuestro país existen 53 proyectos de biogás, de los cuales 22 se encuentran operando, 6 en construcción y 25 en estudios previos. En cuanto a proyectos de biogás en purines y estiércoles, existen 3 operando, 5 en construcción y 14 en estudio (Avalos, 2012). Es posible que estas cifras estén levemente desactualizadas o tengan algún grado de subestimación porque en visitas a terreno se constató el funcionamiento de 4 proyectos en operación, además del relato por parte de expertos en el área de al menos 2 más operando, lo que probablemente se debe al cambio de status de algunos proyectos de estudio a operación.

a) Planta de Biogás Los Ángeles, Alfredo Songer, HBS Energía.

Planta de biogás ubicada en las afueras de la ciudad de Los Ángeles, alimentada con el estiércol de 3.000 bovinos de engorda, en sistema de confinamiento en piso de tierra. Los purines son recolectados de los corrales, y junto a los desechos de la cosecha de maíz y tomates hidropónicos, se realiza una pre mezcla, la cual es hidratada y aumentada de temperatura, con la que son alimentados los estanques de hidrólisis previa.

Ilustración Nro. 2: Vista aérea de planta de biogás Los Ángeles, HBS Energía



En una vista aérea de la planta se pueden ver las estructuras cilíndricas correspondientes a los estanques de hidrólisis y los fermentadores, además de las estructuras de la estación de alimentación, sistema de generación eléctrica e invernadero. En esta planta los procesos de hidrólisis y fermentación propiamente (acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis) son realizados en estanques separados, de modo de dar las temperaturas y pH ideales a cada etapa, aumentando así la eficiencia del sistema en general. En cuanto al tipo de biodigestor, podríamos clasificarlo como de mezcla completa dado el uso de mezcladores mecánicos, además de los tiempos de retención y contenido de sólidos que calzan con la definición de estos modelos.

Ilustración Nro. 3: Residuos de cosecha y estanques de hidrólisis.



Ilustración Nro. 4: Piscinas de acumulación de purines.



Ilustración Nro. 5: Estanque de acumulación de agua caliente, los dos fermentadores y estanques de hidrólisis (de izquierda a derecha).



Los productos generados en esta operación son:

- Electricidad, inyectada al sistema interconectado central, 2,0 MWh instalados.
- Energía térmica proveniente de los sistemas de refrigeración del motor y de sus gases de escape utilizada para mantener la temperatura en un invernadero de tomates hidropónicos y del digestor. Se producen 2,2 MWh instalados de energía térmica.
- Fertilizante mineral líquido proveniente de la separación de sólidos y líquidos de los efluentes del biodigestor. 12.000 m³/año utilizados para la fertilización de las praderas de las cuales se alimenta el ganado. La fase sólida del digestato es utilizada como abono para los cultivos del predio.

El sistema de conducción de biogás cuenta con trampas de agua y filtros de ácido sulfhídrico, por los cuales pasa el biogás para disminuir su nivel de humedad y de este ácido previo a entrar al sistema de combustión.

Uno de los problemas importantes que han tenido que sortear en esta planta es la presencia de piedras y otros elementos muy duros en los purines de los vacunos. Varias demoras que ha sufrido el proceso de biodigestión, además de incremento en costos asociados a reparación, se han debido a ruptura de bombas por estos elementos sólidos. Ha sido un constante desafío para los encargados de la planta evitar estos problemas. Considerando lo anterior es que Alfredo Songer Betancourt, Ingeniero Agrónomo, Jefe de Planta Biogás de HBS Energía S.A, relata que entre el 90 – 95% de las fallas que presenta una planta de biogás de grandes dimensiones como ésta, tienen que ver con temas eléctricos o hidráulicos, y es respecto a este último que las características físicas de los purines juegan un rol fundamental, sobre todo en cuanto a características y contenido de sus sólidos.

b) Planta de Biogás Fundo Rinconada, Tinguiririca, Chimbarongo.

Esta planta de biogás ubicada cerca de la ciudad de San Fernando, específicamente en el sector de Tinguiririca. Es alimentada con los purines generados por 560 vacas en ordeña, las cuales permanecen en confinamiento en piso de cemento y cubículos con camas de arena. Los purines son barridos por una pala de caucho acoplada a un tractor y conducidos hacia pozos purineros, los cuales conectan finalmente con el estanque alimentador, desde donde son bombeados al fermentador. Los pozos purineros cuentan con cámaras desarenadoras que disminuyen en parte el contenido de arena de los desechos.

Actualmente el biodigestor es alimentado exclusivamente con los purines de la lechería, pero se espera en un tiempo más incorporar residuos de cosecha en la pre mezcla. La concentración de

sólidos con la que llegan los purines al biodigestor es de un 4 – 5%, menor al 6 – 9% con la que salen de las vacas, debido a la dilución que ocurre por la incorporación de agua de la sala de ordeña. La planta está diseñada para recibir 73 m³ de purín diarios, y con ellos generar cerca de 80 m³ de biogás por hora.

Los productos generados en esta planta son:

- Electricidad, con una potencia instalada de 190 kW, generando actualmente entre 1.500 a 2.000 kW/día funcionando 20 hrs al día. El costo proyectado operacional en la producción de electricidad es de 30 USD/MWh. La energía generada es inyectada al sistema interconectado central para su venta a \$150 pesos/kWh.
- Energía térmica, obtenida mediante intercambiadores de calor de los gases de escape y del sistema de enfriamiento del motor, que contribuyen a mantener la temperatura del biodigestor.
- Digestato, el cual es separado en fase líquida y sólida, ocupadas como fertilizantes para praderas y cultivos respectivamente.

Los sistemas de conducción de biogás de esta planta cuentan con trampas de agua para disminuir la humedad del biogás y además con un filtro de carbón activado para atrapar el ácido sulfhídrico.

La principal limitante que relatan los administradores de la planta de biogás tiene que ver con el alto contenido de arena de los purines, la que taponan y corroe los sistemas de conducción del purín, obligando al cambio de tubos de conducción y al desarme de piezas para su limpieza. Ha sido muy complicado disminuir el contenido de arena en los purines, y el mayor problema podría ocurrir en el momento que la cantidad de arena que llega al digestor detuviera el proceso y se necesitara abrirlo para extraer el material.

Ilustración Nro. 6: Canales de conducción de los purines desde los corrales de alimentación de las vacas.



Ilustración Nro.7: Corrales de alimentación con purines acumulados y sistema de barrido de estos.



Ilustración Nro.8: Estanque de pre mezcla y fermentador al fondo.



Ilustración Nro.9: Acopio de fase sólida del digestato.



Ilustración Nro.10: Fase líquida del digestato.



c) Plantas Biogás en Osorno, Biotecsur.

Mediante contacto con la empresa Biotecsur y su representante Mario Ávila Grothusen, Ingeniero Mecánico, fueron visitadas dos experiencias de producción de biogás, además de la empresa misma. Según su propia descripción en su página web, Biotecsur es una empresa dedicada a diseñar y construir Biodigestores según los requerimientos de cada cliente, desde Biodigestores pequeños que generan gas suficiente para cocinar y calefaccionar, hasta biodigestores agroindustriales que generan electricidad para abastecer el consumo total de energía del predio (muchos de ellos lecherías). También han realizado proyectos en los que se almacena el biogás para ser utilizado como combustible para vehículos de uso particular. Durante los 4 años de existencia la empresa, han realizado 8 proyectos de biogás, 5 de ellos en lecherías. Los productos incorporados en los predios, derivados de la producción de biogás, son:

- Generación de agua caliente para las necesidades del predio como limpieza de la sala de ordeña. Esto mediante calderas a biogás de acero inoxidable o fierro galvanizado, capaces de entregar 160 litros de agua a 80°C en 45 minutos.

- Generación eléctrica para salas de ordeña e iluminación de lecherías. Mediante equipos electrógenos importados de 16 o 30 kW o equipos realizados por la propia empresa de 31 kVA capaces de entregar de 40 a 70 kW/día.
- Producción de biofertilizante (digestato), con menor contenido de semillas de malezas y de patógenos entéricos, otorgando un mayor crecimiento en las praderas fertilizadas en relación al purín directo.
- Otras aplicaciones que se han incorporado en predios a los que se les ha instalado biodigestores son cocinas a biogás, y sistemas de secado de leña y calefacción central.

Ilustración Nro.11: Planta de biogás “Quebrada Honda”, rebaño lechero de 300 bovinos, producción de biofertilizante aplicado a praderas y 40 a 70 kW/día.



Ilustración Nro.12: Planta de biogás “Chacra Puñadi”, rebaño lechero de 20 bovinos, producción de biofertilizante aplicado a praderas y 5 a 10 kWh/día suficientes para realizar ordeña 100% a biogás, aprovechamiento de calor mediante caldera.



Ilustración Nro.13: Planta de biogás “Fundo El Coihue”, rebaño lechero de 900 bovinos, producción de biofertilizante aplicado a praderas y 40 a 70 kWh/día.



Los problemas encontrados por Mario Ávila en la ejecución de estos proyectos se relacionan con desperfectos mecánicos en motores de combustión, siendo estos limitantes en la continuidad del funcionamiento de estos motores y por tanto del abastecimiento eléctrico por esta fuente en el predio. Otro de los problemas encontrados se relaciona con el taponamiento de bombas de extracción del digestato de los biodigestores, esto debido a limitantes propias de estos equipos. En términos generales estos problemas han derivado de la artesanidad de los equipos, al ser motores y bombas diseñados para otros propósitos pero adaptados a los de los biodigestores, de modo de otorgar equipos más baratos y mayores posibilidades de inversión en estas tecnologías para los agricultores, para quienes constituye una nueva tecnología cuyos beneficios, en muchos casos, no han tenido la posibilidad de conocer.

6.4. Análisis del beneficio de los sistemas de biogás para los productores lecheros

6.4.1. Identificación del segmento de posibles beneficiarios

Un producto importante del presente trabajo constituye aclarar a qué grupo de productores, dentro de la industria de producción de leche, les es útil la tecnología del biogás. La forma de analizar esto será en términos de que la cantidad de biogás producido, en sistemas de digestión anaeróbica acorde a su tamaño, efectivamente los habilita para generar un ahorro energético significativo, o bien les permite introducir un nuevo elemento beneficioso para su predio.

Es por esto que en primer lugar es importante determinar el universo de productores lecheros de Chile, y sus tamaños en cuanto a número de vacas lecheras, que de acuerdo a lo indicado por el FIA en su Agenda Láctea 2008-2018, elaborado por Muchnik *et al.* (2008), sería de:

Tabla Nro. 4: Número de explotaciones lecheras y número de vacas lecheras a nivel nacional.

Categoría por Cantidad Vacas	Número explotaciones	Número vacas lecheras
1-19	16.164	85.460
20-49	1.716	49.253
50-100	729	51.478
101-300	837	150.316
>300	291	150.027

Adaptado de Muchnik *et al.* (2008).

Con esta información, surge la necesidad entonces de determinar a cuales de estas categorías generadas por Muchnik *et al.* (2008), les es accesible un sistema de biogás, y por lo tanto pueden transformarse en posibles beneficiarios de un sistema de estos.

6.4.2. Producción de purines en los sistemas lecheros

Para estimar la cantidad de purines producidos por las explotaciones lecheras en Chile se puede utilizar la información entregada por Salazar, 2012 en el Manual de manejo y utilización de purines de lechería. En este se presenta una tabla con la información para calcular de forma práctica un estimado de la cantidad de purines que produce un sistema lechero en particular. Debido a que esta tabla fue elaborada con datos de la zona sur de nuestro país (Regiones de Los Ríos y Los Lagos), para una estimación de una lechería de la zona central se deberían corregir algunos factores en relación a la pluviometría, además de considerar diferentes tiempos de confinamiento.

Tabla Nro. 5: Cálculo de producción de purines en un predio de tipo pastoreo con 100 vacas en ordeña promedio año.

Supuestos ⁽⁵⁾	Volumen Generado (Litros/año)	Aporte (%)
Fecas y orina		
100 vacas en ordeña de 600 kg x (60 kg de fecas/24 h) x 4 h confinamiento/día	365.000	10%
Aguas Sucias		
27,75 x 8 unidades equipo ordeña + 134,4	130.086	4%
0,0403 x 3.000 litros + 11,153	48.199	1%
Aguas Lluvia		
600 m ² construcciones sin techar x 1.500 mm de lluvia (= 1.500 litros agua/m ²)	900.000	25%
400 m ² techos sin canalizar x 1.500 mm de lluvia (= 1.500 litros agua/m ²)	600.000	17%
Pozo purinero (7 m radio) ² x 3,1416 x 1.500 litros agua/m ²	230.908	6%
Agua lavado pisos y ubres		
100 vacas ordeña x 31,2 litros vaca/día	1.138.800	32%
100 vacas ordeña x 5 litros vaca día lavado ubres	182.500	5%
Total	3.595.493	100%

Adaptado de Salazar (2012).

6.4.3. Capacidad energética de los purines en sistemas de biogás

La digestibilidad anaeróbica de los excrementos animales está fuertemente influenciada por la dieta, así como por el nivel de digestibilidad de la dieta en el organismo animal y el nivel productivo de estos mismos. Se estima que la mayor tasa de producción de metano proveniente de excrementos de lecherías es de vacas con una productividad media de leche, y alimentadas con una dieta bien balanceada (Amon *et al.*, 2007).

⁽⁵⁾ Para mayores referencias respecto a los cálculos revisar capítulo 1 de documento de Salazar (2012).

Además de la alimentación, existen diversos factores ambientales asociados a la producción de biogás a partir de los purines, y por tanto al funcionamiento de los digestores, entre los que destacan: temperatura, tiempo de retención de los purines, relación agua/estiércol, mezclado, concentración de sólidos, concentración de ácidos volátiles, formación de espuma, concentración de nutrientes esenciales, sustancias tóxicas y el pH, todos factores que de una u otra manera inciden en la eficiencia de la acción de las metano bacterias y bacterias anaerobias facultativas que participan en procesos previos a la metanogénesis. (Carrillo, 2003). Otros factores que afectan la producción de metano son los tiempos de retención, la tasa de carga de purines, la biodegradabilidad del estiércol y el tipo de biodigestor anaeróbico utilizado (Wilkie, 2005)

Se estima que la fracción biodegradable de los sólidos volátiles del estiércol de las lecherías es de un 40%. Pese a que esto es un indicador de la potencial producción de metano, la cantidad específica de metano producida no es constante, debido a la multiplicidad de factores implicados ya mencionados (Wilkie, 2005).

Como una forma de llegar a una cifra promedio aproximada de producción de biogás y su contenido energético, se tomará la información entregada por Balsam (2006). En esta se menciona que el contenido de energía producido por los desechos de una vaca lechera de 1.400 libras (635 kg.) es de 27.800 Btu (8,14 Kw), dada por una producción de 46,3 ft³ (1,3 m³) de biogás al día; ahora bien, considerando un 35% de uso de esa energía para la operación del biodigestor, quedan 18.000 Btu (5,27 Kw) disponibles diariamente, los que convertidos a electricidad, con una eficiencia de conversión de un 20% se convierten en 1,05 kWh diarios (Balsam, 2006).

Tabla Nro.6: Contenido energético de los desechos de varios animales y su valor.

Parámetro	Cerdos	Bovinos de leche	Bovinos de carne	Camas de Broiler
Peso del animal (kg.)	60	635	360	1,8
Contenido energético esperado				
Energía bruta (kW/animal/día)	0,67	8,14	4,86	0,053
Energía neta (kW/animal/día) (*)	0,44	5,27	3,13	0,032
Equivalencia eléctrica (kW/animal/año) (**)	32	385	230	2,5
Valor (\$/animal/año a \$100 el kW vendido)	1.286	15.479	9.247	100

(*) Descontado un 35% de la energía bruta para la operación del digestor.

(**) Con un generador eléctrico de una eficiencia de un 20%.

Adaptado de Balsam (2006).

6.4.4. Posibilidades de habilitación de tecnologías de los sistemas de biogás

Se hace necesario obtener algunos datos sobre los requerimientos energéticos típicos de las lecherías. En Alemania, el total de energía eléctrica consumida por las lecherías es de alrededor de 5 kWh por cada 100 litros de leche, de los cuales hasta 2,5 kWh son usados para el enfriamiento de la leche (Rabbetts y Lang, 2012)

Una lechería en Estados Unidos, usando el consumo promedio nacional de electricidad de 550 kWh/vaca/año (1,5 kWh/vaca/día), puede generar el 70% de sus requerimientos eléctricos con biogás (asumiendo una eficiencia del generador de un 20% y un uso del 35% del biogás producido para la mantención de la temperatura del digestor) (Balsam, 2006).

Tabla Nro. 7: Litros de leche por vaca a nivel nacional.

	Promedio	XV-VII	VIII	IX	XIV-X
Litros de Leche / vaca	4.974	4.810	5.360	5.589	4.138

Adaptado de Muchnik *et al.* (2008).

Teniendo en consideración los datos de la Tabla Nro. 8, se alcanza un promedio de producción diaria nacional de leche de 13,6 Lt/vaca, lo cual, ajustado a los datos de demanda energética lechera de Alemania significaría un consumo de 0,68 kWh diarios/vaca en Chile, o bien, los requerimientos energéticos de la leche producida por un poco más de 7 vacas chilenas son 5 kWh/día (Rabbetts y Lang, 2012).

Ahora bien, suponiendo una demanda energética similar a la de Estados Unidos para nuestro país, se necesitaría 1,5 kWh/vaca/día para suplir la demanda energética nacional (cerca del doble de lo supuesto con datos alemanes), esto es unos 0,36 kWh/litro de leche producida en Chile (Balsam, 2006).

En cuanto a datos de consumos de maquinas de ordeña y sistemas de refrigeración la información que proporciona Ludington *et al.* (2004), en su Guía de Manejo Energético para Predios Lecheros resulta bastante útil.

Tabla Nro. 8: Índices de requerimientos energéticos para la refrigeración de leche.

Sistema de refrigeración	kWh/50 lts enfriados
Convencional	1,2 – 0,8
Pre-enfriado con agua	0,9 – 0,6

Adaptado de Ludington *et al.* (2004).

De acuerdo la información presentada en esta tabla, la demanda energética por vaca al día según el nivel de producción promedio de las vacas lecheras chilenas sería de 0,72 kWh/día/vaca tan solo para el enfriamiento de la leche. Usando pre-enfriado este valor sería aproximadamente de 0,2 kWh/día/vaca. En cuanto a los equipos de ordeña, se señala un gasto anual que va entre 70 a 100 kWh/vaca/año, esto es unos 0,23 kWh/vaca/día (Ludington *et al.*, 2004).

Sumados estos dos ítems, se obtiene un total de 0,95 kWh/día/vaca consumidos en una lechería considerando la ordeña y la refrigeración. En la guía antes mencionada también se detallan índices de requerimientos energéticos y especificaciones para equipos de iluminación, circulación de aire, sistemas de bombeo de agua, sistemas automáticos de manejo de residuos, sistemas de aire comprimido y otros, sin embargo, para el presente informe solo consideraremos los dos equipos básicos para una lechería, como son la máquina de ordeña y el estanque de refrigeración (Ludington *et al.*, 2004).

Existe otra fuente de información que entrega datos levemente diferentes, detallando un consumo de 16 kWh/mes (0,53 kWh/día) para un equipo de ordeña de cuatro unidades de ordeña con una capacidad de 30 – 50 Lts/min funcionando dos horas diarias. Se reporta también un consumo mensual para la refrigeración de la leche de 200 kWh (6,66 kWh/día) en un estanque con una capacidad de 800 Lts. (PIR, 2012). Cabe señalar que un equipo de ordeña y estanque de refrigeración con estas características podrían suplir las demandas de al menos 10 vacas lecheras con niveles de producción promedio de nuestro país, por lo que sumados esos consumos diarios y divididos por 10 animales nos dan un consumo de 0,72 kWh/vaca/día, cifra bastante similar a la deducida de la información entregada por Ludington *et al* (2004).

En definitiva, y resumiendo la información entregada hasta esta parte, una vaca lechera produce una cantidad de energía que al convertirse en energía eléctrica es capaz de suplir sus propias demandas de energía para ordeña y refrigeración de su leche. Cabe señalar que con un mayor número de animales se pueden generar tasas de carga más altas en los digestores, aumentando con esto la

eficiencia en la producción de metano, por lo que a mayor número de animales el sistema se hace más eficiente (Wilkie, 2005).

A partir de los datos entregados, los sistemas de digestión anaerobia surgen entonces como una alternativa viable y bastante conveniente para pequeños productores lecheros de nuestro país, con cierta capacidad de recolección de purines y de inversión en su propio plantel. Existe, sin embargo, una gran cantidad de factores a manejar en los sistemas anaerobios de digestión de purines, de los cuales es dependiente el éxito de estos proyectos y los beneficios que genere.

Existen estudios que fijan un límite inferior para que un proyecto de digestión anaerobia en lecherías sea factible de realizar. Pérez (2010) señala que con un mínimo de 20 animales es posible generar energía eléctrica del orden de 4,4 kWh y ser aprovechada a través de un generador eléctrico alimentado con biogás. Se usó como variable de interés el tamaño de plantel adecuado, para el cual un proyecto de biodigestión en lechería es viable. Según esto se analizó el ahorro potencial en energía eléctrica y térmica que estos pudieran otorgar, y los costos de inversión para los proyectos con tamaños desde 6 a 100 unidades animales equivalentes (UAE). A partir de esto se establecen una serie de tablas de costos y datos cuantitativos muy interesantes. Es importante mencionar en el cálculo de la recuperación de la inversión, en función del tamaño de plantel, parte su evaluación en un plantel mayor a 18 UAE debido a que por debajo de este número no se alcanza a generar el caudal de biogás mínimo para el correcto funcionamiento del equipo, fijando este como tamaño mínimo para la generación de electricidad. Entrega además datos de recuperación de la inversión de 4 años para proyectos con 20 UAE hasta los 2,4 años para proyectos con 100 UAE. Con un mínimo de 44 animales es posible generar un proyecto de generación que tiene un período de recuperación de la inversión de 3 años, tiempo prudente para el sector económico involucrado (Pérez, 2010).

En tanto, Shelford (2012), hace un completo análisis de rentabilidad para distintos escenarios de capital inicial de inversión para estos proyectos de diferentes tamaños rescatando los que resultan rentables. Escoge para su análisis como tamaño mínimo rebaños de 30 animales, siendo este número mínimo capaz de compensar los costos.

Los costos de inversión analizados por Shelford (2012), contemplan 2 escenarios, uno con una inversión de US\$ 1.500/vaca (cerca a los \$700.000 pesos chilenos) y otro con una inversión de US\$ 3.000 por animal (\$1.400.000 pesos). En tanto el estudio chileno señala costos de inversión cercanos a los 16 millones para proyectos de 20 UAE y de casi 50 millones para proyectos de 100 UAE, con retornos ya mencionados de 4 y 2,4 años respectivamente. (Pérez, 2010). Dada esta

información, se puede mencionar que estos proyectos constituyen elementos de alta inversión para las lecherías.

Según los últimos datos entregados, existe un tamaño mínimo cercano a las 20 UAE para la posibilidad de que estos proyectos generen eficientemente electricidad, limitando a la primera categoría de la Tabla Nro. 4 al acceso a la posibilidad de generación eléctrica en base a los purines, pero permitiendo la posibilidad de utilización de biogás para generación de calor. Lo anterior queda demostrado en experiencias reales y funcionando en nuestro país, con digestores anaerobios funcionando exclusivamente en base a purines de 20 vacas lecheras, con lo que se puede generar electricidad suficiente para abastecer la ordeña y refrigeración de la leche producida, además de la generación del digestato útil para las praderas y todos los beneficios ambientales asociados.

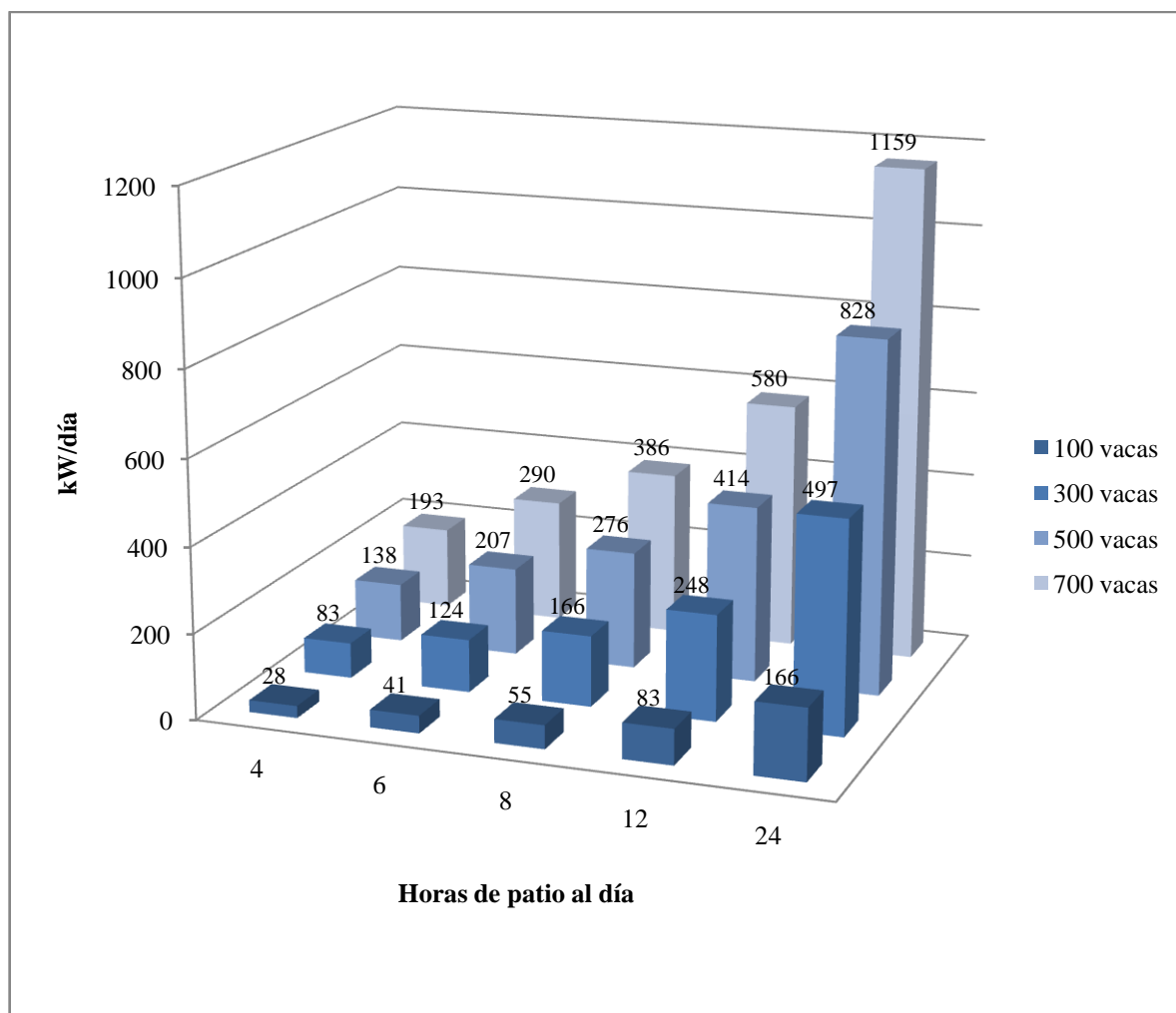
En la información entregada en el Gráfico Nro. 1 se relacionan cuatro magnitudes de rebaños lecheros con las horas de patio al día que permanecen los animales entregando la producción de electricidad en Kw/día (Ávila, 2012).

Tabla Nro. 9: Cantidad de vacas estabuladas permanentemente o en pastoreo, volumen total del biodigestor con 60 días de retención, versus producción de biogás y electricidad.

Vacas Estabuladas	Vacas Pastoreo	Cantidad Purines (Litros/día)	Volumen Biodigestor (m³)	Producción Biogás (m³/día)	Generación eléctrica (kW)
2 – 20	4 – 80	40 – 800	3 – 48	1,5 – 17	4,7 por 6 hrs
20 – 50	80 – 200	800 – 2.000	48 – 120	17 – 40	11 por 6 hrs
50 – 100	200 – 400	2.000 – 4.000	120 – 240	40 – 81	22 por 6 hrs
100 – 200	400 – 800	4.000 – 8.000	240 – 480	81 – 162	45 por 6 hrs
200 – 300	800 – 1.200	8.000 – 12.000	480 – 720	162 – 243	50 por 8 hrs
300 – 400	1.200 – 1.600	12.000 – 16.000	720 – 960	243 – 324	67 por 8 hrs
400 – 500	1.600 – 2.000	16.000 – 20.000	960 – 1.200	324 – 405	84 por 8 hrs
500 – 600	2.000 – 2.400	20.000 – 24.000	1.200 – 1.440	405 – 486	101 por 8 hrs
600 – 700	2.400 – 2.800	24.000 – 28.000	1.440 – 1.680	486 – 567	118 por 8 hrs
700 – 800	2.800 – 3.200	28.000 – 32.000	1.680 – 1.920	567 – 648	45 por 24 hrs
800 – 1.000	3.200 – 3.600	32.000 – 40.000	1.920 – 2.400	648 – 810	56 por 24 hrs

Adaptado de Bioteccsur (s.f.).

Gráfico Nro. 1: Producción de electricidad (kW/día) por cantidad de vacas en ordeña según horas de patio al día.



Adaptado de Ávila (2012).

Bajo esta información, queda como rango mínimo para la producción de biogás la cantidad de 2 vacas estabuladas o 4 vacas a pastoreo, generando volúmenes de biogás capaces de otorgar un caudal de energía útil y utilizable.

En términos nacionales, se ha estimado el potencial de generación eléctrico en los predios lecheros a partir de biogás producidos por los purines factibles de recuperar, para lo cual se asumió que el 100% de los planteles entre la región de Valparaíso y la del Biobío mantienen permanentemente estabulado el ganado, y que para el resto de las regiones la práctica predominante es el pastoreo lo que permitiría recuperar sólo un 30% de los purines. Los resultados se agrupan en la Tabla Nro. 10 de acuerdo al número mínimo de vacas 100% estabuladas o su equivalente en pastoreo (no est) (Ubilla *et al.*, 2012).

Tabla Nro. 10: Potencial eléctrico del sector lechero nacional en kW según número de predios por región.

Región	Factor Estabulado	50 est; 167 no est		100 est; 335 no est		300 est; 666 no est		500 est; 1.332 no est		1.000 est; 3.333 no est	
		kW	Pre-dios	kW	Pre-dios	kW	Pre-dios	kW	Pre-dios	kW	Pre-dios
V	1	462	20	440	17	156	3	82	1	0	0
RM	1	1.663	62	1.540	47	953	15	615	7	263	2
VI	1	485	26	391	15	135	3	0	0	0	0
VII	1	429	18	377	11	236	2	197	1	197	1
VIII	1	2.675	134	2.191	71	1.123	15	777	7	457	2
IX	0,3	643	61	324	19	41	1	0	0	0	0
X	0,3	3.809	347	1.918	99	415	4	293	1	293	1
XIV	0,3	2.752	222	1.750	94	455	10	96	1	0	0
Total		12.918	890	8.931	373	3.515	53	2.061	18	1.120	6

Adaptado de Ubilla *et al.* (2012).

Un esfuerzo de cooperación entre los Departamentos de Agricultura, Energía y la Agencia de Protección Ambiental estadounidenses para promover los proyectos de biogás es conocido como AgStar, el cual estima que la digestión anaeróbica puede ser costo efectiva en cerca de 7.000 granjas de producción animal a lo largo de Estados Unidos (Balsam, 2006).

Pese a todo lo mencionado en los párrafos anteriores, para cualquier persona involucrada en sistemas de digestión anaeróbica, lo más importante es entender que la situación de cada dueño de predio es única, y como tal, requiere de la cuidadosa consideración de muchos factores. La digestión anaeróbica es bastante costosa de instalar, por lo que el dueño debe entender completamente el propósito del sistema y su economía. El tamaño de la planta es determinado, en primer lugar por el número y tipo de animales involucrados, la cantidad de agua añadida en la dilución de los desechos y el tiempo de retención deseado para los residuos. Este último es el más manejable de los factores, un tiempo de retención más prolongado produce una más completa conversión de los componentes del estiércol pero requiere un estanque de digestión más grande. En la siguiente tabla elaborada por el Servicio de Extensión Cooperativa de la Universidad Estatal de Carolina del Norte presenta un set de tasas de carga recomendada para los digestores anaerobios, así como tasas de dilución para distintas especies animales.

Tabla Nro. 11: Principales variables involucradas, en sus cantidades recomendadas, en sistemas de digestión anaerobia para diferentes especies animales

	Cerdos	Bovinos de leche	Bovinos de carne	Camas de Broiler
Criterio de diseño	<i>- Valores por animal -</i>			
Peso del animal (kg.)	60	635	360	1,8
Estiércol fresco y orina total (litros)	5,11	47,32	23,09	0,11
Contenido de sólidos (%)				
Previo a la dilución	10,0	15,0	15,0	25,0
Posterior a la dilución	6,7	8,0	8,0	8,0
Volumen total de desperdicios posterior a la dilución (litros/día)	7,57	90,85	45,42	0,38
Producción de sólidos volátiles (kg./día)	0,45	5,44	2,28	0,017
Volumen del digestor (m ³ /animal)	0,14	1,33	0,54	0,008
Tiempo de retención (días)	20	15	13	22,5
Destrucción probable de sólidos volátiles (%)	50	35	45	60
Producción de gas prevista (m ³ /animal/día)	0,11	1,30	0,79	0,008

Adaptado de Balsam (2006).

6.5. Modelos de Biodigestores

A continuación se darán detalles de dos modelos de biodigestores que se proponen como alternativas a utilizar en dos escalas diferentes de lecherías de nuestro país. Fueron elaborados en base a la información y experiencia recabada. Uno de los modelos fue pensado para lecherías pequeñas y el otro para lecherías de tamaño medio.

a) Modelo de biodigestor para una pequeña lechería⁽⁶⁾

- Tamaño de la lechería: 30 vacas a pastoreo o 7 vacas en confinamiento.
- Producción diaria de leche y orina: 300 Lts/día (10 Lts/día/vaca a pastoreo o 43 Lts/día/vaca confinada)
- Relación estiércol seco/estiércol húmedo: 1 / 5
- Relación unidad de peso de agua / unidad de peso de estiércol: 1,25 / 1
- Tiempo de retención: 30 días
- Gas producido por unidad de peso de desechos: 0,2 m³/kg.
- Densidad del purín: 1.102 kg/m³
- Producción de biogás: 6,3 m³/día.

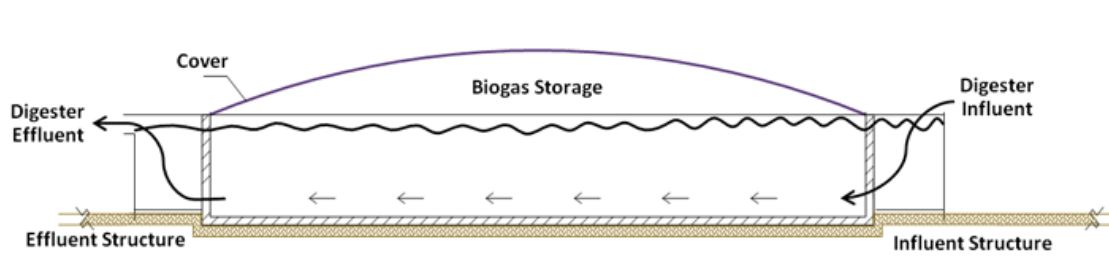
De acuerdo a la información técnica consultada, el tipo de biodigestor más apropiado para la situación sería uno con las siguientes características:

- Tipo: Flujo continuo (Plug-flow), por la posibilidad de realizarlo con materiales de bajo costo y la simpleza del sistema, además de requerir de pocos requerimientos energéticos extra (no hay mezclado ni bombeo), buen aprovechamiento del potencial generador de biogás del purín, etc.
- Volumen del biodigestor: 16 m³.
- Componentes principales: Membrana de polietileno flexible enterrada en la tierra, cubierta por otra membrana de polietileno del mismo grosor. Polietileno de menor espesor cubre el sistema completo a modo de invernadero. Tubos de conducción de gas de PVC. Generador eléctrico de 17 KVA, Motor 24 HP. Mantención de temperatura de digestor mediante sistema tipo invernadero y calor del sistema de refrigeración del motor.
- Inversión aproximada: \$10 millones de pesos.

⁽⁶⁾ Información obtenida a partir de formulas y valores de Carrillo, 2003, valores de tabla de Biotecsur, s.f., valores de eficiencia de conversión energética de Balsam, 2006, información contenida en videos de Biotecsur, 2011a y Biotecsur, 2011b e información de Ávila, 2012.

- Cantidad de energía producida: 42,84 kWh de energía calórica diaria, convertibles a 8,57 kWh de energía eléctrica al día. Con lo que es posible cubrir la energía requerida para 2 ordeñas diarias, refrigeración de la leche producida y suministrar energía para agua caliente para limpieza de sala de ordeña, además de digestato generado, disponible para la fertilización de las praderas posterior al proceso. Lo anterior suponiendo una necesidad energética de entre 0,7 y 1,5 kWh/vaca/día.

Ilustración Nro. 14: Esquema básico de un biodigestor de flujo continuo.



AgStar, s.f.

Ilustración Nro.15: Biodigestor de flujo continuo.



Ag Star, s.f.

Ilustración Nro. 16: Biodigestor de flujo continuo para 50 vacas, Puerto Octay.



Biotecsur, s.f.

Ilustración Nro. 17: Biodigestor flujo continuo para 24 vacas, Osorno.



Biotecsur, 2011a.

b) Modelo de biodigestor para una lechería de tamaño mediano⁽⁶⁾

- Tamaño de la lechería: 100 vacas a pastoreo o 25 vacas en confinamiento.
- Producción diaria de fecha y orina: 1000 Lts/día (10 Lts/día/vaca a pastoreo o 40 Lts/día/vaca confinada)
- Relación estiércol seco/estiércol húmedo: 1 / 5
- Relación unidad de peso de agua / unidad de peso de estiércol:: 1,25 / 1
- Tiempo de retención: 50 días para laguna cubierta y 25 días para mezcla completa.
- Gas producido por unidad de peso de desechos: 0,2 m³/kg.
- Densidad del purín: 1.102 kg/m³
- Producción de biogás: 20 m³/día.

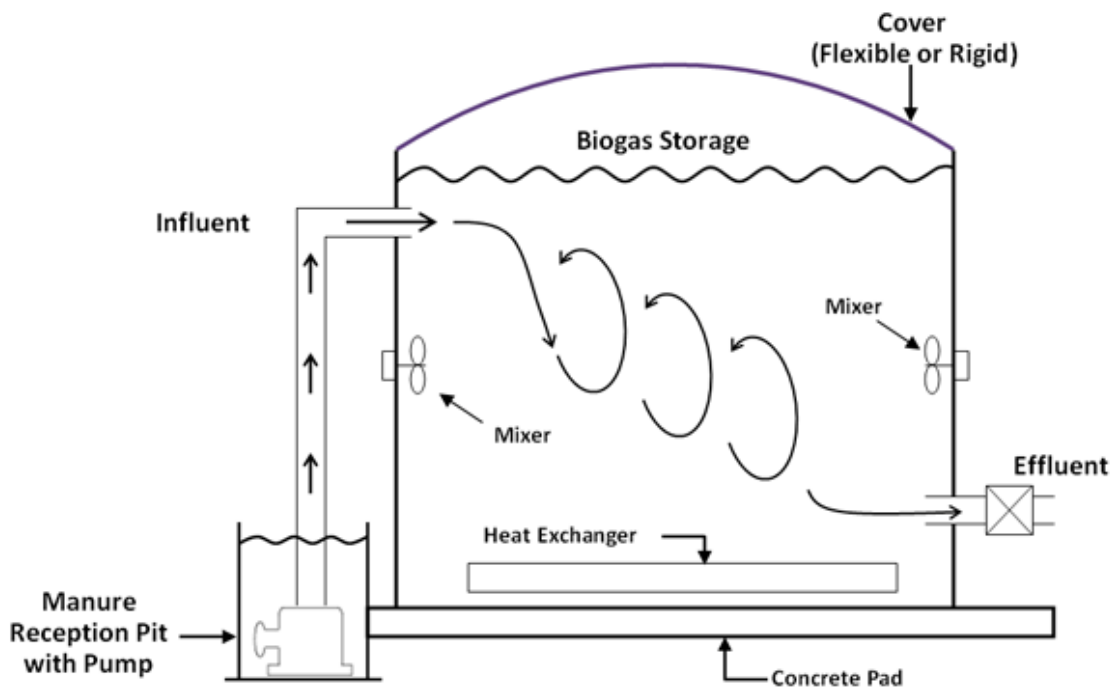
Según lo investigado, los 2 tipos de biodigestores más apropiados para la situación serian los siguientes:

- Tipo: a) Laguna cubierta o b) Mezcla completa, dadas las cantidades de purines producidas en esta situación surgen como buena alternativa estos dos modelos de biodigestores.
 - o Las lagunas cubiertas permiten recibir una gran cantidad de purines y ser mantenidos por tiempos relativamente prolongados aprovechando al máximo el potencial generador de metano. Pueden ser incorporadas fuentes de calor externas a estas lagunas en zonas frías.
 - o Los de mezcla completa tienen tiempos de retención más cortos y usualmente tienen fuentes externas de calor y mezcla por lo que son modelos más eficientes, pero más costosos de instalar y operar. Otra ventaja frente a las lagunas cubiertas es que pueden funcionar con un mayor contenido de sólidos y tener un menor tamaño por el menor tiempo de retención del contenido.
- Volumen del biodigestor: 66 m³ para laguna cubierta y 48 m³ para mezcla completa
- Componentes principales:
 - o Laguna cubierta: Membrana de polietileno flexible enterrada en la tierra, cubierta por otra membrana de polietileno del mismo grosor. Cañerías de acero inoxidable para sistema de mantención de temperatura y para conducción de purines. Bomba para llenado y vaciado de laguna.
 - o Mezcla completa: Estanque de concreto para biodigestión, bomba y aspas para sistema de agitación, bomba de llenado y vaciado de estanque, cañerías de acero

inoxidable para sistema de mantención de temperatura y para conducción de purines.

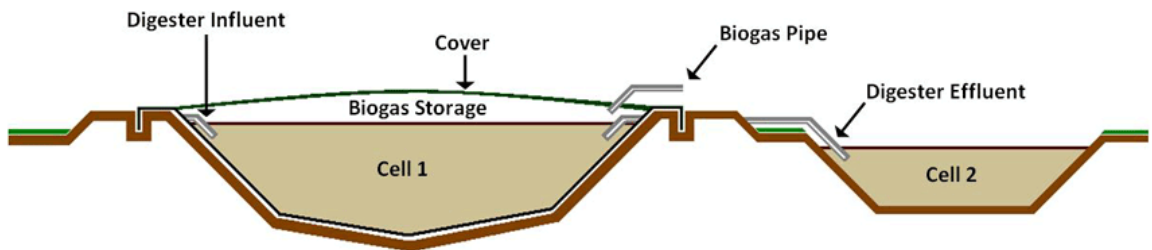
- Ambos sistemas: Generador eléctrico y Motor a biogás. Mantención de temperatura de digestor mediante calor del sistema de refrigeración del motor y termo paneles solares.
- Inversión aproximada: \$30 millones de pesos.
- Cantidad de energía producida: 136 kWh de energía calórica diaria, convertibles a 27,2 kWh de energía eléctrica al día, energía suficiente para abastecer 2 ordeñas diarias, refrigeración de la leche producida y calor para agua caliente para limpieza de sala de ordeña, además de digestato generado, disponible para la fertilización de las praderas posterior al proceso. Lo anterior suponiendo una necesidad energética de entre 0,7 y 1,5 kWh/vaca/día.

Ilustración Nro. 18: Esquema de funcionamiento de un biodigestor de mezcla completa.



AgStar, s.f.

Ilustración Nro.19: Esquema de funcionamiento de un biodigestor de tipo laguna cubierta.



AgStar, s.f.

Ilustración Nro. 20: Biodigestor de tipo laguna cubierta.



AgStar, s.f.

Ilustración Nro. 21: Biodigestor de tipo mezcla completa.



AgStar, s.f.

7. Conclusiones

El aumento en los costos energéticos, marcos regulatorios más estrictos y el aumento de la competencia en los mercados son factores que están llevando a considerar más importantemente la digestión anaeróbica de los desechos animales en la industria pecuaria. Se está comenzando a considerar esta tecnología como una manera de disminuir costos, incorporar buenas prácticas medio ambientales e incluso generar ingresos (Balsam, 2006). Es por esto que el incorporar los biodigestores anaerobios en los predios otorga varios beneficios claramente identificables y cuantificables en términos principalmente energéticos, y por tanto económicos, y ambientales.

Es importante considerar que el proceso de digestión anaerobia tiene sus complejidades y requerimientos, los que deben ser siempre atendidos y debe siempre planearse su operación en función de cumplir parámetros mínimos para optimizar el proceso y su generación de productos.

El biogás es un elemento de alto contenido energético, lo que, acompañado de una importante versatilidad en su uso, lo sitúan como un sustrato energético de importante interés comercial. Adquiere gran relevancia su uso y obtención dentro de los predios pecuarios ya que es un elemento naturalmente generado en los purines animales y de gran aplicabilidad en los procesos pecuarios especialmente en las lecherías.

Las lecherías son especialmente demandantes de energía, sin embargo cuentan con la ventaja que gracias a las características de sus procesos, una importante proporción de sus purines son recolectables y aprovechables. Ha sido identificada por muchos autores, la potencialidad de producción de energía eléctrica a partir de los purines lecheros, aprovechable dentro de los mismos predios para las demandas energéticas de ordeña mecánica, refrigeración de la leche cruda, iluminación e incluso movilización de agua y operación de maquinaria.

Dentro de los tenedores de bovinos, el sector lechero resulta de particular interés para proyectos de biogás, pues aún en sistemas de alimentación en praderas las vacas lecheras permanecen un periodo significativo del día en las dependencias de la lechería, debido a que al menos son ordeñadas dos veces por día. Además, las lecherías tienen demanda de energía asociada a su actividad la cual podría ser cubierta total o parcialmente con producción de biogás (Ubilla, 2012)

Es imprescindible tomar en cuenta las características del predio a introducir el sistema de biogás. A considerar dentro de este análisis previo se debe incluir siempre los volúmenes de purines generados, la cantidad de biogás objetivo a generar, características físicas de los purines, frecuencia de recolección de los mismos, temperatura promedio ambiente, etc. Las posibilidades de aplicación

del biogás producido también deben ser estudiadas detenidamente, ya que por los volúmenes de biogás producidos y la mayor eficiencia del proceso a mayores volúmenes, no todos los productores pueden optar a las mismas posibilidades con el producto. En términos generales, la presente memoria fija, en base a estudios recopilados, una mínima cantidad de purines obtenidos de 20 vacas en ordeña para poder acceder a la producción de electricidad en el predio sin tener que asociarse.

Para los demás casos sigue existiendo la posibilidad de aprovechar el poder calórico y explosivo de este combustible en aplicaciones de generación de calor, iluminación directa, refrigeración directa, combustión para maquinarias o bombas de agua, etc.

En nuestro país la obtención de biogás tiene un escaso desarrollo, sea cual sea su origen. Existen muchas explotaciones pecuarias, y especialmente lecherías, donde los biodigestores podrían estar funcionando, generando un enorme ahorro energético, mejorando la disposición de los purines en las praderas y disminución de la eliminación de desechos y gases de efecto invernadero al ambiente, así como los efectos locales de las explotaciones como la generación de malos olores, contribuyendo de paso a la diversificación de la matriz energética nacional. Alemania es el líder mundial en la implantación de esta tecnología, cuentan con más de 3.000 plantas de biogás en granjas con un tamaño de rebaño promedio de 50 vacas en lactancia (Shelford, 2012).

8. Discusión

En una realidad la presencia de algunas barreras en el sector pecuario que hace poco probable que estos proyectos se desarrollen a un ritmo acorde a su posible potencial, dentro de las cuales el acceso a información confiable y adaptada a la realidad nacional que permita analizar la viabilidad de los proyectos es, tal vez, la principal, especialmente en los pequeños productores (Ubilla *et al.*, 2012).

La contratación conjunta de servicios especializados y compartidos a un ente externo, o apoyar el acceso a mejores condiciones de financiación mediante créditos conjuntos, permitiría mejorar la gestión de los proyectos y reducir los costos de transacción, con un eventual establecimiento de instrumentos de fomento público para apoyar tales fines (Ubilla *et al.*, 2012).

Es una realidad que casi todos los productores lecheros pueden optar a sistemas de biogás, habiéndose generado experiencias exitosas en Chile con rebaños de tan solo 5 vacas (Biotecsur, 2013)⁽⁷⁾. Sin embargo, la difusión y masificación de estos proyectos en general está flanqueado por barreras principalmente económicas y de información como se indico anteriormente. La generación de fondos públicos así como de una entidad a cargo del asesoramiento y gestión de estos proyectos podría constituir a esta tecnología como una herramienta importantísima para el abastecimiento energético del agro, así como para la independencia económica de los pequeños agricultores y el combate del calentamiento global desde sus orígenes. En esta línea, los fondos del Servicio de Cooperación Técnica (SERCOTEC) del Ministerio de Economía, Fomento y Turismo del Gobierno de Chile ha sido un importante impulsor de estos proyectos, sobretudo en escalas pequeñas y medianas. A nivel agroindustrial, las plantas de biogás han obtenido escaso apoyo financiero y fomento, constituyendo una limitante para el giro hacia energías renovables no convencionales en la matriz energética nacional.

La posibilidad de que los pequeños productores y sus comunidades puedan contar con esta tecnología los habilitaría energéticamente de una manera sin precedentes hasta el momento, proveyendo de energía para los procesos más importantes habilitándolos a un ahorro importante o bien al acceso a nuevos y mejores mercados antes lejanos.

Según Ubilla *et al.* (2012), existe un segmento intermedio de agricultores de tamaño mediano, para los cuales la adopción de la tecnología de la biodigestión anaeróbica es más compleja. Para los pequeños agricultores los menores niveles de inversión harían viable la natural adopción de estos

⁽⁷⁾ BIOTECSUR. 2013. [Comunicación Personal]. Osorno, Chile.

sistemas, mientras que para los agricultores de gran tamaño, podrían contar con los capitales necesarios para invertir en plantas de biogás. Sin embargo, según análisis de inversión y rentabilidad, el segmento entre estos dos antes descritos tendría que sortear costos de inversión comparativamente muy altos por lo que serían especialmente necesarios para ellos instrumentos de fomento de asociatividad para poder generar economías de escala y poder adoptar esta tecnología (Ubilla *et al.*, 2012)

9. Bibliografía

- **AG STAR.** s.f. United States Environmental Protection Agency. [en línea] <<http://www.epa.gov/agstar/anaerobic/ad101/anaerobic-digesters.html>> [consulta: 10-03-2013]
- **ALFARO, M.; RAMIREZ, G.** 2012. Normativa Nacional e Internacional Aplicada a Purines y Efluentes de Lechería. **In:** Salazar, F. Manual de Manejo y Utilización de Purines de Lechería. Consorcio Lechero. Osorno, Chile. 116 p.
- **ÁLVARO, J.** 2004. Fuente de energía renovable. **In:** Castellanos, P. Energías y Medio Ambiente. Editorial Aquilafuente, Ediciones Universidad de Salamanca. Salamanca, España. pp. 217.
- **AMON, T.; AMON, B.; KRYVORUCHKO, V.; ZOLLITSCH, W.; MAYERC, K.; GRUBERD, L.** 2007. Biogas Production from Maize and Dairy Cattle Manure-Influence of Biomass Composition on the Methane Yield [en línea] <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880906001666>> [consulta: 05-03-2013]
- **APROLECHE CENTRO (ASOCIACIÓN DE PRODUCTORES DE LECHE DE LA ZONA CENTRAL); CPL (CONSEJO NACIONAL DE PRODUCCIÓN LIMPIA).** 2009. Acuerdo de Producción Limpia. Productores de Leche Bovina Región de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins [en línea] <http://www.produccionlimpia.cl/medios/APL_Lecheros_Zona_Central.pdf> [consulta: 09-01-2013]
- **ÁVILA, M.** 2012. Presupuesto y retorno Capital, Plantas Biotecsur 50-300 vacas. Osorno, Chile. Biotecsur. 19 p.
- **AVALOS, V.** 2012. Energías Renovables y las oportunidades del Biogás en Chile. Seminario Energías Renovables para el Sector Agroalimentario: Las oportunidades del biogás. Santiago, Chile. Ministerio de Energía, Gobierno de Chile. 28 p.
- **BALSAM, J.** 2006. Anaerobic Digestion of Animal Wastes: Factors to Consider. National Sustainable Agriculture Information Service (ATTRA), National Center for Appropriate Technology (NCAT), United States Department of Agriculture's Rural Business-

Cooperative Service [en línea] <http://www.agmrc.org/media/cms/anaerobic_93C56B2DEF5EE.pdf> [consulta: 29-08-2012]

- **BIOTECSUR.** 2011a. Biogás, Chile, Biotecsur, 17 KVA. [en línea] <<http://www.youtube.com/watch?v=3KkGHZF35UE>> [consulta: 27-11-2012]
- **BIOTECSUR.** 2011b. Biogás, Chile, 40 a 50 vacas en ordeña, BIOTECSUR. [en línea] <http://www.youtube.com/watch?v=aTLwMI_s6Ps> [consulta: 27-11-2012]
- **BIOTECSUR.** s.f. Proceso de producción de biogás. [en línea] <<http://www.biotecsur.cl/index1.htm>> [consulta: 25-10-2012]
- **CAAMAÑO, D.** 2011. Digestión anaerobia con biometanización de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos del Distrito Metropolitano de Quito: una aproximación teórica al desarrollo inicial en laboratorio. Quito, Ecuador. Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Internacional SEK. 21 p.
- **CARRILLO, L.** 2003. Capítulo 5: Rumen y biogás. **In:** Microbiología Agrícola. Universidad Nacional de Salta. Salta, Argentina. 16 p.
- **CPL (CONSEJO NACIONAL DE PRODUCCIÓN LIMPIA).** 2012. Guía de Mejores Técnicas Disponibles para la Aplicación de Purines del Sector Bovino en Praderas y Cultivos del Sector Agropecuario. Núcleo Biotecnología Curauma, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. [en línea] <http://www.produccionlimpia.cl/medios/guia19_purines.pdf> [consulta: 29-08-2012]
- **EXPÓSITO, G.** 2004. Modelización de Procesos Biológicos para la Eliminación de Residuos Ganaderos, Teniendo en Cuenta sus Condicionantes Especiales. Tesis Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, España. Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Ordenación del Territorio, Urbanismo y Medio Ambiente. pp. 30 – 36.
- **ESSENTIAL CONSULTING OREGON.** 2009. Dairy Manure Anaerobic Digester Feasibility Study Report. Prepared for: Volbeda Dairy, Albany, Oregon, USA. [en línea]

<http://www.oregon.gov/energy/RENEW/docs/CREFF/VolbedaFeasibilityStudy.pdf>>

[consulta: 07-03-2013]

- **FERNÁNDEZ, J.; SAAVEDRA, C.** 2007. Obtención de Biogás a Partir del Bagazo de Caña y Estiércol. Mérida, Venezuela. Revista Científica Juvenil 7: 105-118.
- **LUDINGTON, D.; JOHNSON, E.; KOEALSKI, J. MAGE, A.** 2004. Dairy Farm Energy Management Guide California. [en línea]. <http://asset.sce.com/Documents/Business%20-%20Services%20for%20Your%20Business/CompleteGuide_102005REV.pdf> [consulta 06-03-2013].
- **METCALF; E.; TCHOBANOGLIOUS, G.; LOUIS, F.; STENSEL, D.** 2003. Wastewater Engineering Treatment, Disposal, Reuse. 6ª edición. McGraw-Hill International Editions. U.S.A. (citado por Saucedo, J.; Piña, O.; Rodríguez, R.; Cruz, Y.; Espinosa, S.; Alcántara, G.; Ramírez, F.; Volke, T.; Ramírez, M.; Velasco, J.; Flores, S. 2007. Proyecto: “Degradación y Estabilización Acelerada de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) por Tratamientos Aerobios y Anaerobios”. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, México. pp. 16.)
- **MUCHNIK, E.; MELO, O.; MARÍA, C.; RODRÍGUEZ, C.; HERRERA, G.** 2008. Agenda de Innovación para la Cadena de Valor Láctea 2008-2018. [en línea] <<http://www.fia.cl/Portals/0/UDE/Documentos/Estudios%20prospectivos/Agenda%20Lactea.pdf>> [consulta: 05-07-2012]
- **NAVARRO, H.; SIEBALD, E.; CELIS, S.** 2006. Manual de Producción de Leche para Pequeños y Medianos Productores. Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP) y Centro Regional de Investigación INIA Remehue, Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. Osorno, Chile. 166 p.
- **OLTRA, O.** 2012. Revisión y Consolidación de la Normativa Sanitaria y Ambiental para Desarrollar la Actividad Lechera en Chile. Consorcio Lechero de Chile. 102 p.
- **PARRIS, K.** 2004. Agriculture, Biomass, Sustainability and Policy: an overview. **In:** OECD. Biomass and Agriculture: Sustainability, markets and policies. OECD Publications. Paris, Francia. pp. 7.

- **PEREZ, J. 2010.** Estudio y Diseño de un Biodigestor para Aplicación en Pequeños Ganaderos y Lecheros. Memoria para Optar al Título De Ingeniero Civil Mecánico. Santiago, Chile. Universidad De Chile, Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas, Departamento De Ingeniería Mecánica. 76 p.
- **RABBETTS, T.; LANG, H. 2012.** Methods and systems for milk cooling. Institut Heidelberg. [en línea] <<http://dairy.energy4farms.eu/energy-efficiency/milk-cooling/>> [consulta: 05-03-2013]
- **SALAZAR, F. 2012.** Manual de Manejo y Utilización de Purines de Lechería. Consorcio Lechero. Osorno, Chile. 116 p.
- **SAG (SERVICIO AGRÍCOLA Y GANADERO). 2006.** Diagnostico de la Problemática Ambiental de los Residuos Generados por la Producción de Aves y Vacunos de Leche en Chile y Capacitación en la Evaluación de Planteles Pecuarios [en línea] <http://www.sag.gob.cl/sites/default/files/RESIDUOS_AVES_VACUNOS_LECHE.pdf> [consulta: 09-01-2013]
- **SAUCEDO, J.; PIÑA, O.; RODRÍGUEZ, R.; CRUZ, Y.; ESPINOSA, S.; ALCÁNTARA, G.; RAMÍREZ, F.; VOLKE, T.; RAMÍREZ, M.; VELASCO, J.; FLORES, S. 2007.** Proyecto: “Degradación y Estabilización Acelerada de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) por Tratamientos Aerobios y Anaerobios”. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. pp. 11-17.
- **SHELFORD, T. 2012.** Estimating Farm Size Required to Economically Justify Anaerobic Digestion on Small Dairy Farms. [en línea]. <http://www.manuremanagement.cornell.edu/Pages/General_Docs/Events/19.Shelford.pdf> [consulta 07-03-2013].
- **TRIGO, E.; VILLARREAL, F. 2012.** La bioeconomía: el instrumento de la agricultura frente a los desafíos globales. **In:** Congreso Virtual Internacional, Reflexiones para Rio + 20, Economía Verde e Inclusión Socio-productiva: el papel de la Agricultura Familiar. Rio de Janeiro, Brasil. 09-30 abril 2012. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). pp. 1-2.

- **UBILLA, X.; VON OSTEN, K.; AVALOS, V.; ARRIAZA, J.; BRITO, M.; MARTÍNEZ, V.; SANTANA, C.; SOTO, G.; SOTO, J.; MALDONADO, G.; ROMERO, A.; MÉNDEZ, G.; CLARO, E.; DAZAROLA, F.** 2012. Proyecto “Diseño de un Instrumento de Fomento para Proyectos de Biogás – Biomasa Que Apunten a la Asociatividad de Tenedores del Recurso Biomásico”. SustenTank Asuntos Públicos. Ministerio de Energía, Gobierno de Chile. Santiago, Chile. 166 p.
- **URBÁEZ, C.; CARBALLO, L.; ARTEAGA, Y.; MÁRQUEZ, F.** 2007. Biomasa: Alternativa Sustentable para la Producción de Biogás. Departamento de Química, Facultad de Forestal y Agronomía, Universidad de Pinar del Río "Hermanos Saíz Montes de Oca" [en línea] <http://www.utchvirtual.net/recursos_didacticos/documentos/biologia/biomasa.pdf> [consulta: 09-01-2013]
- **URRA, R.** 2009. Evaluación técnico-económica para la implementación de un biodigestor anaeróbico en una lechería tipo de la Región de Los Lagos. Memoria de Título Ingeniero Agrónomo. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela de Agronomía. 149 p.
- **VIDAL, A.; RUIZ, B.; FERNANDEZ, B.; PALATSI, J.; FLOTATS, X.; BENANDALLAH, T.; ASTALS, S.; MATA, J.; ÁLVAREZ, C.; FERNÁNDEZ, L.; GARCÍA, J.; MONTERO, B.; PÉREZ, M.; ROMERO, L.; SALES, D.; SOLERA, R.; GÓMEZ, X.; CUETOS, M.; MARAÑÓN, E.; CASTRILLÓN, L.; FERNÁNDEZ-NAVA, Y.; LLANEZA, H.; MORÍS, M.; OTERO, L.; ÁLVAREZ, J.; LEMA, J.** 2009. Manual de Estado del Arte de la Co-digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales. [en línea] <http://canseixanta.cat/zi.arxiu/apergas.cat/textweb/00000070/PROBIOGAS_Manual%20de%20Estado%20del%20Arte.pdf> [consulta: 09-03-2013]
- **VÍQUEZ, J.** 2009. Biogás: energía recuperable. ECAG Informa. (50): 24.
- **WILKIE, A.** 2005. Anaerobic Digestion of Dairy Manure: Design and Process Considerations. **In:** Dairy Manure Management: Treatment, Handling, and Community Relations. Natural Resource Agriculture and Engineering Service (NRAES), Cornell University, Ithaca, New York. 176: 301-312.