

# DIAGNÓSTICO DE PLANTAS DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA EXISTENTES EN LECHERÍAS DE LAS REGIONES DE LOS RÍOS Y LOS LAGOS

*Promoviendo el desarrollo de la energía a biogás en pequeñas y medianas agroindustrias seleccionadas*

SAP-ID Proyecto UNIDO: 100181

---

## Informe de Avance

Noviembre 2016

Punto 3.1.1 de los Términos de Referencia (1.2.1 del POA)



**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS  
(INIA-Remehue)**

**Número de Contrato: 3000030580**

Coordinador de proyecto: Francisco Salazar Sperberg

Fidel Oteiza 1956 – Pisos 11 y 12,  
Providencia, Santiago, Chile



ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS  
PARA EL DESARROLLO INDUSTRIAL



## **Equipo de trabajo:**

Francisco Salazar, PhD, Ingeniero Agrónomo

Josué Martínez-Lagos, Doc., M.Sc., Ing. Ambiental

Marion Rodríguez, Mg., Bioingeniero

Marta Alfaro, PhD, Ingeniero Agrónomo

Christian Soto, Ing. Acuícola

Jorge Gontupil, PhD, Ingeniero Civil Agrícola

Juan Pablo Belmar, Mg., Ing. Civil Industrial



ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS  
PARA EL DESARROLLO INDUSTRIAL



COMITÉ CORFO



GLOBAL ENVIRONMENT FACILITY  
INVESTING IN OUR PLANET



BIOGOS  
SECTOR LECHERO

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

### CONTENIDO

.....	i
ABREVIACIONES .....	6
INTRODUCCIÓN .....	9
OBJETIVO GENERAL.....	10
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	10
METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	11
1. Generación de fichas técnicas.....	11
1.1 Levantamiento de información predial .....	11
1.2 Localización de biodigestores.....	12
2. Toma de muestras desde predios lecheros .....	13
2.1 Muestras colectadas desde biodigestores o pozo purinero .....	13
2.2 Muestras de gas.....	16
3. Cálculo de producción de biogás .....	18
3.1 Metodología de cálculo.....	18
3.2 Ejemplo de cálculo de producción de metano y biogás.....	23
4. Biogás y reducción de GEI .....	27
5. Metodología de evaluación de impacto económico.....	28
5.1 Detalle de la evaluación técnico - económica.....	28
ANÁLISIS Y RESULTADOS .....	34
1. Identificación y diagnóstico de biodigestores.....	34
2. Análisis físico-químico de purines y efluentes .....	48
3. Indicadores de biodigestores en los predios encuestados .....	52
3. Evaluación del potencial de mitigación en predios con digestión anaeróbica.....	60
4. Resultados de evaluación económica de plantas de biogás en funcionamiento .....	61
4.1 Plantas en funcionamiento bajo una condición actual y mejorada .....	61
LOGROS Y FALLAS EN LA TECNOLOGÍA IMPLEMENTADA EN LOS BIODIGESTORES ANAERÓBICOS DEL ÁREA DE ESTUDIO (LECCIONES APRENDIDAS).....	63
Logros y aspectos positivos .....	63
Principales problemas asociados al éxito de los biodigestores.....	64
PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL MONITOREO DE PROYECTOS DE BIOGÁS EN EL TIEMPO. ....	67
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	70
Conclusiones .....	70
Recomendaciones .....	71
REFERENCIAS.....	76
ANEXOS .....	79

Anexo 1. Referencias asociadas a base de datos de biodigestores en predios lecheros de las regiones de Los Ríos y Los Lagos.....	79
Anexo 2a. Encuesta Biodigestores: Aspectos generales y específicos de biodigestores implementados en predios lecheros en Regiones de Los Ríos y Los Lagos.....	81
Anexo 2b. Fichas de proyectos de biogás para el sector lechero dentro de la zona de estudio, Región de Los Ríos y Región de Los Lagos. ....	86
Anexo 2c. Coordenadas UTM biodigestores (versión digital en CD).....	87
Anexo 3a. Hoja de datos de la evaluación económica.....	88
Anexo 3b. Resultados evaluación económica.....	90
Anexo 3c. Resultados en el modelo de negocios.....	94
Anexo 4. Formulario de inscripción de biodigestores ante la SEC (fuente: <a href="http://www.sec.cl/portal/page?_pageid=33,6527711&amp;_dad=portal&amp;_schema=PORTAL">http://www.sec.cl/portal/page?_pageid=33,6527711&amp;_dad=portal&amp;_schema=PORTAL</a> )	97

## ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Ubicación geográfica de biodigestores en predios lecheros, regiones de Los Ríos y Los Lagos (georreferenciación por sistema GIS, Google™).....	14
14	
Imagen 2. Clasificación de biodigestores .....	15
Imagen 3. Biodigestores existentes en la Región de Los Lagos y de Los Ríos (n=14).....	35
Imagen 4. Participación porcentual de predios lecheros con biodigestor en la Región de Los Lagos y la Región de Los Ríos. ....	35
Imagen 5. Cantidad de vacas en ordeña por predio expresado en porcentaje (n=10).....	36
Imagen 6. Cantidad de biodigestores con sistema de calefacción y agitación (n=10).....	44
Imagen 7. Tipo de energía de reemplazo por biogás (n=10). ....	45
Imagen 8. Biodigestores que poseen filtro para H <sub>2</sub> S (n=10). ....	46
Imagen 9. Inversión realizada para implementación de biodigestores por predio.....	47
Imagen 10. Tipo de financiamiento para construcción de biodigestores (n=10).....	47
Imagen 11. Producción de CH <sub>4</sub> y biogás por predio en condiciones actuales.....	57
Imagen 12. Producción de CH <sub>4</sub> y biogás por predio en condiciones mejoradas. ....	57
Imagen 13. Potencial energético por predio en base a SVt, en condiciones actuales y mejoradas.	58
Imagen 14. Potencial eléctrico por predio en base a SVt, en condiciones actuales y mejoradas. .	58
Imagen 15. Potencial térmico por predio en base a SVt, en condiciones actuales y mejoradas...	59
Imagen 16. Emisiones (kg CO <sub>2</sub> eq año <sup>-1</sup> ) para predios con biodigestores instalados en las regiones de Los Ríos y de Los Lagos. ....	60

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Identificación y estado de los biodigestores .....	12
Tabla 2. Parámetros físico químicos analizados sobre muestras de biogás, afluente y efluente de biodigestor y, purín de pozo de predios lecheros.....	17
Tabla 4. Tecnología de plantas en funcionamiento. ....	33
Tabla 5. Datos de manejo predial en biodigestores encuestados. ....	37
Tabla 6. Producción de purines por predio encuestado en las Regiones de Los Ríos y Los Lagos.	39
Tabla 7. Capacidad de biodigestores por predio. ....	43
Tabla 8. Caracterización de afluentes, efluentes y purines de biodigestores a escala comercial. .	50
Tabla 9. Caracterización de afluente y efluente de biodigestor experimental. ....	51
Tabla 10. Análisis de DQO y alcalinidad de afluentes, efluentes y purines. ....	51
Tabla 11. Estimación en la producción de CH <sub>4</sub> y biogás bajo condiciones actuales y mejoradas.	55
Tabla 12. Estimación de potencial energético, eléctrico y térmico bajo condiciones actuales y mejoradas. ....	56
Tabla 13. Reglamentación para el inicio, mantención, modificación y término de actividades en plantas de biogás. ....	73
Tabla 14. Bases de datos internacionales de biodigestores.....	75

## Abreviaciones

**B/C:** Relación Beneficio/Costo

**BIOREN:** Bioresource Nucleus (Universidad de la Frontera)

**Bo:** Potencial de emisión de CH<sub>4</sub> del estiércol

**Ca:** Calcio total

**CaCO<sub>3</sub>:** Carbonato de calcio

**CERs:** Reducciones Certificadas de Emisiones

**CH<sub>4</sub>:** Gas metano

**CIFES:** Centro para la Innovación y Fomento de las Energías Sustentables

**CNF:** Factor de conversión de metano

**CORFO:** Corporación de Fomento de la Producción

**CO<sub>2</sub>:** Dióxido de Carbono

**Cu:** Cobre total

**DA:** Digestores Anaeróbicos

**DFL:** Decreto con Fuerza de Ley

**DQO:** Demanda Química de Oxígeno

**EPDM:** Caucho etileno-propileno-dieno

**Fe:** Hierro total

**GEG:** Greenhouse Effect Gases

**GEI:** Gases con Efecto Invernadero

**GIS:** Geographic Information System

**GORE:** Gobierno Regional

**H<sub>2</sub>S:** Ácido sulfhídrico

**HRT:** Hydraulic Retention Time

**INDAP:** Instituto de Desarrollo Agropecuario

**INE:** Instituto Nacional de Estadísticas

**INGEI:** Inventario Nacional de Gases con Efecto Invernadero

**INIA:** Instituto de Investigaciones Agropecuarias

**INN:** Instituto Nacional de Normalización

**IVA:** Impuesto al Valor Agregado

**K:** Potasio total

**K<sub>2</sub>O:** Óxido de potasio

**MDL:** Mecanismo de Desarrollo Limpio

**Mg:** Magnesio total

**MgO:** Óxido de magnesio

**Mn:** Manganeseo total

**N<sub>2</sub>:** Nitrógeno gaseoso

**Na:** Sodio total

**NCh:** Norma Chilena

**Nkj:** Nitrógeno kjeldahl

**O<sub>2</sub>:** Oxígeno

**P:** Fósforo total

**P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:** Ácido fosfórico

**POA:** Plan operativo Anual

**PVC:** Policloruro de Vinilo

**SEA:** Servicio de evaluación ambiental

**SEC:** Superintendencia de Electricidad y Combustibles

**SVa:** Sólidos volátiles agregados

**SV:** Sólidos volátiles

**TCD:** Cromatografía de gases con detector de conductividad térmica

**TIR:** Tasa Interna de Retorno

**TRH:** Tiempo de Retención Hidráulica

**ULA:** Universidad de Los Lagos

**UTM:** Universal Transversal Mercator (sistema de coordenadas universal transversal de Mercator)

**VAN:** Valor Actual Neto

**WAC:** Water Analysis Center

**Zn:** Zinc total

## Introducción

En el presente informe se entrega antecedentes de la evaluación del estado de los proyectos de biogás presentes en las regiones de Los Ríos y Los Lagos (Chile), con el fin de obtener información técnico-económica que permita realizar mejores prácticas y establecer mejores modelos de negocio para este tipo de sistemas lecheros del Sur de Chile. Se presentan los antecedentes metodológicos y resultados de las visitas técnicas realizadas a los biodigestores y predios lecheros seleccionados ubicados en las regiones en estudio. Asimismo, se da cuenta de la información obtenida en relación a la identificación y localización de todos los biodigestores establecidos en predios lecheros de estas regiones, además de reportar su estado actual, ubicación y tipo de tecnología utilizada en construcción y operación. Esto permitió la generación de una base de datos para proyectos de biodigestión anaeróbica, conteniendo la información e indicadores para el monitoreo de estos mismos en el tiempo.

Se analizaron las variables de generación para cada predio, las cuales están asociadas al monitoreo de parámetros físico químicos y caracterización de purines por biodigestor. Éstas permitieron estimar el potencial de producción de biogás, bajo las condiciones actuales (4 predios en funcionamiento) y estimaciones basadas en las mejoras de sus condiciones de funcionamiento (10 predios con biodigestores), principalmente en base a mejorar el contenido de materia seca del sustrato de entrada y con ello el potencial de generación de metano y de energía eléctrica y/o térmica. Se cuantificó la mitigación de las emisiones de CH<sub>4</sub> en los predios evaluados y se realizó una evaluación técnico económica de las plantas de biogás, analizando los elementos de inversión, operación-mantenimiento y rentabilidad para la determinación de indicadores económicos comparados en cada caso.

La información generada ha sido sistematizada en fichas técnicas para cada predio. El estudio ha permitido identificar además, los principales logros y fallas como producto de la implementación de plantas de biogás en sistemas productivos lecheros de las regiones de Los Ríos y Los Lagos.

## Objetivo general

- Evaluar el estado de proyectos de biogás en las Regiones de Los Ríos y Los Lagos, para obtener y analizar información técnica y económica que permita generar mejores prácticas y modelos de negocio adecuados al sector lechero en Chile.

## Objetivos específicos

Los objetivos específicos de este trabajo fueron:

- Realizar un diagnóstico de los digestores anaeróbicos en el sector lechero con énfasis en las Regiones de Los Ríos y los Lagos.
- Determinar el impacto (% de penetración y logro) de tecnologías para digestores anaeróbicos del sector lechero en las regiones bajo estudio, de acuerdo al tamaño predial, con énfasis en predios entre 100 a 500 cabezas de animales.
- Acceder a la información de manera simple a través de fichas técnicas.
- Desarrollar una propuesta metodológica para el monitoreo de proyectos de biogás en el tiempo, con la finalidad de tener una base actualizada y proyectos identificados.
- Identificar las principales causas de logros y fallas en la tecnología implementada en los biodigestores anaeróbicos del área de estudio (lecciones aprendidas).

## Metodología de trabajo

### 1. Generación de fichas técnicas

#### 1.1 Levantamiento de información predial

La colecta de información de los biodigestores establecidos en el sector lechero de las Regiones de Los Ríos y Los Lagos de Chile, se llevó a cabo en base a información obtenida desde distintas fuentes, esto es a través de documentos de estadística nacional, informes ministeriales, fuentes oficiales de agentes de gobierno, organizaciones y empresas oferentes de esta tecnología, publicaciones técnicas, información disponible en la web (Anexo 1), diarios, prensa e información de empresas lecheras y del INIA, junto con la provista por la coordinadora regional del programa de biogás, la Srta. Marianela Rosas, quien realizó un informe con datos georreferenciados sobre los predios existentes en estas regiones. Esta revisión exhaustiva permitió la identificación, a saber, de todos los biodigestores establecidos en las Regiones de Los Lagos y de Los Ríos, pudiendo caracterizar un total de 14 predios lecheros que contaban con esta tecnología. Dado el bajo número de biodigestores presentes en la zona, se optó por coleccionar la información de todos los proyectos existentes reportados a la fecha. Cabe destacar que posterior a la generación de este informe se han iniciado dos proyectos de digestores anaeróbicos en la región de Los Lagos, los cuales han tenido financiamiento de la Fundación para la Innovación Agraria (FIA). Uno de estos proyectos está en etapa de construcción y el otro en etapa de diseño.

La recolección de datos se realizó de forma presencial mediante la visita a cada uno de los predios, donde se colectó información técnico-económica a través de un cuestionario tipo generado específicamente para este estudio (Anexo 2a). La información obtenida fue luego digitalizada en fichas electrónicas (formato hoja de trabajo de Microsoft® Excel® 2011) y compartida como Anexo 2b para su fácil acceso. Los aspectos generales considerados en la encuesta incluyeron: la identificación del biodigestor y predio lechero; características técnicas de los mismos; aspectos de manejo animal y predial; manejo de purines y aguas sucias. También, se registró la forma de manejo de cada biodigestor, uso del biogás generado, manejo de digestato, indicadores de biodigestión, aspectos económicos y ambientales, entre otros aspectos considerados importantes para el correcto diagnóstico de las plantas de biogás. La información de los cuestionarios fue revisada cuidadosamente para detectar datos erróneos que pudiesen alterar los análisis de los mismos, volviendo a consultar información al predio si así se requería.

De forma complementaria, a cada predio se le asignó un código de identificación en base al orden de visita y región en la que se encuentra, con el fin de mantener en reserva su identificación durante el registro de información y muestreo en terreno. La identificación y el estado de los biodigestores considerados en la base de datos se resume en la Tabla 1.

## 1.2 Localización de biodigestores

La ubicación geográfica de cada biodigestor (Imagen 1) se registró tanto en coordenadas decimales, para acceder vía hipervínculo en Google Maps, como en coordenadas UTM, accediendo a la georreferenciación mediante el sistema GIS, Google™ (Google Earth). El respaldo de estas coordenadas UTM se encuentra en un archivo electrónico (.KMZ) generado por Google Earth, (Anexo 2c, ver archivo digital).

**Tabla 1. Identificación y estado de los biodigestores**

Región	ID Predio	Nombre de predio	Visitado	Estado de biodigestor
Los Lagos	1-10		Sí	Operativo
	2-10		Sí	No operativo, en construcción
	3-10		Sí	Operativo
	4-10		Sí	Operativo
	5-10		Sí	Operativo
	6-10		Sí	No operativo
	7-10		Sí	No operativo
	8-10		Sí	No operativo
	9-10	Biodigestor experimental INIA Remehue	Sí	Operativo
	10-10	Sin información	No	No operativo
	11-10	Sin información	No	No operativo
Los Ríos	1-14		Sí	No operativo
	2-14		Sí	Operativo (nuevo)
	3-14		Sí	Puesta en marcha (nuevo)

Fuente: Elaboración propia (2016).

## 2. Toma de muestras desde predios lecheros

### 2.1 Muestras colectadas desde biodigestores o pozo purinero

Además del registro de información, se recolectaron muestras de purines de acuerdo a la metodología propuesta por Salazar et al. (2007) y/o digestato siguiendo un protocolo elaborado por INIA para estos fines (Tabla 2).

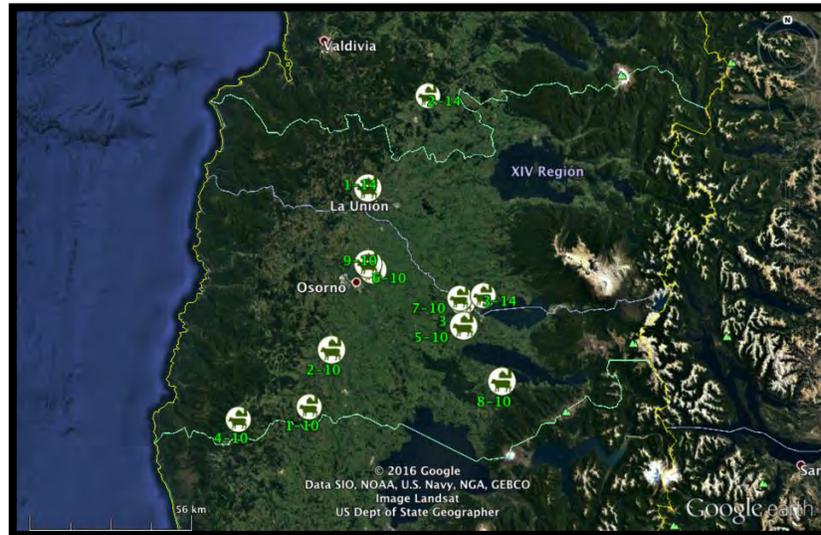
Los biodigestores fueron clasificados en tres categorías según su condición actual (Imagen 2):

- Biodigestores funcionando (n = 6)
- Biodigestores sin funcionar (n = 7)
- Biodigestor experimental (n = 1)

Dentro de los biodigestores en funcionamiento, se considera también 1 biodigestor nuevo operativo (2-14) y 1 biodigestor nuevo en etapa de puesta en marcha (3-14) (Imagen 2). Sin embargo, éstos no fueron considerados en los análisis económicos ni de mitigación de gases para la condición actual, por su baja o nula producción de gas a la fecha de su visita.

En todas las plantas de biogás operativas se procedió a recolectar una muestra tanto del purín de entrada (afluente) como del digestato generado (efluente). Para los biodigestores nuevos y en etapa de puesta en marcha, a solicitud de INDAP no se colectaron muestras de afluentes ni de efluentes (2-14 y 3-14). Esto debido a que estos biodigestores fueron construidos como parte de una iniciativa GORE-INDAP, financiada a través de uno de los programas de Política Regional de Desarrollo Silvoagropecuario que aún se encuentra en etapa de evaluación por el proveedor de esta tecnología, por lo que se solicitó expresamente por parte de INDAP que no realizáramos toma de muestras a esta etapa del proyecto.

**Imagen 1. Ubicación geográfica de biodigestores en predios lecheros, regiones de Los Ríos y Los Lagos (georreferenciación por sistema GIS, Google™).**



Fuente: Elaboración propia en base a Google Earth (2016).

Dentro de la clasificación de biodigestores sin funcionar, donde se consideraron tanto las plantas que se encuentran en construcción como aquellas que debieron cesar su actividad debido a una mantención o deterioro con el tiempo, se recolectó una muestra desde el pozo purinero previamente homogenizado (de ser posible) según la metodología descrita por Salazar et al. (2003), lo que junto a información promedio de los otros biodigestores permitió la estimación del potencial de generación de biogás de la planta.

En el caso del biodigestor de INIA Remehue, dada su condición de piloto experimental, fue posible la recolección de muestras y monitoreo de parámetros bajo la misma metodología descrita, con una mayor frecuencia. De esta forma, los valores reportados para el biodigestor experimental corresponden a un promedio de análisis en distintas fechas.

## Imagen 2. Clasificación de biodigestores



Fuente: Elaboración propia (2016).

Durante la encuesta se colectó una muestra de 1 L para análisis de purín por biodigestor visitado el cual fue analizado en el laboratorio de Nutrición Animal y Medio Ambiente de INIA Remehue. Este análisis consideró la determinación de materia seca mediante el secado de la muestra a 105°C por 24h. De forma complementaria, el contenido de cenizas y sólidos volátiles se determinó por la ignición en un horno de mufla a 550 °C de las muestras previamente secadas por 1h.

La determinación de nitrógeno Kjeldahl (Nkj) se realizó mediante la utilización de un catalizador y una digestión de la muestra por 2h, mientras que la determinación de nitrógeno amoniacal se realizó desde una muestra fresca, utilizando óxido de magnesio (MgO). Ambas muestras fueron leídas a través de destilador. Finalmente, el nitrógeno orgánico se calculó mediante la diferencia entre el nitrógeno total y nitrógeno amoniacal (en % peso seco).

La medición de fósforo (P) se determinó mediante método colorimétrico y, el resto de macro y micronutrientes (K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Na y Zn) mediante la lectura a través de un espectrofotómetro de absorción atómica.

Además, se recolectó otra muestra de 100 mL para análisis físico químico en el laboratorio de Aguas Residuales de la Universidad de Los Lagos. En todas estas muestras se realizó la medición de pH y temperatura, además de medir la Demanda Química de Oxígeno (DQO) según

la norma NCh 2313/24 Of. 97 y alcalinidad total mediante el método descrito por Merck para análisis de agua.

## 2.2 Muestras de gas

En 5 de los predios visitados, los cuales contaban con un biodigestor operativo, fue posible coleccionar una muestra de biogás. Las muestras se obtuvieron utilizando una jeringa de plástico 60 ml (BD Plastipak™), la cual contenía acoplada una llave tres pasos y una aguja hipodérmica 23G x 1". El punto de muestreo se ubicó desde una salida de biogás, adaptando a través de un acople de nitrilo al diámetro de la línea de gas una válvula de heparina para la inyección de la aguja. Para el caso del muestreo desde el biodigestor experimental, la recolección de biogás se obtuvo desde la válvula de purga del compresor.

Las muestras fueron almacenadas en viales de vidrio (PerkinElmer@precisely-N93306079) de 22 mL, a los que previamente se les realizó un vacío. Estos frascos de vidrio contenían un tapón (CSC; 1000x20-CB3), el cual evitaba las posibles fugas de aire una vez obtenida la muestra. Durante la toma de muestra, se hizo circular el biogás coleccionado unas dos veces por la jeringa antes de obtener la muestra final de 50 ml. Se realizó la recolección total de 2 muestras en cada biodigestor, enviándose a analizar en el laboratorio del Centro de Manejo de Residuos y Bioenergía, BIOREN, de la Universidad de la Frontera. El detalle en la metodología de los análisis realizados, tanto en purines como en biogás, se muestra en la Tabla 2. Entre los análisis a realizar se solicitó la posibilidad de medir la concentración de H<sub>2</sub>S presente en el biogás, sin embargo por problemas de estandarización de la técnica en el laboratorio de análisis no fue posible su medición. Cabe destacar que la concentración de este gas en general es baja en comparación a los otros gases presentes en el biogás.

**Tabla 2. Parámetros físico químicos analizados sobre muestras de biogás, afluente y efluente de biodigestor y, purín de pozo de predios lecheros.**

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>
<b>pH</b>	Medición en terreno mediante pHmetro impermeable modelo HI991002, Hanna Instruments.
<b>Temperatura</b>	Medición mediante equipo medidor impermeable modelo HI991002, Hanna Instruments, sonda para temperatura en grados Celsius (°C).
<b>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</b>	Análisis realizado en laboratorio de Análisis de Agua (WAC) de la Universidad de Los Lagos (ULA) según la NCh 2313/24 Of. 97. Laboratorio acreditado por el Instituto Nacional de Normalización (INN) según el sistema de gestión NCh-ISO 17025:2005. DQO es expresado en mgO <sub>2</sub> /L.
<b>Alcalinidad total</b>	Análisis realizado en laboratorio WAC según la metodología Merck para análisis de agua. Alcalinidad total es expresada en mgCaCO <sub>3</sub> /L.
<b>Sólidos totales</b>	Análisis realizado en el laboratorio de Nutrición y Medio Ambiente, INIA Remehue. La determinación se realizó mediante método gravimétrico, a través del secado de muestra en horno con aire forzado a 105 °C por 24h. Valor se reporta en informe como porcentaje de “Materia Seca”.
<b>Sólidos volátiles</b>	Análisis realizado en laboratorio de Nutrición y Medio Ambiente, INIA Remehue. La determinación se realizó mediante método gravimétrico, a través del secado de muestra en horno con aire forzado a 105 °C por 24 h y luego a 550 °C por 1h.
<b>Macro y micronutrientes</b>	Análisis de purín completo realizado en laboratorio de Nutrición y Medio Ambiente de INIA Remehue bajo la metodología descrita para caracterización de purines por Salazar et al., 2007. Ensayo incluye medición de Materia Seca, Carbono, Conductividad Eléctrica, Nitrógeno Kjeldahl, Nitrógeno Orgánico, Nitrógeno amoniacal, Nitrato, Fósforo, Potasio, Calcio, Magnesio, Sodio, Zinc, Hierro y Cobre.
<b>Composición de biogás</b>	Análisis de composición de biogás (CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> y O <sub>2</sub> ) por cromatografía de gases con detector de conductividad térmica (TCD). Ensayo realizado en Centro de Manejo de Residuos y Bioenergía, BIOREN, Universidad de la Frontera, Temuco.

Fuente: Elaboración propia (2016).

### 3. Cálculo de producción de biogás

#### 3.1 Metodología de cálculo

**Volumen de purines y afluente:** los volúmenes de purines generados se calcularon utilizando la metodología propuesta por Salazar et al., (2003), que considera entre otros factores, fecas y orina relacionadas al peso vivo promedio de los animales (y raza del animal), el sistema de producción, manejo, y contribución de aguas sucias y limpias. Cabe destacar que dadas las condiciones pluviométricas de la zona sur del país, casi la mitad del volumen de los purines generados en los predios lecheros se debe al uso de agua de lavado y la contribución de aguas lluvia. Además, debido a las características de producción en la misma región de estudio, los predios funcionan bajo un sistema principalmente pastoril, con un bajo grado de confinamiento, el que normalmente ocurre durante la ordeña y previo o posterior a ésta en un patio de alimentación. En consecuencia, un gran porcentaje de los purines generados es retenido en la pradera.

Dada la escasa o nula información proporcionada en los predios con respecto al manejo de aguas, durante la encuesta se midieron y cuantificaron las diferentes construcciones asociadas a la lechería (con techo y sin techo) con el fin de estimar los volúmenes de agua de limpieza y aguas lluvia que contribuyen a la producción de purines. Para el cálculo de esta última, se utilizó la información pluviométrica de la estación meteorológica de la red Agromet INIA (<http://agromet.inia.cl>) más cercana al predio encuestado. Además, se estimó la cantidad de agua aportada por la limpieza de pisos, instalaciones, equipos de ordeña y estanque enfriador, en base a información proporcionada en el predio o a información promedio para lecherías de la zona sur del país según Salazar et al. (2003). En la mayoría de los biodigestores se pudo observar la utilización de decantadores como sistema de remoción de sólidos desde purines, lo que es recomendable para este tipo de sustrato evitando la acumulación de sólidos al interior de los reactores que carecen de sistemas de agitación.

Una vez estimada la producción de purines totales por predio ( $\text{m}^3/\text{año}$ ), se procedió a calcular el volumen de afluente que ingresa al biodigestor, descontando un 3% del volumen de purines (retenido como sólidos), y considerando el porcentaje de purines que cada predio destina al biodigestor, que va desde un 1% hasta un 100%. Esto consideró el diseño propio de cada reactor para un manejo de rangos óptimos en el Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) y una tasa de carga orgánica adecuada para los biodigestores en estudio (Cheng, 2009).

En el caso del biodigestor experimental de INIA Remehue, se colecta un volumen diario de 120 L de purines desde el patio de espera, los cuales son colocados en una piscina de mezcla y se completan a un volumen de 500 L con agua caliente. Posteriormente, la mezcla es filtrada a través de un tamiz estático. Considerando la remoción de sólidos por el tamiz y por ende una disminución en el volumen de purines ingresados al reactor, el afluente del biodigestor experimental es de 450 L/predio/día.

**Sólidos totales (materia seca) y sólidos volátiles:** para determinar los sólidos totales en el afluente, en los casos en que el digestor se encontraba operando, se tomó una muestra del purín justo antes de ingresar al digestor, luego de haber pasado por el sistema de separación de sólidos, o por el tamiz estático en el caso del biodigestor experimental. En los casos en que el digestor no se encontraba en operación, se tomó una muestra de purín desde los pozos purineros. Todas las muestras se analizaron en el laboratorio de INIA Remehue para determinar su contenido de ST y SV de acuerdo a la metodología descrita previamente. Estos valores obtenidos desde las muestras se utilizaron como base para la estimación de metano en la situación actual. Para la condición mejorada se consideró el ajuste de ST a un valor adecuado para los diferentes tipos de biodigestor siendo 2% para laguna cubierta, 5% para mangas plásticas (flujo pistón) y 6% para mezcla completa, tomando como base los criterios establecidos por USDA (2009), y considerando que el porcentaje de SV no varía. El ajuste de ST se logra usando separadores de sólidos o diluyendo el purín con agua cuando los ST son superiores al valor deseado, y mejorando el uso y gestión del agua cuando el purín estaba muy diluido o haciendo un mejor uso de los separadores cuando éstos están reteniendo demasiados sólidos. Este ajuste afecta el volumen de purines conducidos al biodigestor de algunos predios, aumentando o disminuyendo dicho volumen según sea el caso. Cuando no fue posible tomar muestras de afluentes en los predios, se asumió el valor de objetivo para ST y el valor promedio de SV obtenidos de los predios muestreados.

Cabe señalar que los valores de ST, SV y el resto de parámetros reportados para el biodigestor experimental corresponden a análisis obtenidos desde el 1 de julio del 2016 en adelante, fecha en que se implementó el sistema de tamiz estático para este biodigestor.

**Número de vacas que aportan al biodigestor:** el número de vacas que aportan al biodigestor se determinó caso a caso multiplicando el número de vacas en ordeña por la fracción que representa el volumen de afluente que ingresa al biodigestor, en relación al volumen de purines totales generados por cada predio. Cuando dicho parámetro era desconocido, dado que el digestor no está en operación, se estimó el número de vacas que aportan al digestor de manera de obtener una tasa de carga orgánica cercana a la señalada en el modelo (Safley y Westerman, 1994) y un TRH coherente con los valores recomendados para las condiciones de temperatura de la zona en estudio (cercano a 50 días).

En el caso del biodigestor piloto, se estimó el número de vacas en ordeña que aportan al biodigestor considerando una carga de 120 L de purines al estanque de mezcla previo a la dilución. Considerando un peso promedio de las vacas de 550 Kg, un período de confinamiento de 3 h y un contenido de materia seca del 10%, se estimaron 17 vacas en ordeña que aportan al biodigestor.

**Capacidad del Biodigestor:** fue estimada en base a la suma de la capacidad total líquida ( $m^3$ ) de todos los biodigestores disponibles en el predio, cuyo número era variable dependiendo de las dimensiones del terreno. Se consideraron aquellos biodigestores que disponían de gasómetro y que la producción de biogás contribuía alimentando la línea de gas hacia la caldera o generador. No obstante, se realizó una excepción con el predio 5-10 cuyo tercer biodigestor no fue considerado para los análisis económicos, ya que si bien estaba conectado a la línea de gas, el

aporte de biogás era mínimo por funcionar como receptor de aguas lluvia y aguas de lavado. En el caso de los predios en que estaba disponible, se utilizó la información proporcionada por el fabricante, o su capacidad líquida se estimó en base las mediciones del largo, ancho, profundidad y talud de los biodigestores.

**Tiempo de Retención Hidráulico (TRH):** es un parámetro muy importante en el proceso de producción de biogás ya que indica el tiempo promedio que permanece el sustrato en el digestor y por lo tanto el tiempo que tienen los microorganismos para digerir el sustrato. Para el caso de los biodigestores anaerobios este valor se expresa usualmente en días, y se calcula dividiendo el volumen del biodigestor ( $m^3$ ) por el volumen diario de afluente ( $m^3/día$ ), donde este último corresponde al volumen de afluente total generado por año dividido por 365 días.

**Capacidad del biodigestor instalada:** para obtener una idea del tamaño del biodigestor en relación al número de vacas de ordeña en cada plantel lechero, se determinó la capacidad del biodigestor instalada en  $m^3/vaca$  ordeña, que corresponde a la capacidad total de biodigestores en el predio ( $m^3$ ) dividido por el promedio anual de vacas en ordeña que aportan al biodigestor.

**Determinación de la producción de metano:** debido a la inexistencia de registros de la cantidad de biogás generado en todos los biodigestores analizados, se procedió a determinar dicho valor de forma teórica, utilizando la información colectada en el predio, los distintos análisis físicos químicos realizados a afluentes y/o efluentes, y muestras de gas en los biodigestores operativos. Numerosos estudios han estimado el rendimiento de biogás o metano en función de la cantidad de materia orgánica ingresada al biodigestor en términos de sólidos volátiles agregados (SVa). En el caso de purines de lecherías, se han reportado producción de metano ( $B_0$ ) que van normalmente desde  $0,13 m^3 CH_4/Kg SVa$  hasta  $0,24 m^3 CH_4/Kg SVa$  dependiendo de las condiciones a las cuales operan los biodigestores y de las prácticas de las lecherías (Hill et al., 2000; Safley y Westerman, 1994). Otra forma de estimar la producción de biogás es a partir de la DQO degradado en el proceso de digestión anaerobia, es decir, la diferencia entre el DQO en el afluente y el DQO en el efluente, lo que puede ser medido sólo en los biodigestores en operación, que son la minoría. Al estimar la producción de biogás a partir de los SV del afluente, es posible estimar la producción de biogás en todos los predios ya que en todos ellos se pudo tomar muestras del afluente del biodigestor o una muestra de los purines que serían introducidos en el biodigestor en el caso que estuvieran en funcionamiento. Por dicha razón, en este caso se determinó el rendimiento de metano utilizando el modelo realizado por Safley y Westerman (1994) quienes estimaron dicho rendimiento para purines de lecherías en condiciones de bajas temperaturas en un rango de 10 a 23°C utilizando cargas orgánicas de 0,1 y 0,2 Kg SV/ $m^3$ -día, condiciones similares a las encontradas en nuestros casos de estudio. Dicho modelo se presenta a continuación.

Para carga orgánica = 0,1 Kg SVa/ $m^3$ -día  $B = 0,1153 + 0,0053 T$

Para carga orgánica = 0,2 Kg SVa/ $m^3$ -día  $B = 0,0820 + 0,0063 T$

Donde:

B = Producción de metano o biodegradabilidad del purín ( $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{Kg SVa}$ )

T = Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )

Se utilizó el modelo de  $0,1 \text{ Kg SVa}/\text{m}^3\text{-día}$  de carga orgánica para los predios con carga orgánica menor a  $0,15 \text{ Kg SVa}/\text{m}^3\text{-día}$ . Para los casos donde la carga orgánica es igual o mayor a  $0,15 \text{ Kg SVa}/\text{m}^3\text{-día}$  se utilizó el modelo para carga orgánica de  $0,2 \text{ Kg SVa}/\text{m}^3\text{-día}$ .

Junto con esto, para los predios estudiados se midió la temperatura del efluente del biodigestor (o temperatura del purín dependiendo del caso) en la cual se registró un promedio de  $13^{\circ}\text{C}$ . Este valor además coincide con el promedio anual de temperatura del suelo en las regiones en estudio y se consideró dicha temperatura en la determinación tanto del rendimiento de metano real como en la condición mejorada para cada uno de los predios que poseen biodigestores sin sistema de calefacción, que son todos los predios a excepción del 2-10 (Liceo Vista Hermosa) y 5-10. Sin embargo, para este último se consideró también un promedio de  $13^{\circ}\text{C}$  puesto que el efecto térmico de su intercambiador de calor es despreciable en la sumatoria de la temperatura de todos sus biodigestores.

Así, se obtuvo un valor de rendimiento de metano de  $0,184 \text{ m}^3 \text{CH}_4/\text{Kg SVa}$  para cargas orgánicas menores a  $0,15 \text{ Kg SVa}/\text{m}^3\text{-día}$  y  $0,164 \text{ m}^3 \text{CH}_4/\text{Kg SVa}$  para cargas orgánicas mayores o iguales a  $0,15 \text{ Kg SVa}/\text{m}^3\text{-día}$ . En el caso del predio 2-10 que posee sistema de calefacción y funcionará a  $35^{\circ}\text{C}$ , el modelo de Safley y Westerman no aplica, por lo tanto se utilizó un rendimiento de metano de  $0,232 \text{ m}^3 \text{CH}_4/\text{Kg SVa}$ , acorde a las condiciones de dicho biodigestor (Montalvo y Guerrero, 2003). Asimismo, se determinó el rendimiento optimizado de metano para cada lechería asumiendo condiciones mejoradas en la cantidad de sólidos totales que ingresan al biodigestor.

**Producción de biogás:** el volumen de biogás generado se determinó a partir de la producción de metano y del porcentaje de metano en el biogás, para lo que se utilizó un valor ponderado de metano, que considera el 100% de la muestra de biogás únicamente como  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ . El porcentaje de metano en el biogás sólo pudo medirse en los biodigestores operativos. Para los biodigestores que no están operando se utilizó el promedio del porcentaje de metano en el biogás de los biodigestores operativos (61,0%  $\text{CH}_4$ ), sin considerar el biodigestor experimental. Con esta información se pudo estimar la producción de biogás ( $\text{m}^3/\text{día}$ ) para cada biodigestor en estudio tanto en la condición actual como en la mejorada.

A diferencia de los biodigestores a escala comercial, en la planta de digestión anaeróbica de INIA Remehue se llevó a cabo el registro de la producción real de biogás total a través de un contador de gas (marca Gallus 2000). El volumen total de biogás producido en el mes se dividió por el total de días, lo que permitió calcular la producción de biogás generado por día ( $\text{m}^3/\text{predio}/\text{día}$ ). A su vez, este valor se dividió por el número estimado de vacas en ordeña que aportan al biodigestor, pudiendo estimar la producción de biogás por vaca ( $\text{m}^3/\text{vaca}/\text{día}$ ). Al igual que para los biodigestores de mayor escala, los análisis de composición de biogás se realizaron utilizando un valor ponderado de metano que considera el 100% de la muestra de biogás únicamente como  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ . El porcentaje de metano registrado para el biodigestor experimental corresponde al promedio de las muestras de biogás analizadas a la fecha. Con esta

información, se pudo estimar la producción de metano por predio ( $\text{m}^3/\text{predio}/\text{día}$ ) y por vaca ( $\text{m}^3/\text{vaca}/\text{día}$ ).

**Potencial Energético del Metano:** considerando un poder calorífico del metano de 15,4 kWh/Kg y una densidad del metano de  $0,656 \text{ Kg}/\text{m}^3$  a  $25^\circ\text{C}$  y 1 atmósfera de presión, se obtuvo un potencial energético del metano de  $10 \text{ kWh}/\text{m}^3$  de metano. Con este último valor junto al volumen de metano generado por el biodigestor diariamente ( $\text{m}^3/\text{día}$ ) se obtuvo el potencial energético a partir del volumen de metano generado por la planta de biogás en kWh/día para ambas condiciones (actual y mejorada) (Faires y Simmang, 1994).

**Contenido Energético del Biogás:** este parámetro está directamente relacionado al porcentaje de metano en el biogás. Según lo descrito previamente, el potencial energético del metano es de  $10 \text{ kWh}/\text{m}^3$ , por lo que el potencial energético del biogás será siempre menor a dicho valor y se calcula multiplicando los  $10 \text{ kWh}/\text{m}^3$  por el porcentaje de metano en el biogás. De igual forma, se puede calcular también a través del potencial energético generado por la planta de biogás (kWh/día) dividido por la producción diaria de biogás ( $\text{m}^3/\text{día}$ ) (Informe ODEPA, 2009).

**Potencial Eléctrico:** no toda la energía contenida en el biogás puede transformarse en energía útil. La energía del biogás puede convertirse en energía eléctrica por medio de generadores eléctricos que funcionan con biogás. Existe un gran número de generadores en el mercado que funcionan con biogás, y cada uno de ellos tiene su respectiva eficiencia dependiendo de la tecnología que utilizan. Según el documento “Potencial de biogás en Chile” desarrollado por la Comisión Nacional de Energía (GTZ, 2007), el factor de conversión de la energía del combustible (en este caso biogás) en energía eléctrica varía entre el 30% y 40%. Para este estudio se consideró el factor de 30%, ya que los predios en estudio poseen generadores o cogeneradores de baja eficiencia, generalmente adaptados de otros motores y con varios años de uso. Sólo en el caso del Liceo Vista Hermosa (predio 2-10) se consideró un factor de eficiencia eléctrica mayor, ya que el proyecto considera la instalación de un cogenerador nuevo, cuya eficiencia eléctrica es de 35%. De esta forma se puede obtener el potencial eléctrico a partir del potencial energético del metano considerando el factor de eficiencia correspondiente en cada caso.

**Potencial Térmico:** si lo que se desea es generar energía térmica con el biogás, como por ejemplo calentar agua que luego podría utilizarse en la propia lechería, se debe considerar la eficiencia en la combustión de la caldera a utilizar. Al igual que con los generadores eléctricos, con el tiempo las calderas se han hecho más eficientes, llegando en algunos casos a eficiencias por sobre el 95%. Para este estudio se utilizó un factor de 80%, lo que corresponde a una caldera de eficiencia media que funciona con gas (US Department of Energy, Energy Saver) en los predios que utilizan el biogás sólo para generar calor, y 30% en los casos donde hay cogeneradores. En el caso del Liceo Vista Hermosa, al considerar la instalación de un cogenerador nuevo, se consideró un factor de eficiencia térmico del 40%. Utilizando dichos factores y el potencial energético del metano, se puede obtener el potencial térmico correspondiente al escenario actual y mejorado.

### 3.2 Ejemplo de cálculo de producción de metano y biogás.

#### Predio 1-10

Para le estimación de la producción de metano y biogás se deben tener en cuenta los siguientes datos (Tabla 3):

**Tabla 3. Resumen de parámetros iniciales predio 1-10.**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
<b>Purines generados</b>	(m <sup>3</sup> /año)	3.348
<b>Purines conducidos al biodigestor</b>	(%)	100
<b>Remoción de sólidos por decantador</b>	(%)	3
<b>Capacidad del biodigestor</b>	(m <sup>3</sup> )	570
<b>Sólidos totales (ST) condición actual</b>	(%)	0,4
<b>Sólidos totales (ST) condición mejorada</b>	(%)	2,0
<b>Sólidos volátiles agregados (SVa)</b>	(%)	70,9
<b>Contenido de CH<sub>4</sub> en biogás</b>	(%)	58,2

Fuente: Elaboración propia (2016).

#### Cálculo de afluente

El predio 1-10 tiene una producción de purines de 3.338 m<sup>3</sup>/año, equivalente a 9,2 m<sup>3</sup>/día, de los cuales el 100% de ellos son conducidos al biodigestor. A esta cantidad se le descuenta un valor del 3% de volumen de purines retenido como sólidos en los decantadores, obteniéndose un volumen de afluente de 8,9 m<sup>3</sup>/día.

$$3.338 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \div 365 \text{ días} = 9,2 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \text{ de purines} \times 0,97\% = 8,9 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \text{ de afluente}$$

### Cálculo de sólidos totales volátiles agregados (SVa)

La cantidad de sólidos totales volátiles agregados al biodigestor se calculó en base al contenido de sólidos volátiles (SV) presente en el afluente. Para ello se consideró una densidad del purín de 1 Kg/L, obteniéndose un valor de 25,31 Kg SVa/día.

$$8,9 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \text{ de afluente} \times 1.000 \frac{\text{L}}{\text{m}^3} \times 1 \frac{\text{Kg}}{\text{L}} \times \frac{0,4\% \text{ ST}}{100} \times \frac{70,9\% \text{ SV}}{100} = 25,31 \frac{\text{Kg}}{\text{día}} \text{ SVa}$$

### Tasa de carga orgánica afluente

Para determinar el factor de conversión a utilizar, se estimó la tasa de carga orgánica para el biodigestor 1-10, considerando la cantidad de SVa y la capacidad líquida en m<sup>3</sup> del biodigestor correspondiente a 570 m<sup>3</sup>. Se estimó una tasa de carga orgánica de 0,04 Kg SV/m<sup>3</sup>-día en el caso actual y 0,22 Kg SV/m<sup>3</sup>-día en el caso mejorado

$$\text{Condición actual:} \quad 25,3 \frac{\text{Kg}}{\text{día}} \text{ SVa} \div 570 \text{ m}^3 = 0,04 \frac{\text{Kg SV}}{\text{m}^3 \text{biodigestor-día}}$$

$$\text{Condición mejorada:} \quad 126,5 \frac{\text{Kg}}{\text{día}} \text{ SVa} \div 570 \text{ m}^3 = 0,22 \frac{\text{Kg SV}}{\text{m}^3 \text{biodigestor-día}}$$

### Factor de conversión para el rendimiento de metano

Para este caso se determinó el rendimiento de metano utilizando el modelo propuesto por Safley y Westerman (1994) donde se estimó un rendimiento para purines de lechería en condiciones de temperatura en un rango de 10 a 23°C, utilizando cargas orgánicas cercanas al rango 0,1-0,2 Kg SV/m<sup>3</sup>-día. Para el caso actual de este biodigestor, al tener una carga orgánica de 0,04 Kg SV/m<sup>3</sup> – día y una temperatura promedio de 13°C registrados al interior del reactor, se utilizó el siguiente modelo:

$$\text{Para cargas orgánicas} < 0,15 \text{ Kg SVa/m}^3\text{-día} \quad B = 0,1153 + 0,0053 T$$

Reemplazando:

$$B = 0,1153 + (0,0053 \times 13^\circ\text{C})$$
$$B = 0,184 \frac{\text{m}^3 \text{CH}_4}{\text{Kg SVa}}$$

En el caso mejorado, al tener una carga orgánica de 0,22 Kg SV/m<sup>3</sup>/día, se utilizó el siguiente modelo:

$$\text{Para cargas orgánicas} \geq 0,15 \text{ Kg SVa/m}^3/\text{día} \quad B = 0,0820 + 0,0063 T$$

Reemplazando:

$$B = 0,0820 + (0,0063 \times 13^\circ\text{C})$$

$$B = 0,164 \frac{\text{m}^3\text{CH}_4}{\text{Kg SVa}}$$

### Producción de metano y biogás

Finalmente, utilizando el factor de conversión y la cantidad de SVa calculados, se obtiene una producción de metano actual de 4,66 m<sup>3</sup>/predio/día y una producción mejorada de 20,74 m<sup>3</sup>/predio/día. Lo que a su vez, utilizando el valor medido de 58,2% de CH<sub>4</sub> en el biogás, equivale a una producción actual de 8,0 m<sup>3</sup> biogás/predio/día y una producción mejorada de 35,6 m<sup>3</sup> biogás/predio/día.

En condiciones actuales:

$$\text{Con } 0,4\% \text{ ST} : \quad 0,184 \frac{\text{m}^3\text{CH}_4}{\text{Kg SVa}} \times 25,3 \frac{\text{Kg}}{\text{día}} \text{ SVa} = 4,66 \frac{\text{m}^3\text{CH}_4}{\text{predio-día}}$$

$$4,66 \frac{\text{m}^3\text{CH}_4}{\text{predio - día}} \times 100 \div 58,2\% \text{ CH}_4 = 8,0 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{predio - día}}$$

A una condición mejorada:

$$\text{Con } 2,0\% \text{ ST} : \quad 0,164 \frac{\text{m}^3\text{CH}_4}{\text{Kg SVa}} \times 126,5 \frac{\text{Kg}}{\text{día}} \text{ SVa} = 20,74 \frac{\text{m}^3\text{CH}_4}{\text{predio-día}}$$

$$20,75 \frac{\text{m}^3\text{CH}_4}{\text{predio - día}} \times 100 \div 58,2\% \text{ CH}_4 = 35,6 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{predio - día}}$$

### **Cálculo de potencial energético**

En base a lo descrito previamente, se consideró un potencial energético del metano de 10 kWh/m<sup>3</sup>. Con este valor, junto al volumen de metano generado por el biodigestor diariamente (m<sup>3</sup>/día) se obtuvo el potencial energético a partir del volumen de metano generado por la planta de biogás en kWh/día para ambas situaciones (actual y mejorada).

$$\text{Condición actual:} \quad 10 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3 \text{ CH}_4} \times 4,66 \frac{\text{m}^3 \text{ CH}_4}{\text{predio-día}} = 46,6 \frac{\text{kWh}}{\text{predio-día}}$$

$$\text{Condición mejorada:} \quad 10 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3 \text{ CH}_4} \times 20,74 \frac{\text{m}^3 \text{ CH}_4}{\text{predio-día}} = 207,4 \frac{\text{kWh}}{\text{predio-día}}$$

### **Cálculo de potencial térmico**

Teniendo en cuenta que el predio 1-10 utiliza el biogás producido en una caldera adaptada a biogás, se utilizó un factor de eficiencia térmica del 0,8%.

$$\text{Condición actual:} \quad 46,6 \frac{\text{kWh}}{\text{predio-día}} \times 0,8\% = 37,3 \frac{\text{kWh}}{\text{predio-día}}$$

$$\text{Condición mejorada:} \quad 207,4 \frac{\text{kWh}}{\text{predio-día}} \times 0,8\% = 165,9 \frac{\text{kWh}}{\text{predio-día}}$$

#### 4. Biogás y reducción de GEI

Con la finalidad de cuantificar el potencial de mitigación de las emisiones de CH<sub>4</sub> por incorporación de biodigestores en sistemas productivos lecheros de las regiones de Los Lagos y Los Ríos, se procedió a estimar mediante cálculo las emisiones directas de CH<sub>4</sub> por gestión del estiércol a nivel predial, sin y con la incorporación de esta tecnología. Para los predios en que los biodigestores se encuentran en funcionamiento (n=4), se emplearon dos metodologías de cálculo:

- Directrices entregadas para este fin por el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, 2006). El nivel 2 de complejidad de esta directriz fue empleado para la estimación de las emisiones en la situación sin proyecto. Este nivel se basa en el empleo de información del número de cabezas directamente asociado al estiércol que se reserva en lagunas o pozos purineros (número de vacas lecheras en ordeña), y la capacidad de generación de CH<sub>4</sub> del purín acumulado, expresado por cabeza de animal (factor de emisión por animal, FE). Este último aspecto depende del contenido de sólido volátiles (SV) del purín y el potencial de emisión de CH<sub>4</sub> de este material (Bo). El Factor de Conversión de Metano del purín (FCM) varía según sistema de manejo del estiércol (lagunas anaeróbicas, digestores anaeróbicos, etc.) y la temperatura media anual del aire de la zona en que se encuentra ubicado el predio. Se estimó un factor de emisión de CH<sub>4</sub> por manejo del estiércol individual para cada predio. Este se obtuvo como producto del contenido de sólidos volátiles del purín medido en el material muestreado durante las visitas de terreno, y el número de cabezas de animales aportando purines al biodigestor. Los valores de Bo y FCM se obtuvieron de las directrices del IPCC (2006). El FCM de cada predio fue seleccionado según la temperatura media del aire en el área de ubicación del predio. Esta información se obtuvo de la estación meteorológica más cercana disponible en la Red Agrometeorológica de INIA, para el periodo disponible (página web: <http://www.agromet.cl/>). La media anual fue calculada como la media de todos los meses del año.
- Estimación directa de las emisiones por implementación de la tecnología: determinada en base al sistema de almacenamiento del purín y la generación de CH<sub>4</sub> por día en cada predio, según las mediciones realizadas por el equipo del presente proyecto durante las visitas a terreno (mitigación actual) y aquella proyectada para mejores condiciones de funcionamiento del biodigestor anaeróbico (mitigación mejorada).

## 5. Metodología de evaluación de impacto económico

Para el desarrollo de esta evaluación técnico económica, se procedió a analizar los elementos que caracterizan el ciclo económico de “Inversión, Operación-Mantenimiento y Rentabilidad”, considerados en la ficha de caracterización de cada una de las plantas de biogás a estudiar (Anexo 3a). Una vez colectados los datos, se analizó cada una de las fichas por separado, para determinar caso a caso los indicadores económicos.

Para el análisis económico, se trabajó con flujos de ingresos y costos en un mismo horizonte de tiempo (10 años), donde se aplicaron técnicas econométricas para la determinación de indicadores que permiten comparar cada medida con las otras. Dentro de los indicadores económicos a obtener, se cuentan los siguientes: Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR), Relación Beneficio - Costo (B/C) y Período de Recuperación de la Inversión (PRI). Finalmente, se realizó un análisis a las plantas de digestión anaeróbica implementadas bajo dos escenarios: condiciones actuales (n=4) y condiciones mejoradas (n=10).

### 5.1 Detalle de la evaluación técnico - económica

#### **Elaboración de ficha para la recolección de antecedentes**

Primero se procedió a analizar los elementos que caracterizan el ciclo económico de “Inversión, Operación-Mantenimiento y Rentabilidad” de iniciativas de plantas de biogás. Para ello, se utilizaron publicaciones técnicas tanto nacionales como internacionales.

#### **Análisis de precios de energía a sustituir y a generar**

Se utilizó el valor de la tarifa eléctrica, en función de lo indicado por los decretos tarifarios vigentes a junio del 2016 en la empresa SAESA (principal distribuidora de energía eléctrica de las regiones en estudio). Esta tarifa está expresada en el valor en pesos chilenos del kWh para cada predio. Es importante señalar que las tarifas informadas corresponden a la más utilizada en la zona respectiva de cada predio. Adicionalmente, se incorpora en esta revisión del informe el valor de la tarifa de venta de la energía desde el consumidor a la distribuidora, ello en función de la implementación de la nueva ley de “Net Billing” que permite a los clientes residenciales inyectar los excedentes de su propia generación de fuentes renovables a la red de la empresa distribuidora, recibiendo un pago por esa energía.

Por otro lado, en el caso de los predios que utilizan el biogás como alternativa de generación de energía térmica, se utilizó el valor en pesos del kilo de gas licuado. Se utilizó como referencia el precio promedio puesto en la ciudad de Osorno para un cilindro de 45 Kg. Finalmente se utilizó la conversión de 1Kg de gas licuado equivalente a 14,06 kWh (Ministerio de Energía, Chile).

## **Proyección de ingresos por energía**

En esta sección, se incluye la energía y potencia eléctrica, energía térmica y sustitución de otros combustibles. En base a la estimación de biogás que genera cada predio ( $\text{m}^3/\text{día}/\text{predio}$ ) y en función del contenido energético del biogás ( $\text{kWh}/\text{m}^3$ ), se estimó la cantidad de potencial energético, eléctrico y térmico al año de cada predio. Posteriormente se multiplicaron esos valores por la tarifa determinada en el punto anterior. Con ello se determinaron los ingresos anuales por este concepto. Cabe señalar que en la mayoría de los casos, al levantar la información en terreno, se pudo consignar el destino de la energía generada. Así, se trabajó en cada caso con el destino de energía térmica, eléctrica o cogeneración según lo señalado por el propietario del predio. Respecto a la sustitución de otros combustibles, esto corresponde sólo al gas licuado, lo que se analizó en el punto anterior.

## **Proyección de ingresos por digestato como abono o mejorador de suelo**

Lo primero es determinar el volumen de digestato generados al año, que en el caso del estudio se asume que es el mismo volumen del afluente. Para su valoración económica se considera el aporte de nitrógeno, fósforo y potasio por ser los tres principales macronutrientes presentes y los que mayormente utilizan los productores lecheros en su fertilización de praderas y/o cultivos. Para esta estimación se utilizó información generada en cada predio con digestor en operación o por defecto, el valor promedio de ellos para los predios sin biodigestor en funcionamiento. Para los predios bajo la condición mejorada la cantidad de nutrientes contenidos en el digestato se estimó de acuerdo a su contenido de materia seca, para digestores tipo laguna cubierta (2%), flujo pistón (5%) o estanque agitado de mezcla completa (6%), considerando la misma cantidad de nutrientes que purines de lechería de la zona reportados por Salazar *et al.* (2012). Al respecto, estudios publicados señalan que la variación en la composición entre el efluente de entrada versus del afluente de salida ocurre principalmente en el contenido de materia seca, no variando en forma significativa la concentración de N, P o K.

Luego, se debe convertir los precios de la presentación comercial de los fertilizantes mayormente utilizados en el área de estudio (Urea 46% N, Superfosfato Triple 46%  $\text{P}_2\text{O}_5$  y Muriato de Potasio 60%  $\text{K}_2\text{O}$ ) a la fracción de los elementos presentes en el efluente (N;  $\text{P}_2\text{O}_5$  y  $\text{K}_2\text{O}$ ). Finalmente, se multiplicó el volumen del digestato generado (en Kg/año) por el precio ajustado de los fertilizantes. Determinando así el ingreso por el concepto de ahorro en compra de fertilizantes base anual. Se consideró que todo el digestato es utilizado en el predio y por lo tanto reemplaza en su equivalente a la compra de fertilizantes comerciales.

## **Proyección por Venta de Reducciones Certificadas de Emisiones (CERs).**

No se consideró este concepto de la evaluación, ya que el tamaño de los proyectos evaluados es muy pequeño para su ingreso al mercado de los bonos de carbono de manera individual.

Desde el punto de vista del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) donde se gestionan los bonos de carbono, un proyecto será pequeño si reduce hasta 10.000 t de  $\text{CO}_2$  equivalente al año.

Los proyectos agrupados serán hasta las 30.000 t de CO<sub>2</sub> equivalente al año (Guía del Mecanismo de Desarrollo Limpio para Proyectos del Sector Energía en Chile, 2006).

Es importante señalar que los costos asociados a la transacción de los bonos de carbono para proyectos de energía individuales, ronda los US\$ 41.800, y para los proyectos agrupados que si están conectados a la red, rondan los US\$ 51.000. Por su parte, los proyectos agrupados que no están conectados a la red, rondan los US\$ 127.200 (Guía del Mecanismo de Desarrollo Limpio para Proyectos del Sector Energía en Chile, 2006).

Ello hace que los proyectos individuales sean poco atractivos para este mercado de los bonos de carbono. Por su parte, los factores que se deben estudiar para gestionar proyectos agrupados, son los niveles de reducción de emisiones y el grado de asociatividad del sector productivo.

### **Proyección de ingresos por tratamiento y disposición de residuos**

Se eliminó este concepto de la evaluación, ya que la totalidad de los predios en estudio no realizaba gestión externa de sus residuos de purines.

### **Determinación de costos asociados a los proyectos de biogás**

En el caso de los costos por “operación + mantención”, la información colectada en el marco del proyecto en biodigestores en funcionamiento era escasa o nula, por lo que no se pudo obtener un valor referencial para este ítem de acuerdo a las encuestas realizadas . En base a información internacional publicada y juicio de experto se estimó que el costo de mantención y operación que fue utilizado en el presente estudio:

- Tecnología de laguna cubierta: un total anual del 3% de la inversión.
- Tecnología de flujo pistón: un total anual del 3% de la inversión.
- Tecnología de estanque agitado de mezcla completa: un total anual del 8% de la inversión.

En solo un caso se incluyó el ítem “otros costos/labores”, correspondiendo a la utilización de un frasco de bacterias para evitar la formación de costras en el interior de los digestores (predio 5-10).

Expresamente se dejó fuera de la evaluación principal al “costo de riego” por la aplicación de los digestatos. Ello dado que ese costo corresponde a la labor de fertilización, lo que también se realizaría si no se tuvieran disponible estos digestatos.

## **Determinación de inversiones**

Para la determinación de inversiones, se obtuvo el valor en pesos de la “inversión inicial total” y el “subsidio” de los predios visitados, determinando por diferencia el “aporte propio” realizado a cada proyecto.

Respecto al subsidio, se trabajó con la información proporcionada por cada productor lechero, teniendo una variación importante desde 0% a 70%.

## **Análisis de flujos de caja**

Para la construcción del flujo de caja que permitió la evaluación económica, primero se estimó un horizonte de tiempo de 10 años, ello dado que según diversas publicaciones e información colectada por el equipo de INIA, al cabo de ese período se debe volver a realizar gran parte de la inversión para mantener el funcionamiento de las plantas de biogás.

Luego en función de los datos obtenidos en los puntos anteriores, se replicaron los ingresos y egresos del proyecto en cada uno de los 10 años de evaluación.

Los ingresos correspondían a los ahorros por energía eléctrica y térmica. Por su parte los costos corresponden a “Operación y mantención” y otros. Con ello se determinó la utilidad bruta de cada año (Ingresos - Costos).

Es importante señalar que, para efectos comparativos de un proyecto con otro, se decidió realizar algunas simplificaciones en la evaluación, a saber:

- a. Dejar fuera el efecto de los impuestos ya que actualmente en Chile, los agricultores tienen la alternativa de “Renta presunta” lo que implica que, si se agrega el efecto impuesto, se hacen poco comparable los proyectos entre sí dada la variabilidad de la base tributable.
- b. Se trabajó con valores sin IVA (o netos), convirtiendo a esa modalidad a los valores que lo incluían.
- c. Dejar fuera el efecto depreciación, ya que actualmente conviven varias opciones en Chile, desde la depreciación instantánea del nuevo sistema 14 TER de las MIPYMES a la depreciación acelerada de las grandes empresas, pasando por la depreciación normal en función de la tabla del Servicio de Impuestos Internos (este efecto de ajuste se ve reflejado también en el horizonte de tiempo explicado anteriormente).
- d. Dejar fuera el efecto de un crédito para la materialización de la inversión. Ello ya que tendríamos realidades no comparables entre los distintos predios analizado.

## **Determinación de indicadores de rentabilidad de cada planta**

Se trabajó con los tres principales indicadores de rentabilidad: Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Relación Beneficio Costo (B/C).

La tasa de descuento utilizada para los cálculos fue de un 10%, lo que significa que ese es el porcentaje mínimo exigido por el inversionista a su dinero si lo utilizara en otra iniciativa de inversión.

- Como primer criterio, un proyecto será viable si su VAN es mayor o igual a cero ( $VAN \geq 0$ ).
- Como segundo criterio, un proyecto será viable si su TIR es mayor que la tasa de Descuento.
- Como tercer criterio, un proyecto será viable si su relación B/C es mayor a 1.

Adicionalmente, se calculó el Período de Recuperación de la Inversión (PRI), en función del flujo de caja acumulado desde el año 0 (año de la inversión).

Para la evaluación económica, se optó por construir un análisis de 2 escenarios, ello en función de las fuentes de ingresos o ahorros a aplicar a la evaluación, a saber:

- Escenario 1: sólo biogás.
- Escenario 2: biogás + digestato.

Este análisis se replicó en los dos tipos de evaluación, a saber:

- Evaluación 1: Plantas en funcionamiento condición actual.
- Evaluación 2: Plantas en funcionamiento condición mejorada.

## **Análisis de conglomerado**

El análisis de conglomerado, corresponde al análisis de las cifras promedio de los indicadores de rentabilidad de todas las plantas en estudio. Se analiza por tipo de tecnología: lagunas cubiertas, estanques agitados de mezcla completa y flujo pistón. Finalmente se analiza por destino de la energía: térmica, eléctrica y la suma de ambas o cogeneración.

Dicho esto, es importante señalar las tecnologías y destino de la energía en cada predio (Tabla 4):

**Tabla 4. Tecnología de plantas en funcionamiento.**

<b>ID predio</b>	<b>Tipo de tecnología</b>	<b>Destino de la energía</b>
<b>1-10</b>	Laguna Cubierta	Térmica
<b>2-10</b>	Mezcla Completa	Eléctrica
<b>3-10</b>	Flujo Pistón	Térmica
<b>4-10</b>	Laguna Cubierta	Eléctrica
<b>5-10</b>	Laguna Cubierta	Eléctrica
<b>7-10</b>	Laguna Cubierta	Eléctrica
<b>8-10</b>	Flujo Pistón	Eléctrica
<b>1-14</b>	Flujo Pistón	Térmica
<b>2-14</b>	Laguna Cubierta	Térmica
<b>3-14</b>	Laguna Cubierta	Térmica

Fuente: Elaboración propia (2016).

### **Determinación del modelo de negocio**

Se aplicó el método CANVAS para caracterizar los distintos tipos de modelos de negocios involucrados en este tipo de proyectos.

Un modelo de negocios describe la lógica de como una organización crea, entrega y captura valor. Para el análisis del modelo de negocios en este estudio, se ha adoptado el método Canvas, el cual se basa en el análisis de nueve (9) bloques que se interrelacionan entre sí, ellos son: segmento de clientes, propuesta de valor, canales de comunicación y distribución, relaciones con los clientes, flujos de ingresos, recursos clave, actividades clave, “partners” clave y estructura de costos.

Así, se trabajó con los siguientes modelos de negocios tipo:

- Modelo 1: biogás + digestato para autoconsumo.
- Modelo 2: biogás + digestato para autoconsumo y venta de excedentes.

## Análisis y resultados

### 1. Identificación y diagnóstico de biodigestores

Durante la ejecución del proyecto se identificó un total de 14 predios lecheros con implementación de digestores anaeróbicos para la producción de biogás. Según los datos obtenidos por geolocalización, 11 biodigestores se sitúan en la Región de Los Lagos (X Región) y 3 en la Región de Los Ríos (XIV Región; Imagen 3), pudiendo concretar la visita y encuesta en 12 de ellos, puesto que en los predios restantes (predios 10-10 y 11-10) el propietario no se encontró disponible para generar el levantamiento de información. Cabe destacar que estos últimos biodigestores, según información proporcionada por los propietarios, no se encuentran en funcionamiento.

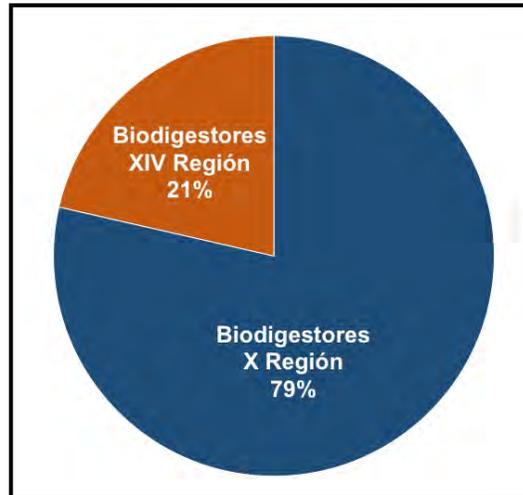
La disposición de los agricultores fue muy buena para la entrega de información, la realización de mediciones y colecta de muestras. Sin embargo, cabe mencionar que existe gran falta de información, registros, mediciones y análisis a nivel predial, aspectos que son clave para el funcionamiento y operación del biodigestor. Sólo en uno de los predios se contaba con un análisis de metano del biogás generado (al cual no se pudo acceder) y en el 100% de los predios no existían registros de la producción de biogás y/o electricidad generada. Este aspecto es sin lugar a dudas un tema que será importante mejorar en el desarrollo de este tipo de tecnología a nivel nacional, requiriéndose registros y análisis periódicos los que permitirán hacer una buena evaluación y/o validación a nivel nacional.

En base a las estadísticas correspondientes al VII Censo Agropecuario y Forestal (INE, 2007), del número de predios lecheros para la Región de Los Ríos y la Región de Los Lagos, los biodigestores establecidos en la misma zona de estudio representan un 0,15% del total de predios lecheros, los cuales funcionan generando biogás a partir de purín bovino (Imagen 4). Estos datos evidencian a la fecha la baja inserción que esta tecnología ha tenido en la zona estudiada. Sin embargo, esta realidad se repite en otras regiones en donde existen pocos biodigestores funcionando, siendo de los más grandes a escala comercial el ubicado en la lechería Ancali en la VIII región y el del predio del Sr. Andrés Tamm en la VII región.

Acorde a la metodología descrita se realizó una primera clasificación de los biodigestores en base a sus características de funcionamiento. De esta forma, del universo total de 12 biodigestores encuestados, 11 de ellos fueron implementados a escala comercial y 1 a escala experimental, el cual corresponde a la planta de biogás piloto que se encuentra funcionando en INIA, Centro Regional de Investigación Remehue en el marco de un convenio con CIFES de CORFO en Chile. Este criterio de clasificación fue necesario dado que el funcionamiento del biodigestor experimental difiere con el resto de las plantas implementadas a escala comercial. Además, la metodología de monitoreo controlada y frecuente del biodigestor piloto permite que las mediciones *in situ* permitan contar con datos técnicos promedio de distintas evaluaciones del biodigestor. Se debe tener en consideración, que para el resto de los biodigestores analizados, los parámetros reportados corresponden al estado del biodigestor en un momento determinado, y que

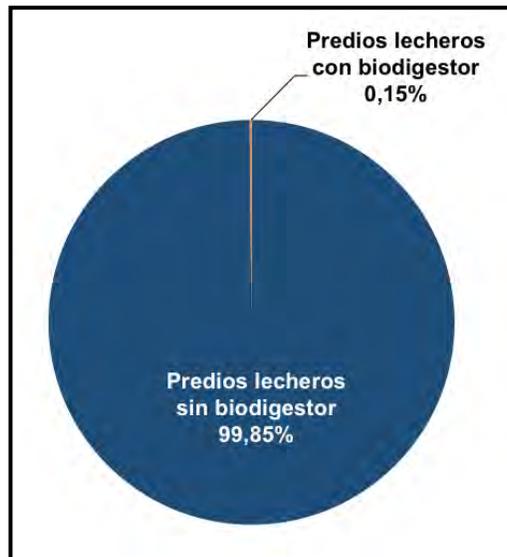
en base a la metodología empleada se trata de representar una condición actual de la forma más certera posible.

**Imagen 3. Biodigestores existentes en la Región de Los Lagos y de Los Ríos (n=14).**



Fuente: elaboración propia (2016).

**Imagen 4. Participación porcentual de predios lecheros con biodigestor en la Región de Los Lagos y la Región de Los Ríos.**



Fuente: Elaboración propia en base al VII Censo Agropecuario y Forestal (INE, 2007).

Dentro de los 11 predios con biodigestores a escala comercial, se registró un rango de superficie

total entre 194 y 500 ha, donde el promedio de área destinada a lechería fue de 99 ha. La producción de leche registró un valor promedio de 631.614 L/año por predio, con un rango que va entre los 53.908 y 1.314.000 L/año-predio, sin considerar el predio de la planta piloto (Tabla 5). El total anual de leche entregada a planta de los predios visitados es de 4.667.908 litros, equivalente al 0,3% de la producción entregada a planta en las regiones de Los Ríos y Los Lagos según el informe de ODEPA (2015).

En cuanto al número de unidades animales, el 60% de los predios declara tener entre 100 a 500 vacas promedio en ordeña y un 40% restante bajo las 100 vacas (Tabla 5, Imagen 5. Se debe tener en cuenta que en la mayoría de los análisis de biodigestores a escala comercial no se consideró al predio 6-10, pues no existe información de las variables encuestadas (predio arrendado por otro propietario que no hace uso del biodigestor).

**Imagen 5. Cantidad de vacas en ordeña por predio expresado en porcentaje (n=10).**



Fuente: elaboración propia (2016)

**Tabla 5. Datos de manejo predial en biodigestores encuestados.**

<b>Predio</b>	<b>Superficie total predio</b>	<b>Superficie destinada a lechería</b>	<b>Vacas en ordeña promedio</b>	<b>Producción de leche</b>
	<b>(ha)</b>	<b>(ha)</b>	<b>(UA)</b>	<b>(L/año)</b>
<b>1-10</b>	500	160	200	900.000
<b>2-10</b>	285	105	220	1.314.000
<b>3-10</b>	30	30	86	550.000
<b>4-10</b>	420	80	130	950.000
<b>5-10</b>	200	160	140	700.000
<b>6-10</b>	100	100	S/I	S/I
<b>7-10</b>	119	110	215	S/I
<b>8-10</b>	26	22	35	200.000
<b>9-10*</b>	485	220	268	2.200.000
<b>1-14</b>	300	210	400	S/I
<b>2-14</b>	99,5	60	70	385.000
<b>3-14</b>	52	52	27	53.908
<b>Promedio</b>	194	99	152	631.614
<b>Máximo</b>	500	210	400	1.314.000
<b>Mínimo</b>	26	22	27	53.908

\*: Biodigestor experimental INIA Remehue.

S/I: Sin información

Fuente: Elaboración propia (2016).

Respecto al manejo predial y animal, el 100% de las vacas lecheras de estos predios están bajo sistemas pastoriles y presentan períodos de confinamiento sólo a momentos previos o posteriores a la ordeña en el patio de espera, y/o en algunos predios con el paso por un patio de alimentación, estimándose un tiempo de confinamiento que varía entre 2-6 horas/día/predio.

La fuerte base pastoril de los predios es característica de los sistemas de producción del sur de Chile, en donde el uso intensivo de la pradera es fuente importante para mejorar la eficiencia técnica y económica del predio, con alimentación suplementaria sólo en algunos predios. Esto tiene implicancias importantes en la generación de purines, tanto en su cantidad como composición, bajo estos sistemas tanto en Chile como en otros países pastoriles como Argentina,

Uruguay o Nueva Zelanda (Gibson, 1995).

Uno de los factores incidentes sobre el potencial de carga orgánica presente en los purines corresponde al método de colecta de éstos. La composición de purines que ingresan al biodigestor, y por lo tanto su potencial orgánico, será variable dependiendo si corresponde a feca colectada directamente desde el patio o a purines diluidos y conducidos al biodigestor mediante el lavado de piso y/o aguas lluvia. En términos generales, en los predios identificados con biodigestores funcionando, hay una baja colecta de fecas y orina en los sectores de confinamiento (patio de espera y patio de alimentación), quedando la mayoría en praderas durante el pastoreo. Esto significa un bajo potencial de ingreso de este sustrato al digestor y por ende un bajo potencial de producción de biogás. Sin embargo, cabe destacar que en la Zona Sur del país y con mayor intensidad en la zona Centro-Sur, existen sistemas de producción lechera con un mayor grado de confinamiento de animales, llegando hasta estabulaciones completas de 24h por 365 días del año (Salazar et al., 2003). Esto permite tener opciones caso-específicas para el desarrollo de sistemas de digestión anaeróbica con un mayor potencial de cargas orgánicas.

En la estimación de la producción de purines en los predios lecheros del sur de Chile, un componente muy importante es el agua lluvia que llega indirecta (ej. agua lluvia contaminada con fecas y/u orina) o directamente al pozo de almacenamiento. Junto con ello, el uso de agua para la limpieza de pisos, infraestructura, equipos de ordeña y estanque de leche son gravitantes en la producción total de purines, por lo que un factor incidente en el aporte de agua total en los purines serán las superficies techadas sin canalizar y las superficies descubiertas de cada lechería (Tabla 6).

A partir de la información colectada en los predios se logró estimar la producción total de purines en base a la metodología descrita por Salazar et al., (2003), reportándose un valor promedio de lo observado de 3.155 m<sup>3</sup> de purines/predio/año, con un rango entre los 334 y 9.990 m<sup>3</sup>/predio/año (Tabla 6), volúmenes que incluyen los aportes de feca, orina, aguas lluvia y aguas sucias. Los valores obtenidos permiten calcular además que el aporte promedio de fecas y orina corresponde a un 24% de los purines producidos, porcentaje de fecas que potencialmente se colecta durante los períodos cortos de confinamiento utilizados en los predios estudiados. Por otro lado, la suma de aguas lluvia y aguas de lavado permiten estimar que los sistemas lecheros pastoriles en estudio tiene un purín bastante diluido, con una proporción aproximada de purín y agua 1:3.

Considerando que los predios con mayor producción de purines corresponden también a los predios con mayor número de vacas en ordeña, la principal diferencia en la cantidad de purines está dada por el aporte de aguas lluvia en superficies techadas sin canalizar y superficies descubiertas del predio, que aportan directamente a la dilución. Por lo tanto, el número de vacas en ordeña tiene incidencia sobre la cantidad total de purines (m<sup>3</sup>/día), sin embargo no es el factor determinante. Es así como la cantidad de purines generados influiría directamente en el potencial de generación de biogás de cada biodigestor, considerando la dilución de éstos y la cantidad efectiva ingresada al reactor (afluente).

**Tabla 6. Producción de purines por predio encuestado en las Regiones de Los Ríos y Los Lagos.**

Predio	Producción de purines	Aporte de fecas y orina	Aporte de aguas lluvia y construcciones	Aporte de aguas sucias	Condición actual		Condición mejorada	
					Volumen de afluente	Vacas en ordeña que aportan al biodigestor	Volumen de afluente	Vacas en ordeña que aportan al biodigestor
	(m <sup>3</sup> /año)	(m <sup>3</sup> /año)	(m <sup>3</sup> /año)	(m <sup>3</sup> /año)	(m <sup>3</sup> /día)	UA	(m <sup>3</sup> /día)	UA
<b>1-10</b>	3.338	693	169	2.475	8,92	200	8,92	200
<b>2-10</b>	5.292	771	1.789	2.732	NA	NA	5,10	220
<b>3-10</b>	334	191	0	143	0,26	26	0,61	34
<b>4-10</b>	2.383	369	356	1.658	6,31	130	6,31	130
<b>5-10</b>	1.414	530	885	0	3,78	140	3,78	140
<b>6-10</b>	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
<b>7-10</b>	6.936	1.220	5.483	233	NA	NA	6,45	75
<b>8-10</b>	706	78	490	138	NA	NA	0,37	7
<b>1-14</b>	9.990	1.891	3.114	4.984	NA	NA	0,27	4
<b>2-14</b>	787	199	411	178	NA	NA	2,10	70
<b>3-14</b>	359	77	167	115	NA	NA	0,95	27
<b>Promedio</b>	3.155	602	1.286	1.266	4,82	124	3,49	91
<b>Máximo</b>	9.990	1.891	5.483	4.984	8,92	200	8,92	220
<b>Mínimo</b>	334	77	0	0	0,26	26	0,27	4

NA: No aplica

S/I: Sin información

Fuente: Elaboración propia (2016).

Se determinó que sólo el 50% de los biodigestores existentes en la región se encuentran operativos. Dentro de éstos se incluyen biodigestores en funcionamiento desde hace años (n=4), los nuevos en etapa de puesta en marcha (n=2) y el biodigestor experimental en INIA Remehue (n=1). El 50% restante se compone de biodigestores sin funcionar (n=6) y en proceso de construcción (n=1). Entre los años 2005 y 2010 se implementaron los primeros biodigestores a escala comercial (27%), continuando la construcción de la mayoría de ellos entre el 2011 y 2015 (64%). Sin embargo, cabe destacar que un biodigestor localizado en Frutillar de propiedad del Sr. Klocker, se puso en operación hace varios años, no existiendo antecedentes formales de su operación y siendo uno de los predios que no se pudo visitar, dado que el propietario manifestó no encontrarse disponible para realizar el levantamiento de información.

A la fecha, la tecnología de producción de biogás a través de biodigestores anaeróbicos a partir de purín bovino ha sido realizada en estas regiones en su gran mayoría por la empresa Biotecsur, quien realizó la construcción de 9 plantas de biogás de las aquí reportadas. A menor escala, le siguen las empresas Ecodiseño (n=1), Kaiser Energía (n=1) y Oikos (n=1). Cabe mencionar que, Cooperativa Eléctrica de Osorno (CREO) participó técnica y financieramente en el diseño e implementación de uno de los biodigestores de la zona. De las empresas proveedoras la más activa en su cartera de proyectos y con experiencia en la zona es Biotecsur, quien se adjudicó recientemente un convenio con el Gobierno regional de Los Ríos y dos proyectos con la Fundación para la Innovación Agraria (FIA), para la implementación y evaluación de biodigestores en predios lecheros de las regiones en estudio.

Si bien hay digestores funcionando como se comenta anteriormente, también hay un gran porcentaje de proyectos que están abandonados o sin operar (Ej. sin terminar su construcción), los cual ha sucedido por distintas razones, siendo una de ellas el incorrecto diseño de los digestores anaeróbicos para las condiciones tanto de sistemas productivos como climáticas en el Sur de Chile, y también en un menor grado por temas de operación de los biodigestores. Junto con ellos también hay razones de índole particular (Ej. arriendo del predio) en que los biodigestores no se han seguido utilizando. Se ha podido observar una evolución positiva entre los primeros proyectos instalados versus los nuevos los cuales consideran mejoras importantes en su diseño, como por ejemplo el uso de separadores de sólidos.

Los productores comentaron en su mayoría haber concretado la idea de la construcción de un biodigestor motivados principalmente por una consciencia ambiental (55%, n=11), evitando la contaminación de napas subterráneas, la emisión de olores y logrando la reducción de semillas de maleza. En segundo lugar, fueron motivados por una iniciativa innovadora (27%), pudiendo incorporar tecnologías nuevas o poco desarrolladas. Finalmente, según lo señalado por los mismos propietarios, el menor porcentaje de los reactores fue implementado con fines económicos, para uso de energía y digestato como biofertilizante (9%), o un fin educativo (9%) que es el caso del proyecto de biodigestión en el Liceo Vista Hermosa de la comuna de Río Negro.

Durante las visitas a los biodigestores que se encuentran funcionando, se pudo constatar en terreno la motivación, interés y grado de involucramiento en el desarrollo de esta tecnología por parte de los agricultores, quienes están expectantes del apoyo técnico y/o financiero que pueda

darse tanto a nuevos proyectos como a el mejoramiento de los ya establecidos.

Los predios en estudio a escala comercial manejan en su mayoría entre 1 a 3 reactores, con capacidades líquidas totales entre los 34 y los 570 m<sup>3</sup> (Tabla 7), lo que equivale a una capacidad de biodigestor instalada promedio de 1,19 m<sup>3</sup>/vaca en ordeña que aporta al biodigestor en condiciones actuales y 4,16 m<sup>3</sup>/vaca en ordeña que aporta al biodigestor bajo condiciones mejoradas. En algunos predios ha existido un desarrollo en el tiempo de estos sistemas de tratamiento, implementando primero un biodigestor y posteriormente otros en serie.

Independiente del tamaño, todos los biodigestores localizados en la zona sur manejan un sistema de flujo continuo, generando afluente y efluente de forma diaria. Se observaron tres tipos de reactores en las zonas de estudio: reactores flujo pistón (tipo manga), reactores de mezcla completa (con sistema de agitación incorporada) y en su mayoría, reactores tipo laguna cubierta (Tabla 7). Éstos fueron construidos con talud bajo suelo para contener la fase líquida del reactor. Este talud se encuentra recubierto por una membrana de PVC para evitar filtraciones hacia el interior del suelo. El gasómetro de estos reactores está recubierto principalmente con una geomembrana EPDM (Caucho etileno-propileno-dieno), permitiendo una mayor elasticidad del material y mayor resistencia al ambiente, ya que la mayoría de los biodigestores no se encuentra protegido de la intemperie, salvo un predio que contenía la planta de biogás dentro de un invernadero de poliestireno. Por lo tanto, estas medidas de desprotección hacen que existan variaciones de temperatura en respuesta a los cambios estacionales durante el año.

Dadas las temperaturas medidas en los efluentes, los digestores corresponden en su mayoría a sistemas psicrófilos, es decir trabajan a rangos de temperatura que fluctúan entre los 0°C y 20 °C aproximadamente. Sólo 2 biodigestores tenían un sistema de calefacción de sustrato, mediante serpentín o un intercambiador de calor al interior del reactor (Imagen 6), sin embargo sólo uno de ellos estaba funcionando parcialmente. La temperatura óptima de funcionamiento para estos sistemas de digestión anaeróbica es cercana a los 38°C, pero depende también del tipo de sustrato utilizado (Farret y Godoy, 2006). A medida que aumenta la temperatura, también aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión dando lugar a mayores producciones de biogás. La temperatura de operación en el digestor, está considerada uno de los principales parámetros de diseño, ya que variaciones bruscas de temperatura en el mismo pueden provocar desestabilización en el proceso (Farret y Godoy, 2006). La baja temperatura dentro de los digestores es un factor clave para el desarrollo de la biodigestión en el Sur de Chile, debiéndose hacer esfuerzos por buscar alternativas tecnológicas costo-efectivas que permitan mejorar la producción de biogás. Al carecer de un sistema de calefacción, el proceso de biodigestión sufriría un retardo metabólico, producto de las bajas temperaturas al interior del reactor (< 25°C). Sin embargo, este fenómeno podría verse compensado por un aumento en el TRH, el cual maneja el tiempo de permanencia de la materia orgánica en el sistema. Cheng (2009) señala que para temperaturas entre 10 y 25°C se recomienda utilizar un TRH superior a 50 días. El promedio de TRH para los biodigestores tipo laguna cubierta fue de 90 días, lo que coincide según lo recomendado por Krich et al., (2005), quienes recomiendan para estos sistemas TRHs sobre 40 días. En el caso de los reactores flujo pistón se registró un promedio de TRH de 128 días y en el caso de mezcla completa, 55 días, valores que también se encuentran dentro de lo recomendado (Betts y Ling, 2009; Krich et al.,

2005). En el caso del biodigestor experimental el TRH es de 18 días, y opera a una temperatura promedio de 22°C, la que se espera aumentar para mejorar el proceso de digestión.

Al igual que el sistema de calefacción, otra de las variables importantes a considerar durante el diseño y construcción de los biodigestores es el sistema de agitación, puesto que regula tanto la eficiencia del proceso de metanogénesis como la durabilidad del biodigestor, evitando la solidificación de sustrato acumulado al interior de éste. El biodigestor experimental posee un sistema de agitación mecánico a través de 4 tubos de PVC en forma de remo instalados en los costados del reactor. En el caso de los biodigestores a escala comercial, el 50% tiene instalado o considera implementar un sistema de agitación (Imagen 6). Aquellos biodigestores que no se encuentran operativos actualmente y que tenían implementado un sistema de agitación (en su mayoría electromecánica), éste dejó de funcionar debido al deterioro del equipo y/o por la acumulación de sólidos dentro del biodigestor.

**Tabla 7. Capacidad de biodigestores por predio.**

ID Predio	Tipo de reactor	N° de Reactores	Capacidad líquida total (m <sup>3</sup> )	Condición actual	Condición mejorada
				Capacidad del biodigestor instalada (m <sup>3</sup> biodigestor/vaca ordeña que aporta al biodigestor)	Capacidad del biodigestor instalada (m <sup>3</sup> biodigestor/vaca ordeña que aporta al biodigestor)
1-10	Laguna cubierta	3	570	2,85	2,85
2-10	Mezcla completa	1	280	NA	1,27
3-10	Flujo pistón	2	100	3,88	2,91
4-10	Laguna cubierta	2	380	2,92	2,92
5-10	Laguna cubierta	3	520	2,29	2,29
6-10	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
7-10	Laguna cubierta	2	360	NA	4,78
8-10	Flujo pistón	2	50	NA	7,14
9-10*	Mezcla completa	1	8	0,47	NA
1-14	Flujo pistón	3	34	NA	8,48
2-14	Laguna cubierta	1	270	NA	3,86
3-14	Laguna cubierta	1	138	NA	5,11
<b>Promedio</b>		2,1	270,2	1,19	4,16
<b>Máximo</b>		3	570	3,88	8,48
<b>Mínimo</b>		1	34	2,29	1,27

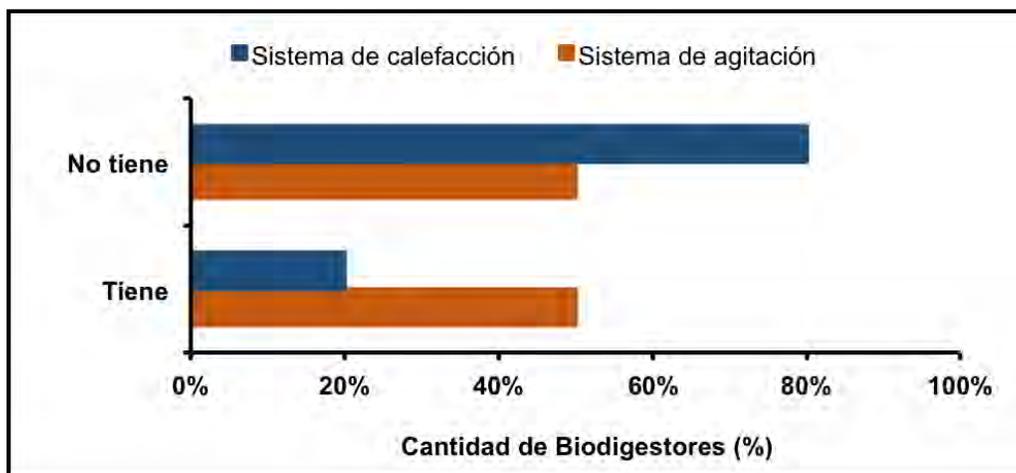
S/I: Sin información

NA: No aplica

\*: Biodigestor experimental INIA Remehue.

Fuente: Elaboración propia (2016).

**Imagen 6. Cantidad de biodigestores con sistema de calefacción y agitación (n=10).**



Fuente: elaboración propia (2016).

El tipo de sustrato para todos los casos corresponde a purín bovino lechero (o mezcla de fecas y agua caliente en el caso del digestor de INIA), el cual es colectado mediante el raspado y lavado de pisos y dirigido hacia el biodigestor por canales purineros que desembocan previamente a decantadores, reteniendo así gran porcentaje de sólidos. Sin embargo, la acumulación de éstos sigue afectando el funcionamiento del sistema ya que los agricultores manifestaron tener que realizar mantención al interior del biodigestor mediante la remoción de la costra sólida cada cierto tiempo, dependiendo del tamaño de los biodigestores y la calidad de purín que esté ingresando al sistema, afectada directamente por el tipo de alimentación de las vacas y otros residuos agregados (restos de ensilaje, maíz, etc.).

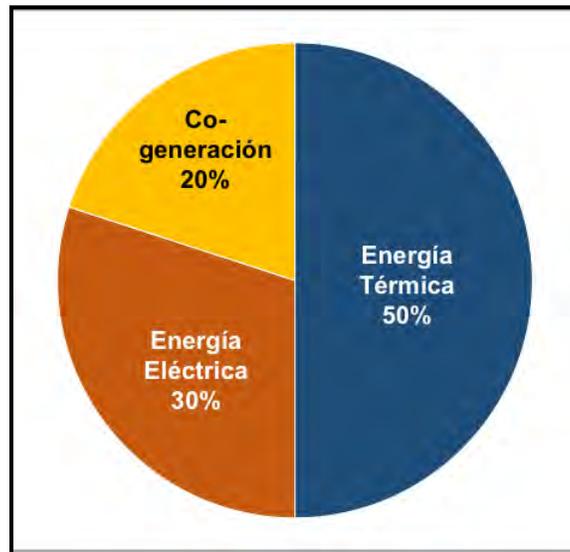
La mayoría de los biodigestores presentan un sistema de llenado por gravedad, a excepción del biodigestor experimental de INIA Remehue y el biodigestor en construcción ubicado en el Liceo Vista Hermosa de Río Negro, que contemplan un sistema de llenado mediante bomba eléctrica asociando un costo energético extra al sistema. En la mayoría de los biodigestores en funcionamiento, la totalidad de los purines producidos en el predio son conducidos al biodigestor, y en otros solo una parte es utilizada para estos fines y el remanente es conducido a pozos purineros para su posterior aplicación al campo.

Si bien en todos los predios se reportó realizar el proceso de ordeña dos veces al día (una en la mañana y otra en la tarde), hay predios en que el lavado y raspado de pisos se realiza sólo durante la jornada de la mañana, controlando de esta forma la frecuencia de llenado de los biodigestores. Por lo tanto, este proceso involucra la participación de al menos 1 persona para el raspado y lavado de pisos (generalmente ordeñador) dirigiendo el afluente hacia decantadores y biodigestor. En algunos biodigestores se considera personal para la limpieza de la superficie de los reactores, ya que durante épocas de alta pluviometría hay acumulación de agua sobre las geomembranas, lo que podría dañar eventualmente la estructura.

La acumulación de material sólido en los decantadores también implica la presencia de personal para la limpieza de éstos por lo menos cada dos meses, la cual se realiza mediante la remoción de sólidos con un tractor pala, lo que asocia otro costo permanente al proceso. Sumado a esto, existe una carencia en capacitación para el buen manejo de estos sistemas, la cual en todos los casos es limitada, considerando solo lo enseñado por la misma empresa de construcción y diseño tanto a operarios como al propietario.

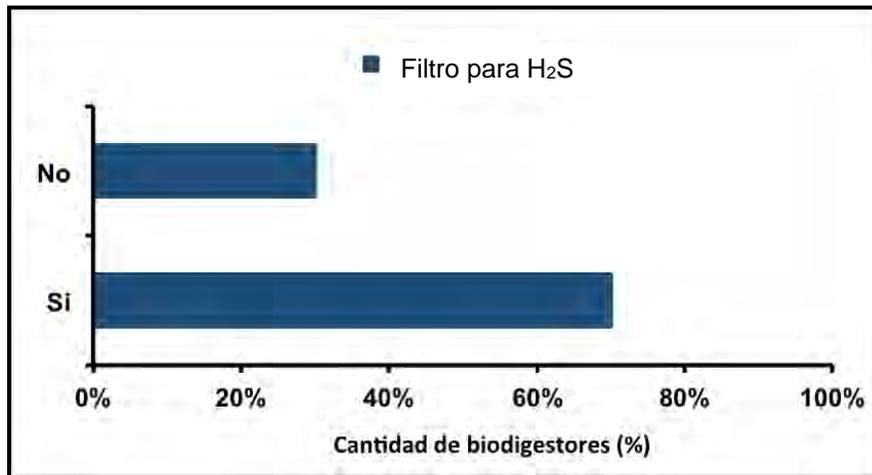
En cuanto al destino del biogás generado en las plantas, éste va destinado en mayor proporción a la producción energía térmica, seguido por energía eléctrica y en menor porcentaje a la co-generación de energía térmica-eléctrica (Imagen 7). La producción de energía en la mayoría de estos casos considera la adaptación de equipos a biogás (Ej. modificación de motores). Sólo en 1 predio (Liceo Vista Hermosa) se considera un motor eléctrico nuevo para biogás, sin embargo a la fecha no se cuenta con este equipo. Una de las medidas a considerar para prolongar la vida útil de estos equipos es la extracción de ácido sulfhídrico. En más del 50% de los predios existe un sistema de extracción de sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) desde el biogás mediante viruta metálica adaptada a la línea de gas, la cual actúa como sistema de filtro (Imagen 8) y siendo éste el único método de extracción de ácido y tratamiento de biogás observado.

**Imagen 7. Tipo de energía de reemplazo por biogás (n=10).**



Fuente: elaboración propia (2016).

**Imagen 8. Biodigestores que poseen filtro para H<sub>2</sub>S (n=10).**

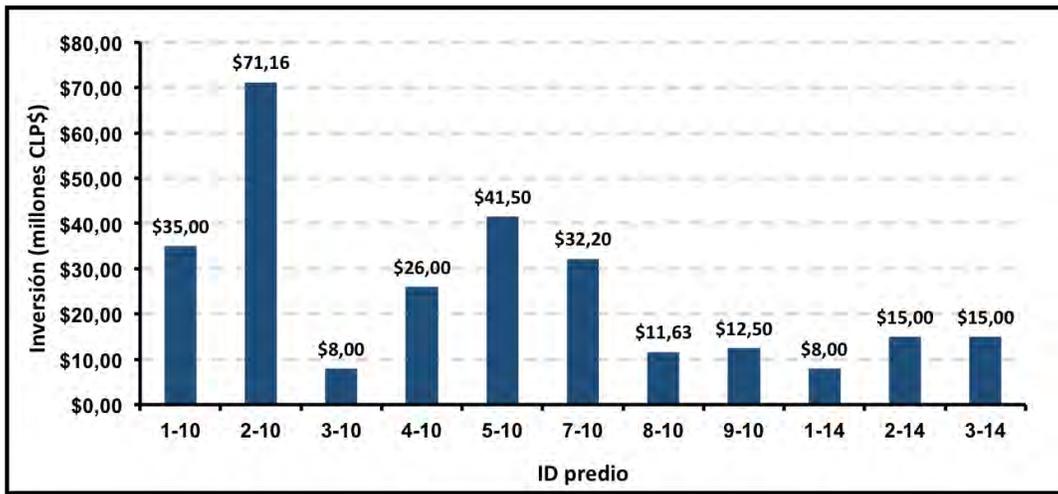


Fuente: elaboración propia (2016).

Se observó además que el efluente o digestato no tiene ningún tratamiento aparte de la biodigestión en ninguno de los predios evaluados, siendo éste aplicado directamente a la pradera y cultivos. Para la aplicación de digestato se utiliza en su mayoría un carro purinero o un carro hechizo acoplado a un estanque. Similar a lo reportado por Salazar et al. (2003) para purines de predios lecheros de las Regiones de Los Lagos y los Ríos, ninguno de los predios visitados contaba con un plan de manejo ni una caracterización de los efluentes, lo que requiere ser cambiado permitiendo con ello hacer una mejor valoración agronómica por parte de los agricultores.

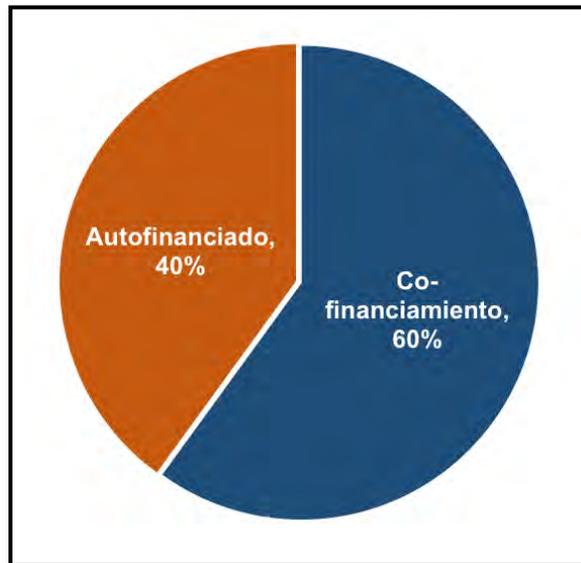
Finalmente, los rangos de inversión se manejaron entre los CLP\$8.000.000 y los CLP\$71.162.000 (Imagen 9). Información en base a los costos de mantención, operación de biodigestores y aplicación de digestato fue escasa o nula en la mayoría de los predios visitados. Sin embargo, fue posible identificar el modelo de negocios utilizado, siendo que para todos los biodigestores comerciales se opera con la modalidad de autoconsumo, generando energía y digestato para uso en el mismo predio, donde el 60% de las plantas de biogás recibió financiamiento parcial de otra institución para la implementación del biodigestor y el 40% restante fue autofinanciado, principalmente a través de créditos bancarios (Imagen 10). El uso de créditos bancarios demuestra el interés por parte de los productores de implementar esta tecnología, habiéndola priorizado por sobre otras inversiones a realizar en sus sistemas de producción.

**Imagen 9. Inversión realizada para implementación de biodigestores por predio.**



Fuente: elaboración propia (2016).

**Imagen 10. Tipo de financiamiento para construcción de biodigestores (n=10).**



Fuente: elaboración propia (2016).

## 2. Análisis físico-químico de purines y efluentes

Estudios preliminares a gran escala y de laboratorio han demostrado que el tiempo de retención hidráulica (TRH) de los efluentes y la temperatura (condiciones mesófilas y termófilas) en digestores anaeróbicos es fundamental para reducir o eliminar la presencia de patógenos en plantas y/o semillas de maleza, lo cual también corresponde a un buen manejo agronómico de efluentes a nivel predial (Engels et al., 1993; Kearney et al., 1993), y que además puede incentivar a un mejor uso por parte de los agricultores.

En las Tablas 8, 9 y 10 se entregan antecedentes de los tres tipos de sustrato caracterizados a nivel predial para los biodigestores a escala comercial y el biodigestor piloto. El afluente corresponde al purín caracterizado previo a la entrada del reactor en predios con biodigestores funcionando, mientras que el efluente corresponde al material de salida de estos mismos biodigestores. Finalmente, el purín corresponde a muestras colectadas en pozos purineros de predios en que los biodigestores no se encontraban funcionando.

Tanto el afluente, efluente y purín desde pozo purinero varían en su composición, lo que da cuenta de su manejo previo, siendo los purines los más concentrados con un mayor contenido de materia seca. En general existe una alta variación entre los predios, independiente del material colectado, lo que se puede explicar por distintos factores que afectan su composición, siendo los más importantes: el sistema de producción, grado de confinamiento, dieta y tipo de animal y sistema de tratamiento. Los macro y micronutrientes presentes en el sustrato son importantes desde el punto de vista agronómico y necesarios para la producción de biogás, no obstante, sobre ciertas concentraciones, algunos de estos elementos pueden causar inhibición o toxicidad perjudicando la generación de metano (Cheng, 2009). Sin embargo la concentración de estos compuestos en los purines de vaca rara vez exceden el umbral de toxicidad siendo uno de los sustratos más estables para la digestión anaerobia. Además, la tolerancia de los microorganismos a los inhibidores varía con la temperatura, siendo la digestión anaerobia más estable a bajas temperaturas.

Según la caracterización obtenida desde las muestras de purines, se obtienen valores dentro del rango de lo reportado para purines lecheros de sistemas pastoriles para las regiones de Los Lagos y de Los Ríos por Salazar et al., (2007). En el caso del biodigestor piloto, el proceso de digestión anaeróbica implica una remoción de más del 50% de ST y alrededor del 70% en DQO, lo que funciona como un indicativo de la degradación de materia orgánica.

Para DQO y alcalinidad (Tabla 10) se observó una tendencia similar con valores más altos para purín de pozo que para los afluentes y efluentes, respectivamente. Esta variación en la composición es común para la mayoría de los desechos orgánicos (Li et al., 2011).

La medición de alcalinidad total permitió determinar la capacidad tanto del afluente como del efluente para neutralizar ácidos y de esta forma mantener equilibrado el proceso de biodigestión anaeróbica al interior del reactor. Los valores obtenidos en purines y afluentes medidos se encuentran dentro del rango de alcalinidad total reportado por Stafford (1982) para distintas

muestras de purín de lechería en Estados Unidos, cuyo rango varía entre los 3.000 y 6.000 mg/L de CaCO<sub>3</sub>. Además, se registra que para el buen funcionamiento de sistemas anaeróbicos, una alcalinidad total de 1.500 mg/L CaCO<sub>3</sub> es recomendada (Franco et al., 2007), lo que concuerda con lo reportado para el promedio de digestatos medidos desde los biodigestores en funcionamiento.

Sin embargo, para el caso del biodigestor experimental se registró una tendencia de alcalinidad mayor en el efluente por sobre el afluente, lo que sería esperable puesto que, a mayor alcalinidad total, mayor capacidad tamponante y por lo tanto mayor capacidad de mantener equilibrado el pH dentro del biodigestor.

En el caso de DQO, el literatura se reporta que para purines frescos de predios lecheros en Norte América se alcanzan valores entre los 21.500 mg/L (Wu, 2011) y 129.400 mg/L (Burke, 2001). No obstante, un estudio reporta que tras la utilización de purines con una dilución de 100 galones/vaca (0,38 m<sup>3</sup>/vaca) en agua de lavado, el DQO alcanzaría valores de 16.176 mg/L y los 8.627 mg/L con 200 galones/vaca (0,76 m<sup>3</sup>/vaca) (Burke, 2001). En base a estos datos, el valor promedio de DQO para pozos purineros se encuentra dentro del rango esperado. En el caso de los afluentes el promedio de DQO fue menor que el obtenido para purín de pozo, además de tener valores altamente variables, lo que puede deberse a las cantidades de agua utilizadas en lavado de equipos, lavados de piso y aguas lluvia acumuladas en el pozo, además del tiempo de acumulación de purines.

**Tabla 8. Caracterización de afluentes, efluentes y purines de biodigestores a escala comercial.**

Parámetro	Expresión	Unidad	Afluente		Efluente		Purines	
			Promedio	Rango	Promedio	Rango	Promedio	Rango
<b>Materia seca</b>	MS	(%)	2,73	0,30 - 8,70	0,36	0,20 - 0,60	4,96	2,12 - 8,00
<b>Sólidos volátiles</b>	SV	(%)	79,56	69,60 - 96,84	57,79	52,10 - 62,95	76,66	65,60 - 86,64
<b>Cenizas</b>	Cen	(%)	20,44	3,16 - 30,40	42,21	37,05 - 47,90	23,34	13,36 - 34,40
<b>pH</b>	pH	(u)	7,40	6,52 - 8,01	7,11	6,99 - 7,23	6,82	6,57 - 7,16
<b>N total</b>	Nt	(Kg/t)	1,42	0,16 - 4,21	0,38	0,25 - 0,63	1,40	0,44 - 2,92
<b>P total</b>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	(Kg/t)	0,36	0,08 - 1,08	0,13	0,08 - 0,22	0,65	0,17 - 1,52
<b>K total</b>	K <sub>2</sub> O	(Kg/t)	1,00	0,22 - 2,91	0,36	0,25 - 0,61	1,33	0,23 - 3,47
<b>Ca total</b>	CaO	(Kg/t)	0,57	0,12 - 1,57	0,22	0,13 - 0,35	1,12	0,30 - 2,49
<b>Mg total</b>	MgO	(Kg/t)	0,32	0,07 - 0,92	0,13	0,07 - 0,24	0,50	0,09 - 1,15
<b>Na total</b>	Na	(Kg/t)	0,18	0,06 - 0,47	0,10	0,06 - 0,13	0,22	0,06 - 0,52
<b>Cu total</b>	Cu	(g/t)	2,48	1,10 - 4,05	0,81	0,50 - 1,19	2,41	1,38 - 3,98
<b>Fe total</b>	Fe	(g/t)	49,75	11,00 - 111,0	10,00	7,00 - 19,0	189,00	83,0 - 358,0
<b>Mn total</b>	Mn	(g/t)	9,50	3,00 - 21,00	3,25	3,00 - 4,00	12,75	4,00 - 24,0
<b>Zn total</b>	Zn	(g/t)	4,90	0,50 - 16,60	0,99	0,40 - 1,90	9,60	2,50 - 15,20

Fuente: Elaboración propia (2016).

**Tabla 9. Caracterización de afluente y efluente de biodigestor experimental.**

Parámetro	Expresión	Unidad	Afluente		Efluente	
			Promedio	Rango	Promedio	Rango
<b>Materia seca</b>	MS	(%)	0,83	0,56 – 1,14	0,36	0,33 – 0,42
<b>Sólidos volátiles</b>	SV	(%)	69,00	46,46 – 76,40	57,02	48,60 – 64,06
<b>Cenizas</b>	Cen	(%)	24,94	23,24 – 27,66	42,98	35,94 – 51,40
<b>pH</b>	pH	(u)	7,43	6,90 – 7,96	7,08	6,97 – 7,19
<b>N total</b>	Nt	(Kg/t)	0,46	0,39 – 0,59	0,39	0,35 – 0,41

Fuente: Elaboración propia (2016).

**Tabla 10. Análisis de DQO y alcalinidad de afluentes, efluentes y purines.**

Parámetro	Unidad	Afluente		Efluente		Purines	
		Promedio	Rango	Promedio	Rango	Promedio	Rango
<b>DQO</b>	mgO <sub>2</sub> /L	23.887	3.425 - 69.622	3.158	1.821 - 6.024	55.553	5.765 - 162.170
<b>DQO*</b>	mgO <sub>2</sub> /L	12.412	5.230 – 20.260	2.870	1.990 – 5.840	NA	NA
<b>Alcalinidad</b>	mgCaCO <sub>3</sub> /L	4.290	1.192 - 11.697	1.985	1.016 - 3.239	5.109	1.315 - 12.188
<b>Alcalinidad*</b>	mgCaCO <sub>3</sub> /L	1.010	650 – 1.400	1.853	1.240 – 2.388	NA	NA

\*: Biodigestor experimental INIA Remehue.

NA: No aplica

Fuente: Elaboración propia (2016).

### 3. Indicadores de biodigestores en los predios encuestados

La digestión anaeróbica es una tecnología de proceso simple y bajo requerimiento energético establecida para el tratamiento de aguas residuales y otros compuestos orgánicos. El producto final corresponde a la generación de biogás: una mezcla de metano y dióxido de carbono para los cuales se han descrito valores entre los 55-65% y 35-45% respectivamente en purines de lechería (Burke, 2001), pudiendo encontrar también cantidades traza de otros gases como H<sub>2</sub>S y N<sub>2</sub>. La concentración de CH<sub>4</sub> presente en el biogás sumado a otros parámetros como el tipo y concentración de sustrato, temperatura, pH, alcalinidad, TRH, demanda química de oxígeno (DQO) o la presencia de sólidos volátiles (SV) son de suma importancia puesto que dan indicios de la naturaleza del proceso de biodigestión que se lleva a cabo. La recolección de estos datos desde los predios fue necesaria ya que, en todos los biodigestores establecidos, tanto en la Región de Los Ríos como en la Región de Los Lagos, se desconocía de información acerca del potencial energético y la producción de biogás del sistema instalado. Sumado a esto, se encontraba la falta de análisis de sustrato y/o composición del biogás generado.

Contar con información, registros y análisis de distintos parámetros es imprescindible para poder realizar una correcta estimación de la producción de biogás y metano por predio. Para los casos estudiados y reportados en este informe, la estimación de biogás se realizó en base a la cantidad de SV, dado que en literatura se reporta que los datos de afluente (SV de entrada al sistema: SVa) son suficientes para realizar dicha estimación.

Para sistemas lecheros pastoriles se ha descrito que el rendimiento de metano puede alcanzar valores de producción de 0,117 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/Kg SVa (NRCS, 2007), incluso rangos entre los 0,18-0,25 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/Kg SVa (Dairy Australia, sf) si consideramos condiciones mesófilas, la dilución de purines propias de estos sistemas y una concentración de metano en el biogás del 65%. Incluso sería posible otorgar un rendimiento de metano según la localidad (Safley, 1992), describiéndose un factor de 0,24 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/Kg SVa en países de Norte América, Europa y Oceanía, y un factor de 0,13 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/Kg SVa para Asia, África y países Latinoamericanos con sistemas de producción lechera pastoril. En el caso del biodigestor piloto, se registró un rendimiento actual de 0,20 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/Kg SVa, lo que también figura dentro de lo esperado para un sistema de producción lechera pastoril con cortos períodos de confinamiento, y que al igual que en los biodigestores de escala comercial, la feca y orina recolectada desde el patio de espera es diluida con agua en una relación 1:3.

En cuanto a la composición del biogás, se registró una concentración de metano promedio de 61% entre los biodigestores en que se pudo coleccionar muestra de gas, y de 58% en el biodigestor piloto (Tabla 11), lo que se encuentra dentro del intervalo descrito para producción desde sistemas lecheros (Burke, 2001).

Para los biodigestores laguna cubierta en funcionamiento se registró una producción promedio actual de biogás de 9,2 m<sup>3</sup>/predio/día (0,060 m<sup>3</sup>/vaca/día), lo que se encuentra por debajo de los 0,6 m<sup>3</sup>/vaca/día estimados teóricamente por Montalvo y Guerrero (2003) para

un bovino adulto (Imagen 11). No obstante, al depender de la carga orgánica ingresada al biodigestor, la producción de metano depende también del sistema de confinamiento, la raza del animal y el tipo de alimentación, por lo que estos valores pueden ser altamente variables.

Bajo condiciones mejoradas, con un buen manejo de separadores de sólidos y gestión del agua, se logró el ajuste de los ST al 2% en biodigestores de laguna cubierta, 5% en reactores flujo pistón y al 6% en los estanques de mezcla completa, lo que implicó un aumento por sobre un 25% en la producción de biogás en todos los casos (Imagen 12). Sin embargo, el mayor aumento en la producción de biogás se vio reflejado en el predio 4-10, al cual se le consideró una condición mejorada aumentando 6 veces la cantidad de ST ingresados al sistema inicialmente. Esto se lograría con un mejor manejo de los decantadores de manera que éstos retengan una menor cantidad de sólidos.

Para la categoría de estanques de mezcla completa se encuentra el proyecto del biodigestor en el predio 2-10, cuya producción de biogás en una condición mejorada asciende los 100 m<sup>3</sup>/predio/día. Cabe destacar que su alta producción de gas estimada se debe a su gran tamaño, al alto número de vacas que aportan al biodigestor y a su tecnología de estanque agitado con regulación de temperatura, lo que le permite ingresar una mayor carga orgánica sin saturar el sistema.

En el caso del biodigestor experimental en INIA Remehue, considerando 17 vacas en ordeña que aportan al biodigestor (para un afluente actual de 120 L de purín) y una temperatura promedio del reactor de 22°C, se obtuvo producción de CH<sub>4</sub> actual de 0,53 m<sup>3</sup>/predio/día. Tomando en cuenta un contenido de CH<sub>4</sub> del 58% en el biogás (valor medido), se estimó una producción de biogás de 0,95 m<sup>3</sup>/predio/día.

Los potenciales energéticos para los distintos biodigestores se estimaron en base al potencial energético del metano (10 kWh/m<sup>3</sup>) y los SVa, por lo tanto se sigue observando la misma relación de producción entre biodigestores para los potenciales eléctricos y térmicos, según sea el caso (Tabla 12, Imagen 13). Cabe señalar que tanto el predio 2-10 como el 5-10 consideran sistemas de co-generación, por lo que existe tanto un potencial eléctrico como térmico. Bajo una situación actual, el predio 5-10 considera la energía térmica para autoconsumo, utilizándola en calentar el biodigestor, mientras que en una situación mejorada, esta energía sería utilizada con otros fines dentro del mismo predio.

Los valores de producción de biogás y por ende energía eléctrica y/o térmica son bajos para los predios evaluados (Imagen 14, Imagen 15), lo que tiene relación con los sistemas productivos, clima y tipo de digestores utilizados en la Zona Sur de Chile. Se suma a ello que en términos generales el potencial de generación de biogás con purines bovinos es más bajo que con otros sustratos como purines de cerdos, efluentes de queserías, y maíz de ensilaje, entre otros.

El uso de la energía generada producto de biodigestores anaeróbicos en predios lecheros debiera ser la generación de energía eléctrica por sobre la producción de energía térmica por si sola. Esto dado que la mayoría de la tecnología actualmente en uso en salas de ordeña de lecherías usa exclusivamente energía eléctrica. En un menor porcentaje se utiliza energía térmica para calentar agua utilizada en los procesos de higienización y lavado de equipos de ordeña y estanque de leche. Otra ventaja importante del uso de electricidad, a pesar de su menor eficiencia en transformación de biogás que la energía térmica, es que actualmente si existe un superávit este puede, previo contrato, ser colocada en el sistema interconectado nacional.

**Tabla 11. Estimación en la producción de CH<sub>4</sub> y biogás bajo condiciones actuales y mejoradas.**

ID predio	Condición actual				Condición mejorada		
	Contenido de CH <sub>4</sub> en el gas (%)	SVa (Kg/día)	Producción de CH <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> /predio/día)	Producción de biogás (m <sup>3</sup> /predio/día)	SVa (Kg/día)	Producción de CH <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> /predio/día)	Producción de biogás (m <sup>3</sup> /predio/día)
<b>1-10</b>	58,18	25,31	4,7	8,0	126,54	20,7	35,6
<b>2-10</b>	60,98	NA	NA	NA	265,12	61,5	100,8
<b>3-10</b>	55,63	18,43	3,0	5,4	24,58	4,03	7,2
<b>4-10</b>	69,21	13,16	2,4	3,5	87,77	14,4	20,8
<b>5-10</b>	58,69	54,95	9,4	15,9	73,27	12,0	20,5
<b>6-10</b>	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
<b>7-10</b>	60,98	NA	NA	NA	100,24	16,4	26,9
<b>8-10</b>	60,98	NA	NA	NA	12,28	2,01	3,3
<b>9-10*</b>	58,30	2,65	0,5	1,0	NA	NA	NA
<b>1-14</b>	60,98	NA	NA	NA	10,19	1,7	2,7
<b>2-14</b>	63,21	NA	NA	NA	32,12	5,9	9,4
<b>3-14</b>	60,98	NA	NA	NA	14,57	2,68	4,4
<b>Promedio</b>	<b>60,98</b>	<b>27,96</b>	<b>4,9</b>	<b>8,2</b>	<b>74,67</b>	<b>14,3</b>	<b>23,2</b>
<b>Máximo</b>	<b>69,21</b>	<b>54,95</b>	<b>9,4</b>	<b>15,9</b>	<b>265,12</b>	<b>61,5</b>	<b>100,8</b>
<b>Mínimo</b>	<b>55,63</b>	<b>13,16</b>	<b>2,4</b>	<b>3,5</b>	<b>10,19</b>	<b>1,67</b>	<b>2,7</b>

S/I: Sin información

NA: No aplica

\*: Biodigestor experimental INIA Remehue.

Fuente: Elaboración propia (2016).

**Tabla 12. Estimación de potencial energético, eléctrico y térmico bajo condiciones actuales y mejoradas.**

ID predio	Condición actual			Condición mejorada		
	Potencial energético	Potencial térmico	Potencial eléctrico	Potencial energético	Potencial térmico	Potencial eléctrico
(kWh/predio/día)						
<b>1-10</b>	46,6	37,3	NA	207,4	165,9	NA
<b>2-10</b>	NA	NA	NA	614,5	245,8	215,1
<b>3-10</b>	30,2	24,2	NA	40,3	32,2	NA
<b>4-10</b>	24,2	NA	7,3	143,8	NA	43,2
<b>5-10</b>	93,5	28,1	28,1	120,1	36,0	36,0
<b>6-10</b>	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
<b>7-10</b>	NA	NA	NA	6,8	NA	49,3
<b>8-10</b>	NA	NA	NA	0,8	NA	6,04
<b>9-10*</b>	5,3	4,2	NA	NA	NA	NA
<b>1-14</b>	NA	NA	NA	0,7	13,4	NA
<b>2-14</b>	NA	NA	NA	2,5	47,3	NA
<b>3-14</b>	NA	NA	NA	1,1	21,5	NA
<b>Promedio</b>	<b>48,7</b>	<b>29,8</b>	<b>17,7</b>	<b>141,3</b>	<b>80,3</b>	<b>69,9</b>
<b>Máximo</b>	<b>93,5</b>	<b>37,3</b>	<b>28,1</b>	<b>614,5</b>	<b>245,8</b>	<b>215,1</b>
<b>Mínimo</b>	<b>24,2</b>	<b>24,2</b>	<b>7,3</b>	<b>0,7</b>	<b>13,4</b>	<b>6,0</b>

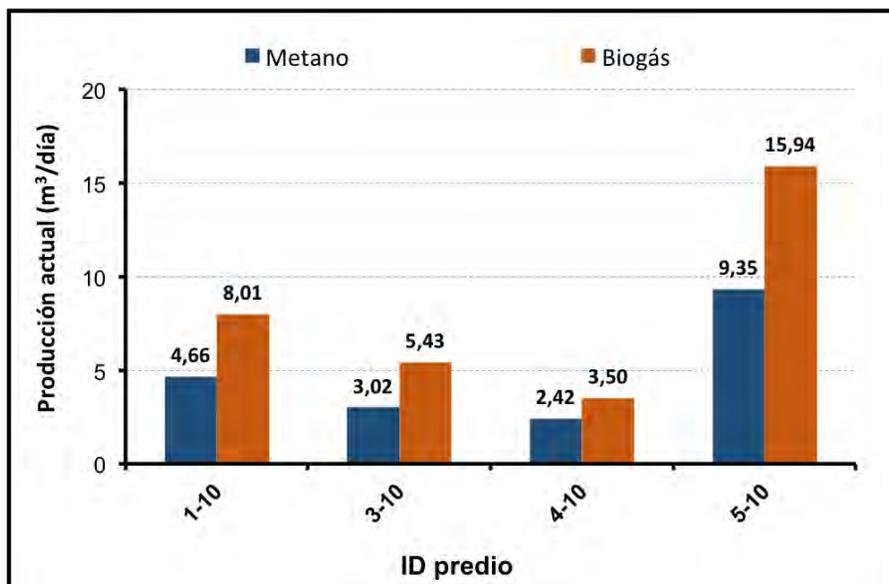
S/I: Sin información

NA: No aplica

\*: Biodigestor experimental INIA Remehue.

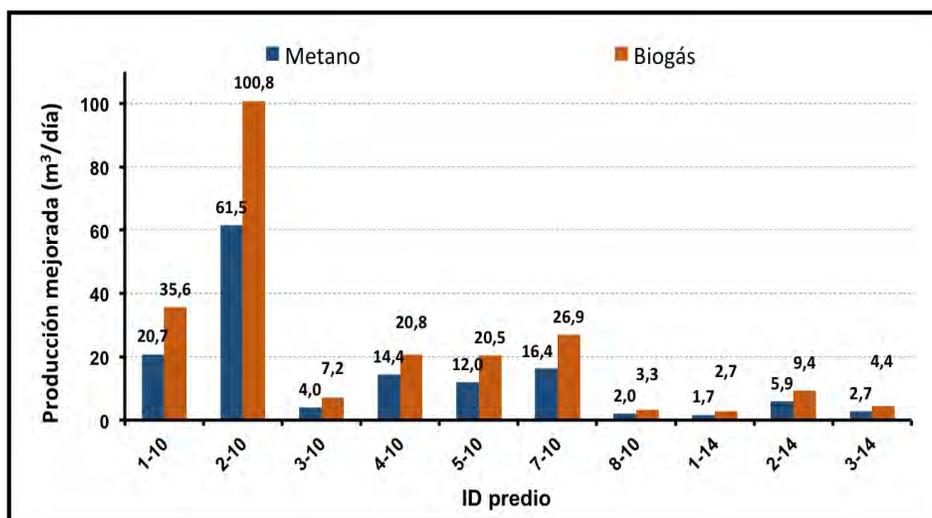
Fuente: Elaboración propia (2016).

**Imagen 11. Producción de CH<sub>4</sub> y biogás por predio en condiciones actuales.**



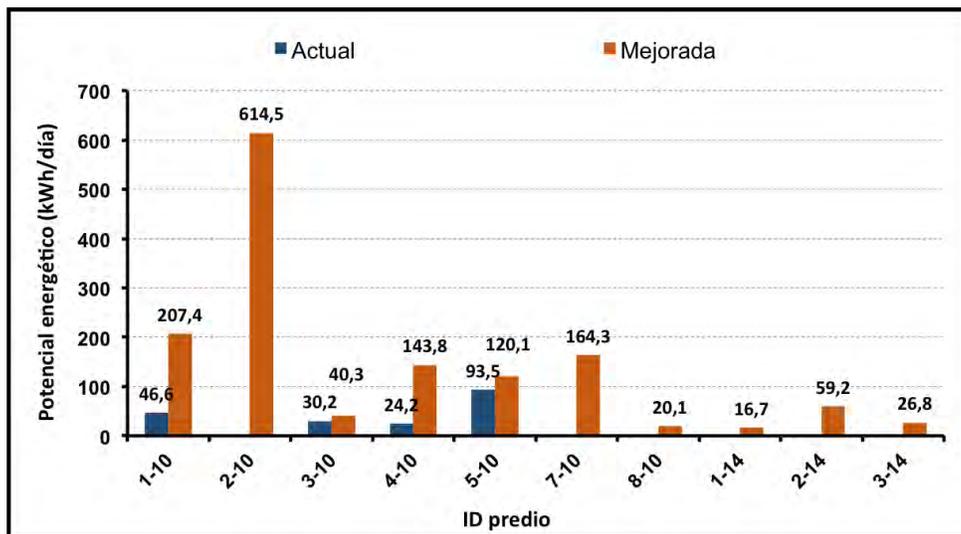
Fuente: Elaboración propia (2016).

**Imagen 12. Producción de CH<sub>4</sub> y biogás por predio en condiciones mejoradas.**



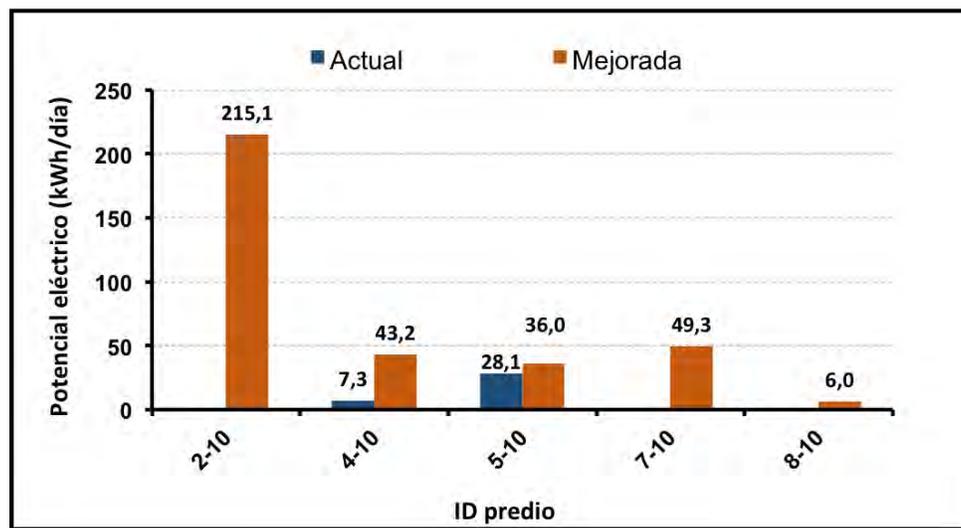
Fuente: Elaboración propia (2016).

**Imagen 13. Potencial energético por predio en base a SV, en condiciones actuales y mejoradas.**



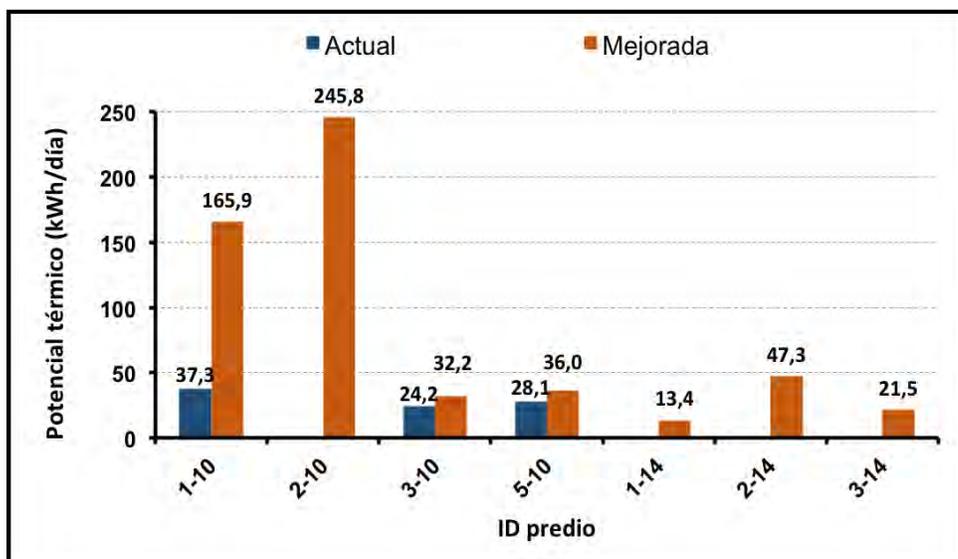
Fuente: Elaboración propia (2016).

**Imagen 14. Potencial eléctrico por predio en base a SV, en condiciones actuales y mejoradas.**



Fuente: Elaboración propia (2016).

**Imagen 15. Potencial térmico por predio en base a SV, en condiciones actuales y mejoradas.**



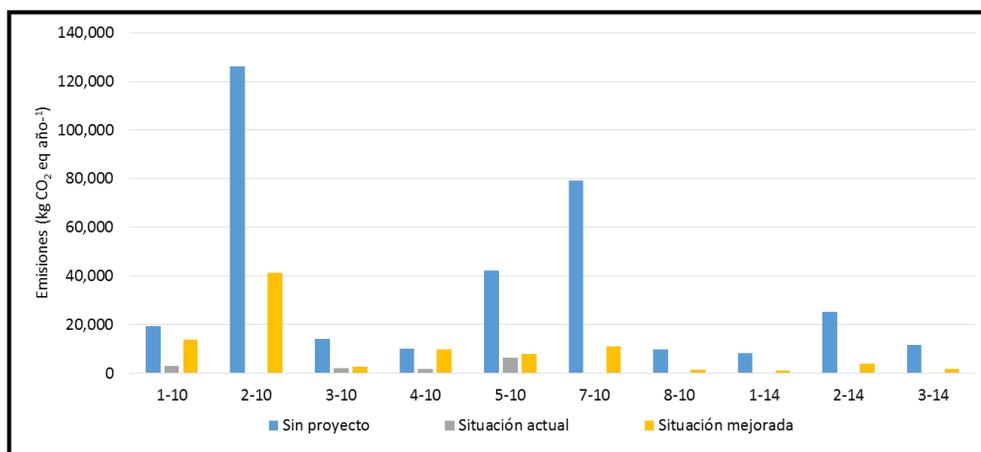
Fuente: Elaboración propia (2016).

### 3. Evaluación del potencial de mitigación en predios con digestión anaeróbica

Para estos cálculos se empleó un Bo de 0,19 y un FCM de 0,68 (IPCC, 2006). El FE obtenido individualmente para cada predio, permite dar cuenta de diferencias en el sistema productivo y en el contenido de sólidos volátiles del purín. Asimismo, el FCM permite incluir diferencias asociadas a variaciones en la ubicación geográfica de cada predio. Los FE empleados variaron entre 3,1 y 21,8 kg CH<sub>4</sub> cabeza<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, dando cuenta de la variación en la concentración de SV del purín a nivel predial asociado a un distinto manejo y dieta animal (Imagen 16).

Los resultados indican que al calcular la mitigación actual de CO<sub>2</sub> eq en base a la directriz de nivel 2 del IPCC, las emisiones directas asociadas a manejo del estiércol se redujeron en un 85% (n=4), en promedio para un año de ejecución, en los predios con biodigestores. Con el uso de biodigestores anaeróbicos la mitigación alcanzó a 18.232,96 kg CO<sub>2</sub> eq año<sup>-1</sup>, en promedio de los 4 predios cuyos biodigestores se encuentran en funcionamiento, a partir de una emisión en la situación sin proyecto que alcanzó en promedio a 21.507,16 kg CO<sub>2</sub> eq año<sup>-1</sup>. Esta mitigación se concentró en la Región de Los Lagos, dado que no existen biodigestores operando en la Región de Los Ríos en la actualidad que se encuentren bajo el estrato de 100 a 500 vacas. La mitigación en la situación mejorada considerando el total de predios que cuentan con biodigestores en la actualidad (n=10) alcanzó a 24.420,66 kg CO<sub>2</sub> eq año<sup>-1</sup>, en comparación a las emisiones registradas en estos 10 predios en la situación sin proyecto (34.629,93 kg CO<sub>2</sub> eq año<sup>-1</sup>). La disminución en la mitigación bajo condiciones mejoradas se debe a que la optimización de los parámetros de funcionamiento del digestor resulta en una mayor generación de metano y, por tanto, de emisiones totales.

**Imagen 16. Emisiones (kg CO<sub>2</sub> eq año<sup>-1</sup>) para predios con biodigestores instalados en las regiones de Los Ríos y de Los Lagos.**



Fuente: Elaboración propia (2016).

## 4. Resultados de evaluación económica de plantas de biogás en funcionamiento

### 4.1 Plantas en funcionamiento bajo una condición actual y mejorada

La evaluación técnico económica de los proyectos de biogás existentes, se realizó bajo dos escenarios: solo biogás y biogás más digestato, considerando una situación actual y una mejorada en los distintos biodigestores.

Tras el análisis en el escenario de sólo biogás bajo condiciones actuales se determinó que los indicadores económicos VAN, TIR y B/C presentan valores negativos para todos los biodigestores en funcionamiento, lo que indicaría que bajo dichas circunstancias ningún proyecto es económicamente viable. Para los predios 1-10 y 4-10 se obtuvo un indicador TIR indeterminado, puesto que no presentaron tener una utilidad anual positiva en el horizonte de tiempo evaluado. En cuanto al Período de Recuperación de la Inversión (PIR), también se obtuvo una condición indeterminada, es decir, que se encuentra más allá del horizonte de tiempo evaluado (10 años) o bien no se recupera dado la estructura de los flujos económicos (Anexo 3b).

Bajo esta misma condición actual, en un escenario de biogás + digestato, los indicadores económicos mejoran, no obstante siguen siendo todos negativos, reforzando la no viabilidad económica de estos proyectos en su condición actual.

Considerando una condición mejorada, en el escenario de biogás + digestato, el predio 1-10 arroja valores positivos para los distintos indicadores analizados (Anexo 3b) y por lo tanto correspondería al único proyecto económicamente viable en estas circunstancias. Por otro lado, bajo un escenario de sólo biogás, los indicadores de rentabilidad (VAN, TIR y B/C) continúan siendo negativos e indicando que los biodigestores en funcionamiento no son viables económicamente. Sumado a esto se encuentran los predios 2-10, 8-10 y 3-14 para los cuales no se arroja una utilidad anual positiva en el horizonte de tiempo estimado.

Con el fin de complementar estos estudios y analizar las plantas de biodigestión con características en común, se realizó un análisis de conglomerado utilizando las cifras promedio de los indicadores de rentabilidad, para cual los valores continuaron negativos, independiente de la tecnología utilizada en los reactores o el destino de la energía en el predio (Anexo 3b).

Finalmente, en base a los resultados se observa que los mejores indicadores de rentabilidad se obtienen en las plantas de biogás que utilizan biodigestores tipo laguna cubierta bajo una condición mejorada de producción, considerando un mejor manejo de purines y aguas, y un uso adecuado de decantadores, con el fin de alcanzar las tasas orgánicas óptimas para cada planta de biogás. Por otro lado, el efecto de la inclusión en las evaluaciones del uso de digestato, hace que en todas las evaluaciones mejoren los indicadores de rentabilidad promedio.

Respecto al modelo de negocios utilizado, se pudo determinar las diferencias entre distintas alternativas de funcionamiento (Anexo 3c). La propuesta de valor es el elemento que permite diferenciar cada modelo e identificar. En general los modelos de negocios se centraron en la posibilidad de la implementación y operación de una planta de biogás para el autoconsumo.

## Logros y fallas en la tecnología implementada en los biodigestores anaeróbicos del área de estudio (lecciones aprendidas)

### Logros y aspectos positivos

**Existencia de biodigestores en predios lecheros en el país.** Si bien la cantidad todavía es baja, es importante destacar la existencia y operación de biodigestores en predios lecheros, tanto ubicados en el área de estudio como en otras regiones del país. La información y experiencia que pueda ser obtenida de ellos permitirá validar la tecnología a nivel nacional, siendo además un poderoso instrumento de transferencia tecnológica entre pares de los biodigestores en buen funcionamiento.

**Motivación y conciencia ambiental de productores lecheros.** Una parte importante de los biodigestores implementados en las regiones de Los Ríos y Los Lagos y también en el país ha sido realizada por motivación personal de los productores lecheros, algunos por su carácter innovador y la mayoría de ellos, como ha sido determinado por el estudio, motivados por su conciencia ambiental. Esto ha significado que en algunos de los casos el financiamiento haya sido 100% privado, solicitando incluso créditos bancarios para su construcción. Además, cabe destacar que, durante el trabajo realizado en el marco de este estudio, la disposición de los agricultores fue muy buena para la entrega de información y la realización de mediciones y colecta de muestras, estando expectantes del potencial desarrollo de esta tecnología en el país y en especial en la Zona Sur.

**Uso de energías alternativas y mitigación de gases con efecto invernadero.** El país ha manifestado su interés en poder incrementar el uso de energías renovables no convencionales con la finalidad de mejorar la matriz energética. Esto ha significado el desarrollo e implementación de distintos instrumentos de incentivo a nivel nacional, como por ejemplo los proyectos “Concurso Innovación en energías renovables” por parte del FIA, los que financiaron el desarrollo de plantas solares fotovoltaicas en lecherías, sistemas de aprovechamiento de biomasa y plantas de biogás y co-generación de energía térmica-eléctrica. Se suma a esto la posibilidad de reducir las emisiones de gases con efecto invernadero producto de su implementación.

**Implementación de nuevas normativas asociadas de biodigestión a nivel nacional.** El desarrollo y la promulgación de nuevas normativas y regulaciones es un aspecto positivo para el país, creando un marco legal y regulatorio que no existe a la fecha y por ende generando directrices para la construcción y operación de los biodigestores. Sin embargo, por lo observado en terreno existe preocupación por parte de los agricultores con biodigestores que algunas regulaciones impidan o limiten la operación de los biodigestores ya instalados en las regiones, en especial si esto implica tener que hacer inversiones no consideradas durante la implementación de su proyecto.

**Capacidad local en universidades e institutos de investigación.** Existen investigadores y profesionales formados en digestión anaeróbica en universidades e institutos de

investigación en el país. Estas capacidades han estado focalizadas principalmente en otros rubros productivos, sin embargo, proyectos como éste generan un incentivo para que dichos profesionales y técnicos se involucren en proyectos locales. Los esfuerzos de hoy serán clave para que a futuro exista un mayor interés público y privado en esta área.

### **Principales problemas asociados al éxito de los biodigestores.**

**Falta de información de los biodigestores a nivel predial.** Faltan registros, mediciones y análisis de los sustratos y biogás a nivel predial, información clave para el funcionamiento y operación del biodigestor. Este aspecto es sin lugar a dudas un tema que será importante mejorar en el desarrollo de este tipo de tecnología a nivel nacional, requiriéndose registros y análisis periódicos los que permitirán hacer una buena evaluación y/o validación a nivel nacional. En este sentido la generación de información en el marco de este estudio se constituye como la primera iniciativa de este tipo realizada en el Sur de Chile para predios lecheros, y contribuirá en forma importante con información que permitirán evaluar de una mejor forma el desarrollo de la digestión anaeróbica bajo las condiciones locales.

**Recursos humanos capacitados.** En general existe un bajo número de profesionales capacitados y formados con experiencia en sistemas de digestión anaeróbica para implementación en predios lecheros. Además, de acuerdo al trabajo desarrollado se pudo establecer que existe una nula o baja capacitación a nivel de operadores de plantas de biogás en predios de producción de leche.

**Problemas de diseño, construcción y operación de biodigestores.** A la fecha, en las regiones de la Zona Sur del país se encuentran funcionando sólo el 50% de los biodigestores existentes. Esto también ocurre en otras regiones del país en donde se han construido biodigestores y actualmente no están operando. Dentro de las principales razones se encuentran errores en el diseño y puesta en marcha de los digestores anaeróbicos, sin descartar errores menores de operación como ocurría en algunos casos tras el mal manejo de las trampas de sólidos, ingresando material no apropiado. Es así como ocurrió en el predio 7-10, con un error de diseño en la estructura del biodigestor, lo que hizo colapsar el sistema. La acumulación de sólidos al interior del reactor, a pesar de tener un sistema de separación de sólidos, impidió que el agitador electromecánico funcionara adecuadamente. De forma similar, tras el funcionamiento del biodigestor del predio 8-10, hubo una acumulación de sólidos al interior del reactor, lo que implicó tener que abrir y vaciar su contenido. Los biodigestores no funcionando son malos ejemplos para los ‘potenciales usuarios de esta tecnología’, en este caso los productores lecheros, en los cuales la toma de decisión pasa normalmente por conocer y analizar experiencias exitosas en pares antes de incorporar una innovación tecnológica en sus predios.

**Baja carga orgánica en sistema de producción leche pastoriles.** El mayor desarrollo de los biodigestores a nivel mundial ha sido realizado en sistemas productivos con un alto

grado de confinamiento, los que generan altos volúmenes de purines con mayor concentración de materia seca. Los sistemas lecheros pastoriles tienen purines muy diluidos y por ende con baja capacidad para la generación de biogás, lo que ha sido constatado en el presente estudio. Se suma a ello el bajo potencial de generación de biogás con purines bovinos en comparación a otros sustratos (Ej. purín de cerdo, efluentes de plantas queseras, otros).

**Aspectos técnicos.** Existen varios aspectos que deben ser considerados como las dimensiones utilizadas en la construcción de los decantadores, las que no son aptas para la mantención y limpieza de estos mismos. La gran profundidad a la que fueron construidos impide la entrada de tractores y otras herramientas que facilitan la remoción de los sólidos acumulados en la superficie. De acuerdo a las evaluaciones realizadas en los biodigestores en funcionamiento, se pudo observar que en los sistemas de laguna cubierta se hace un uso excesivo de los separadores, lo que en purines ya diluidos implica una muy baja carga de materia orgánica que llega al digestor.

Además, la adaptación de equipos a biogás como lo son los motores, generadores, sopladores, calderas, entre otros, presentan problemas técnicos al poco de tiempo de uso, lo que puede deberse al ingreso de sustancias corrosivas como  $H_2S$ . La falta de un sistema de agitación provoca el endurecimiento de sólidos no filtrados al interior del biodigestor tipo laguna, tipo pistón o con mezcla completa sin agitación, formando una costra difícil de deshacer. Esto implica tener que realizar mantenciones periódicas abriendo el biodigestor para la remoción de sólidos, pudiendo dañar materiales como la geomembrana que reviste al mismo reactor. Algunas de las plantas de biogás poseen la instalación de equipos medidores de flujo de gas lo que provoca la pérdida de presión del gas de entrada a las calderas, debiendo considerarse sopladores u otros que permitan mantener un flujo para su uso.

**Mejor uso de los efluentes generados.** Faltan planes de manejo agronómico para un uso adecuado de los efluentes generados, que permitan hacer una buena valoración agronómica de los nutrientes contenidos en éstos. La normativa de uso de digestato será clave en el desarrollo y masificación de su uso. Hoy en día es posible aplicar purines crudos sin una regulación específica para ello, que en el caso del uso de digestato será regulada y además incorporará el tratamiento de los purines, colocándolos en otro estatus en relación a la normativa existente en el país.

**Condiciones climáticas.** En la Zona Sur del país, específicamente en las regiones de Los Ríos y Los Lagos se registran bajas temperaturas, esto es considerando la diferencia entre la temperatura óptima para la digestión anaeróbica versus la temperatura registrada en los biodigestores de la misma zona. Considerando que la tecnología que actualmente se está utilizando en estos biodigestores carece de sistemas de aislación y/o regulación de la temperatura interior, se requiere del uso de parte de la energía producida por biogás para poder aumentar la tasa de generación de este mismo y/o aumentar los tiempos de retención hidráulicos. La alta pluviometría además provoca problemas en los gasómetros de biodigestores sin estructura fija, por la acumulación de agua sobre la superficie del

biodigestor (geomembrana), aspectos importantes a considerar en su diseño y operación, sin embargo la sequía del presente año en particular ha dificultado la implementación de los nuevos biodigestores haciendo más extenso el proceso de llenado del biodigestor por el bajo volumen de purines generados. Este tipo de inconvenientes se observan en el predio 2-14 y 3-14.

**Proveedores de tecnología.** La falta de experiencia y/o conocimiento de los sistemas de producción de leche de empresas proveedoras del servicio se presenta como dificultad para asistir las necesidades particulares de cada predio, existiendo además falencias en el servicio post venta. Existe una baja presencia de proveedores locales y de equipos para la implementación de biodigestores. Los problemas post venta para los casos en estudio corresponden principalmente a la escasez de proveedores que ofrezcan un servicio de mantención/reparación para las tecnologías disponibles. Esto afecta directamente en la poca variedad de precios en el mercado y alternativas de financiamiento por parte de los propietarios. Si bien hay digestores funcionando, también hay un gran porcentaje de proyectos que están abandonados o sin operar, lo cual ha sucedido por distintas razones, siendo una de ellas el incorrecto diseño de los digestores anaeróbicos para las condiciones tanto de sistemas productivos como climáticas en el Sur de Chile. Se ha podido observar una evolución positiva entre los primeros proyectos instalados versus los nuevos los cuales consideran mejoras importantes en su diseño, como por ejemplo el uso de separadores de sólidos.

**Aspectos económicos.** La implementación de biodigestores en predios lecheros requiere un costo importante de inversión y posterior mantención y operación la cual puede ser crítica en el momento de decidir por el productor versus otros posibles proyectos de inversión. Además, existen pocos incentivos económicos para la implementación de biodigestores en predios lecheros. Por lo que es necesario contar con instrumentos de apoyo a los biodigestores ya establecidos y para los nuevos que quieran implementarse en las regiones en estudio. Un aspecto clave en el desarrollo de la digestión anaeróbica en otros países ha sido la implementación de incentivos, lo que ha permitido por un lado establecer un mayor número de proyectos y a la vez dar las bases para el incremento y desarrollo de empresas de servicio asociadas tanto para la construcción como se servicios asociados a la generación de biogás. Otra limitante importante es la coyuntura económica de los productores lecheros actualmente en que el precio histórico pagado por litro de leche es bajo, lo que limita las inversiones en este sector. Al respecto es importante destacar que el costo directo de la electricidad es de 3-4% del litro de leche producido, por lo que los productores normalmente focalizan sus esfuerzos en temas de alto impacto como alimentación, reemplazos de animales y recursos humanos.

## Propuesta metodológica para el monitoreo de proyectos de biogás en el tiempo.

En algunos países se cuenta con bases de datos de los digestores anaeróbicos existentes siendo en la mayoría de los casos un registro voluntario, ya sea de libre acceso o con algún costo asociado, apoyados por distintas instituciones privadas o gubernamentales (Tabla 14). Por ejemplo, en Estados Unidos existe una base de datos de biodigestores anaeróbicos creada por la “Environmental Protection Agency”, la cual contiene un registro de los diferentes proyectos para distintas categorías animales y tipos de tecnología. Además, informa del estado del biodigestor, empresa proveedora de servicios, reducciones en las emisiones de metano implicadas e incluye un mapa detallado con las coordenadas e información de cada predio. En el Reino Unido, el National Non Food Crops Centre, incorpora el mismo sistema de registro para los biodigestores pertenecientes a estos países. Sin embargo, cabe destacar que estas entidades se encargan de recopilar información de tipo voluntaria para el registro de biodigestores, lo que implica que estas bases de datos no necesariamente representan la totalidad de plantas de digestión anaeróbicas existentes.

Actualmente en Chile no existe un registro oficial y estandarizado para biodigestores de todos los tamaños en predios de productores lecheros u otro tipo a nivel nacional. Sin embargo, la nueva reglamentación permitirá que todos los biodigestores sean incorporados en una base de datos mediada por la SEC para el registro, control y seguridad de las plantas de biogás a nivel nacional. Dentro del marco regulatorio y según lo establecido en el DFL N°1 de 1979 del Ministerio de Energía y su modificación mediante la Ley 20.339, se establece la obligatoriedad de la inscripción de personas naturales y jurídicas que produzcan, importen, distribuyan, almacenen, abastezcan o comercialicen biogás. Sumado a esto, las inscripciones serán llevadas a cabo por la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) y además, será esta misma entidad quien se encargue de fiscalizar el cumplimiento de los requisitos de seguridad en las instalaciones de gas. Más aún, en Julio del presente año, el Ministerio de Energía puso a disposición de consulta pública la propuesta de modificación al “Reglamento de seguridad de las plantas de biogás y modificaciones al reglamento de instaladores de gas” del decreto supremo N°191, la cual actualmente se encuentra en proceso de aprobación en contraloría, disponible en el siguiente link: [http://www.minenergia.cl/archivos\\_bajar/ucom/reglamentos/DS\\_119%20Ingreso\\_CGR.pdf](http://www.minenergia.cl/archivos_bajar/ucom/reglamentos/DS_119%20Ingreso_CGR.pdf)

Este reglamento tiene como objetivo velar por la seguridad de las personas y bienes en los aspectos vinculados a la construcción y operación de las plantas de biogás. Una vez aprobado y en vigencia dicho reglamento, la SEC pondrá en marcha un procedimiento para el registro de plantas de biogás a nivel nacional. El registro se aplica a toda instalación, sin importar el tamaño de ésta (industrial o domiciliaria), o el uso del biogás (generación eléctrica y/o térmica, quema, o combustible).

El registro incorpora a todas las plantas que generen biogás y que se encuentren construidas y en operación o a punto de iniciar la etapa de puesta en marcha, las que deben informarse con una plazo máximo de 180 días posterior a la publicación del nuevo reglamento de

seguridad para instalaciones de biogás. El procedimiento se encuentra establecido en la Resolución Exenta 014841 (agosto del 2016) de la SEC, cuyo formulario de registro se encuentra como Anexo 4. Además, se debe hacer entrega de una carpeta con documentos de registro de la planta de biogás, incluyendo la identificación del solicitante del registro, propietario e instalador involucrado en el proyecto y la descripción general del proyecto (coordenadas, planos de área de construcción, tipo de tecnología, entre otros). Detalles de este procedimiento se pueden encontrar en la “Guía didáctica para el registro de plantas de biogás en Chile”, disponible en el siguiente link: [http://www.sec.cl/portal/page?\\_pageid=33,6527711&\\_dad=portal&\\_schema=PORTAL](http://www.sec.cl/portal/page?_pageid=33,6527711&_dad=portal&_schema=PORTAL).

Cabe destacar que este registro no constituye una aprobación por parte de la SEC, por lo que una vez reunida la información, ésta debe ser revisada y aprobada ante la SEC para que quede debidamente registrada y la planta pueda operar sin restricciones de acuerdo a lo diseñado. Al igual que las instalaciones de mayor tamaño, las plantas demostrativas también se deben registrar y las plantas piloto deben solicitar autorización provisoria para operación ante la SEC.

Con el fin de llevar un monitoreo y control de las plantas de biogás existentes y en construcción, el nuevo reglamento (aún en trámite) exige la notificación de inicio de actividades, posibles modificaciones y término definitivo de operación de una planta de biogás ante la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (Tabla 13), organismo encargado de fiscalizar y supervigilar el cumplimiento del presente reglamento. Por lo demás, para todas las plantas se requiere de una certificación e inspección periódica y mantener el registro de certificaciones, mantenimientos, reparaciones e inspecciones según el artículo N°9, además de la capacitación a todo el personal que participe en la operación de la planta. Para las instalaciones medianas y grandes se exige un monitoreo y registro mensual de la producción de biogás, y uno por lo menos trimestral de la calidad del biogás producido (concentración de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S y humedad).

Es importante además considerar que la fecha en el país, los proyectos que deben someterse a Evaluación o Estudios de Impacto Ambiental de acuerdo al Reglamento de la Ley N° 19.300 de Bases del Medio Ambiente, debieran quedar registrados en su sitio web. En línea con esto, el Ministerio de Energía en conjunto con el Servicio de Evaluación ambiental elaboraron la “Guía para la evaluación de impacto ambiental de centrales de generación de energía eléctrica con biomasa y biogás” (2012), la cual nace ante la preocupación de uniformar los antecedentes, requisitos e información necesaria para la evaluación ambiental conducido por el SEA. Sin embargo, dicha guía aborda sólo proyectos de centrales generadoras de energía eléctrica con biomasa o biogás mayor a 3 MW, y no proyectos de menor tamaño o proyectos que contemplen otros sistemas tales como calderas a gas, lo que sucede ser el caso de los biodigestores identificados a través del presente estudio.

Para la mantención del registro será importante también que los organismos públicos como INDAP, SERCOTEC, CORFO, FNDR, o FIA y otros no gubernamentales, que participan en el financiamiento y subsidio de proyectos de plantas de biogás del país, notifiquen ante

la SEC dichos proyectos, previo al inicio de actividades y construcción. Esto con el fin de asegurar la certificación para toda planta nueva en base al artículo N°6 del reglamento.

Se sugiere además la posibilidad de incorporar en el Censo Agropecuarios y Forestal o en encuestas y/o estadísticas inter censales, realizados por el Instituto Nacional de Estadísticas, preguntas relacionadas con la existencia, tecnología y operación de biodigestores en predios ganaderos de Chile. Esto permitirá complementar y revisar la base de datos nacionales.

Entre los registros a considerar en dicha encuesta, se sugiere incorporar:

- Estatus de la planta
- Tipo de reactor
- Año de construcción
- Número de reactores
- Número de animales considerados en proyecto (tanto vacas masa como vacas en ordeña)
- Uso que se le da al biogás
- Capacidad instalada ( $m^3$  biogás/h o kWh)
- Potenciales térmicos/eléctricos y de generación de biogás
- Porcentaje promedio de metano en biogás
- Fuente de financiamiento (público o privado)
- Costo de la inversión (CLP\$)
- Modelo de negocios (autoconsumo o venta de excedentes)

## Conclusiones y recomendaciones

### Conclusiones

De acuerdo al presente estudio se pudo determinar que existen 14 biodigestores en predios lecheros de las regiones de Los Ríos y de Los Lagos. De este total, 6 biodigestores se encuentran operativos y funcionando, 7 sin funcionar y uno corresponde a un biodigestor escala piloto (experimental). Los digestores anaeróbicos que se encuentran en funcionamiento son en su mayoría del tipo laguna cubierta y flujo continuo, sin sistemas de agitación ni calefacción. En menor cantidad, se identificaron digestores tipo flujo pistón y estanques de mezcla completa (con sistema de agitación incorporada). Su diseño y construcción ha sido realizada por distintas empresas proveedoras, siendo una de origen local la que tiene un mayor número de biodigestores instalados y en construcción.

En base al número de predios lecheros para la Región de Los Ríos y la Región de Los Lagos, los biodigestores establecidos en la misma zona de estudio representan un 0,15% del total de predios lecheros, los cuales funcionan generando biogás a partir de purín bovino. Estos datos evidencian, la baja inserción que esta tecnología ha tenido en la zona estudiada a la fecha.

Todos los predios evaluados tienen sistemas de producción basado en praderas, que son característicos del sur de Chile, con bajo o nulo confinamiento animal. Esto implica la generación de purines con bajo contenido de materia seca, carga orgánica y de producción de metano. En general los análisis realizados de purines mostraron muy bajos valores de materia seca, lo se explica por la baja contribución de fecas y la alta contribución de aguas lluvia y de lavado en la producción de purines.

A nivel predial existe escasa o nula información de la producción de purines y de información técnica y análisis de la producción de biogás. No existen registros de las producciones de metano ni del aporte de la energía eléctrica y/o térmica generada. Esta información es clave para poder planificar desarrollos a futuro y poder evaluar económica y ambientalmente, junto con validar las tecnologías, para el uso de digestores en el sur del país.

En cuanto al potencial de mitigación en predios con biodigestores anaeróbicos implementados, el estudio estimó que las emisiones se redujeron en promedio 85% cuando se implementó la tecnología, en relación a la situación sin proyecto. La mitigación alcanzada fue equivalente a 18.232,96 kg CO<sub>2</sub> eq año<sup>-1</sup>, concentrándose principalmente en la región de Los Lagos por contener la mayor cantidad de biodigestores en funcionamiento. Esta mitigación representa a la fecha solo un muy bajo porcentaje de los generado a nivel regional.

La evaluación económica muestra que al considerar una condición mejorada, dada por un mayor contenido de materia seca al digestor, sólo un predio es económicamente viable (1-10), bajo un escenario de autoconsumo de “biogás + digestato” y considerando una tasa de

descuento del 10%. El resto de los predios evaluados, tanto para la condición actual (n=4 predios) como mejorada (n=9 predios), no son económicamente rentables, sin embargo existe una tendencia de rentabilidad más positiva en un escenario de “biogás + digestato”, dado por los ahorros en la compra de fertilizantes en los predios.

Dentro de los logros identificados a la fecha se pueden destacar principalmente la existencia de biodigestores en operación en predios lecheros en el país, motivación y conciencia ambiental de productores lecheros, interés del país por uso de energías alternativas y mitigación de gases con efecto invernadero, implementación de nuevas normativas asociadas de biodigestión a nivel nacional y capacidad local en universidades e institutos de investigación. Por el contrario como principales limitaciones son la falta de información de los biodigestores a nivel predial, escasez de recursos humanos capacitados, problemas de diseño, construcción y operación de biodigestores, sistemas de producción leche pastoriles con bajo aporte de carga orgánica, fallas en aspectos técnicos de diseño, construcción y operación de digestores, falta de un mejor uso de los digestatos generados a nivel predial, condiciones climáticas templadas, falta de experiencia en construcción y operación de biodigestores y conocimiento de los sistemas de producción lecheros de los proveedores de tecnología, alto costo de inversión, y validación de tecnologías en la zona sur del país.

El proyecto ha generado información técnica de los biodigestores localizados en las regiones de Los Ríos y de Los Lagos, generando fichas técnicas para cada uno de ellos. La generación y actualización de una base de datos permanente de digestores anaeróbicos en Chile, debiera ser realizada y coordinada por la Superintendencia de Energía y Electricidad, que de acuerdo a la reciente normativa es la que estará a cargo del registro de digestores, su funcionamiento y aviso de término de operaciones. Por lo tanto esta será la base de datos oficial del país, la cual se puede complementar con el requerimiento de informar a la SEC de todos los organismos públicos que financien este tipo de tecnologías. Además, debiera considerarse la incorporación de preguntas clave en los censos e inter censos agropecuarios.

De acuerdo a lo señalado previamente, si bien la digestión anaeróbica es posible técnicamente, requiere de un mayor grado de desarrollo tecnológico adaptado a las distintas condiciones climáticas y de sistemas productivos lecheros del sur de Chile, que permitan a los productores tener rentabilidades positivas por el autoconsumo y/o venta de energía producida por los biodigestores.

## Recomendaciones

- Registros y evaluaciones biodigestores existentes. Será importante implementar registros de la producción de biogás, producción y consumos energéticos en los predios con biodigestores funcionando. Esta información será clave para analizar la eficiente operación del biodigestor y poder hacer evaluaciones técnicas y económicas

que permitan mejorar su desempeño. Dentro de los aspectos claves y necesarios para el buen funcionamiento de las plantas de biogás está en realizar análisis de los sustratos, biogás, y el digestato producido.

- Asistencia técnica a los biodigestores instalados. Se deberá considerar una asistencia técnica a los predios lecheros con biodigestores instalados, que permita evaluar su funcionamiento e implementar medidas para su uso eficiente. Un modelo a seguir es el desarrollado en Costa Rica por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), quienes a través de fondos concursables nacionales e internacionales han apoyado la instalación, puesta en marcha y mantención de biodigestores en predios lecheros y de otros rubros. En el país se podrían utilizar instrumentos de fomento (Ej. Programa de Desarrollo de Proveedores) y de transferencia tecnológica (Ej. Grupos de Transferencia Tecnológica) co financiados por privados y el estado.
  
- Formación técnica y capacitación. Se requiere la formación de recurso humanos en la incipiente cadena de biogás existente, debiendo además capacitarse a los dueños y operarios de biodigestores en predios lecheros. Se deben realizar cursos de formación para operadores de biodigestores y para instaladores, aumentando la oferta actualmente existente en la zona sur.
  
- Manejo de purines, afluentes y digestato. Se requiere aumentar los contenidos de materia seca en los purines generados y la cantidad de materia orgánica disponible para la digestión. Una de las estrategias para evitar esta dilución es canalizar en forma independiente las superficies techadas, reducir la producción de aguas sucias del lavado de pisos e instalaciones. También se deberá evitar el uso excesivo de separadores de sólido, que impliquen afluentes extremadamente diluidos. En cuanto al uso del digestato será importante implementar planes de manejo y/o fertilización que consideren las demandas de nutrientes de la pradera y cultivos, fechas y dosis de aplicación. Para la fertilización de praderas y/o cultivos es importante saber su composición. Para ello, se recomienda realizar un análisis básico de residuos orgánicos, considerando a lo menos materia seca, pH, nitrógeno total, nitrógeno amoniacal, fósforo, potasio, calcio y magnesio. Análisis más completos dependerán de los requerimientos de cada agricultor, considerando la demanda nutricional del cultivo o pradera donde serán utilizados.

Finalmente, la implementación y masificación de la digestión anaeróbica en el país, y en especial en predios lecheros de la zona sur de Chile requiere del desarrollo de capacidades técnicas, humanas, regulatorias y apoyos económicos que permitan hacer viable su operación tanto desde el punto de vista técnico como económico. Se requiere poder validar tecnologías adaptadas a las condiciones climáticas y de los distintos sistemas productivos existentes.

**Tabla 13. Reglamentación para el inicio, mantención, modificación y término de actividades en plantas de biogás.**

Tipo de instalación	Aviso de inicio de obras	Inscripción de la planta ante la SEC	Certificación e inspección periódica de acuerdo a procedimientos y periodicidad establecido por la SEC	Modificación de planta	Inspecciones periódicas a operadores y plantas	Registro de producción de biogás	Aviso de término definitivo de operaciones
<b>Pequeña:</b> Instalación de producción y suministro de biogás cuya potencial nominal es $\geq 180$ kW.	Sin información	Sí	Sí	Notificar según lo comprendido en artículo N°85 del reglamento de seguridad.	Cuando corresponda según lo determinado por la SEC.	Sin información	Sí, aviso por propietario antes de dicho término.
<b>Mediana:</b> Instalación de producción y suministro de biogás cuya potencial nominal es $\geq a 180$ y $\leq 900$ kW.	Previo al inicio de obras de construcción, el propietario deberá comunicar este hecho a la Superintendencia.	Sí	Sí				
<b>Grande:</b> Instalación de producción y suministro de biogás cuya potencial nominal es $> a 900$ kW.		Sí	Sí, además de una certificación de conformidad según artículo N°43 del reglamento.				
<b>Instalación industrial:</b> instalación de uso o consumo industrial de biogás destinada a procesos productivos o manufactureros.	Sin información	Sí	Sí			Sí, con el fin de estimar la potencial nominal de la instalación.	
<b>Instalación domiciliaria:</b>	Sin información	Sí	Sí	Notificar según lo comprendido en artículo	Sin información		

instalación de uso o consumo residencial o comercial para uso exclusivo de sus ocupantes, ubicada tanto al interior como al exterior de las edificaciones.				N°65 del reglamento de seguridad. Intervenciones menores fuera de dicho artículo no requieren ser notificadas por propietario.		
<b>Instalación de quema de biogás:</b> instalación de uso o consumo donde la totalidad del biogás producido se quema completamente, sin un aprovechamiento energético.	Sin información	Sí	Sí	Notificar según lo comprendido en artículo N°85 del reglamento de seguridad.		Sí, con el fin de estimar la potencial nominal de la instalación.

Fuente: Elaboración propia en base a reglamento de seguridad de las plantas de biogás con modificaciones al reglamento de instaladores de gas (2016).

**Tabla 14. Bases de datos internacionales de biodigestores**

<b>País</b>	<b>Entidad</b>	<b>Fuentes a apoyo</b>	<b>Link de Referencia</b>
<b>EEUU</b>	EPA: US Environmental protection agency	AgSTAR	<a href="https://www.epa.gov/agstar/livestock-anaerobic-digester-database">https://www.epa.gov/agstar/livestock-anaerobic-digester-database</a>
<b>Reino Unido</b>	National Non Food Crops Centre	Dpto. de Medioambiente, comida y asuntos rurales; Dpto. De energía y cambio climático.	<a href="http://www.biogas-info.co.uk/resources/biogas-map/">http://www.biogas-info.co.uk/resources/biogas-map/</a>
<b>Varios</b>	Energy and power group	Universidad de Oxford	<a href="http://epg.eng.ox.ac.uk/content/anaerobic-digestion">http://epg.eng.ox.ac.uk/content/anaerobic-digestion</a>
<b>Unión Europea</b>	European Biogas Association	European Biogas Association	<a href="http://european-biogas.eu/policies/">http://european-biogas.eu/policies/</a>

Fuente: Elaboración propia (2016).

## Referencias

- Betts C., K. C. Ling. 2009. Cooperative approaches for implementation of dairy manure digesters. Research report 217.
- Burk D. A. 2001. Dairy Waste Anaerobic Digestion Handbook: Options for recovering Beneficial Products from Dairy Manure. Environmental Energy Company.
- Cheng J. 2009. Biomass to Renewable Energy Processes. CRC Press.
- Dairy Australia, sf. Is Biogas Technology Right for Australian Dairy Farms?
- Engels H., W. Edelman, J. Fuchs, K. Rottermann. 1993. Survival of plant pathogens and weed seeds during anaerobic digestion. *Water Science Technology*, 27(2):69-76.
- Faires M., C. Simmang. 1994. Termodinámica. Editorial Limusa. México.
- Farret F.A., M. Godoy Simoes. 2006. Integration of Alternative Sources of Energy. John Wiley & Sons, United States of America.
- Franco A., A. Mosquera-Corral, J.L. Campos, E. Roca. 2007. Learning to operate anaerobic bioreactors. *Communicating Current Research and Educational Topics and Trends in applied microbiology*, 618-627.
- Gibson, C. 1995. Farm dairy effluent management. *New Zeland Dairy Exporter*, 72:22-24.
- GTZ. Comisión Nacional de Energía. 2006. Guía del mecanismo del desarrollo limpio para proyectos del sector Energía en Chile.
- GTZ. Comisión Nacional de Energía. 2007. Potencial de Biogás. Identificación y clasificación de los distintos tipos de biomasa disponibles en Chile para la generación de biogás.
- Hill D.T., S.E Taylor, T.E Grift. 2000. Simulation of low temperatura anaerobic digestion of dairy and swine manure. *Bioresource Technology*, 78:127-131.
- IPCC, 2006. Directrices del IPCC de 2006 para los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero. Capítulo 3: Combustión móvil. 78 p.
- IPCC, 2006. Directrices del IPCC de 2006 para los Inventarios Nacionales de Gases de

Efecto Invernadero. Capítulo 10: Emisiones resultantes de la gestión del ganado y del estiércol. 91 p.

IPCC, 2014. Annex II: Glossary [Mach, K.J., S. Planton and C. von Stechow (eds.)]. In: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, p. 117-130.

Kearney TE, MJ. Larkey, JP Frost, PN Levett. 1993. Survival of pathogenic bacteria during mesophilic anaerobic digestion of animal waste. *Journal of Applied Bacteriology*. 75(3):215-9.

Krich K., D. Augenstein, J. Batmale, B. Rutledge, D. Salour. 2005. Biomethane from dairy waste. A sourcebook for the production and use of renewable natural gas in California. *Western United Dairymen*, p282.

Li J., A. Kumar, J. He, Q., Ban, S. Chang, P. Wan. 2011. Assesment of the effects of dry anaerobic co-digestion of cow dung with waste wáter sludge on biogás yield and biodegradability. *International Journal of the Physical Sciences Vol. 6(15)*, pp. 3723-3732, 4.

Montalvo M., J. Silvio, L. Guerrero. 2003. Tratamiento anaerobio de residuos. Producción de biogás. Chile: Universidad Técnica Federico Santa María. 416 p.

NRCS. United States Department of Agriculture. 2007. An analysis of energy production costs from anaerobic digestion systems on U.S. livestock production facilities. Technical note, N.1.

ODEPA, Ingeniería Alemana S.A. 2009. Estudio para la evaluación socioeconómica ambiental de tres prototipos de biodigestores.

ODEPA, 2015. Boletín de la leche: avance de recepción y elaboración de la industria láctea. Información año 2015, p66.

Safley L. M. Jr., M.E. Casada. 1992. Global methane emissions from livestock and poultry manure. EPA, p221.

Safley L. M., P.W Westerman. 1994. Low-temperature digestion of dairy and swine manure. *Bioresource Technology*, 47, 165–171.

- Salazar F.J., J.C. Dumont, M.A. Santana, B.F. Pain, D.R. Chadwick, R. Owen. 2003. Prospección del manejo y utilización de efluentes de lecherías en el sur de Chile. Arch. Med. Vet. XXXV, N°2.
- Salazar F., J. Dumont, D. Chadwick, R. Saldaña, M. Santana. 2007. Characterization of Dairy Slurry in Southern Chile Farms. Agricultura Técnica 67(2):155-162.
- Salazar F. 2012. Manual de manejo y utilización de purines de lechería. Consorcio lechero. 1° edición, p118.
- Stafford Mary, G. 1982. The effect of pH on methane production from dairy cattle manure. Retrospective Theses and Dissertations. Paper 659.
- Wu, X., C. Dong, W. Yao, J. Zhu. 2011. Anaerobic digestion of dairy manure influenced by the waste milk from milking operations. Journal of Dairy Science 94 :3778–3786.

## Sitios Web

Dairy Australia. [Consultado en Octubre, 2016] ([http://frds.dairyaustralia.com.au/wp-content/uploads/2013/05/FINAL\\_Biogas-technology\\_A4-report-summary.pdf](http://frds.dairyaustralia.com.au/wp-content/uploads/2013/05/FINAL_Biogas-technology_A4-report-summary.pdf))

Energy Saver. USA Department of Energy. [Consultado en Julio, 2016]. (<http://energy.gov/energysaver/furnaces-and-boilers>)

GTZ, Comisión Nacional de Energía, Chile. Potencial de biogás en Chile. 2007. [Consultado en junio, 2016]. ([http://www.inapiprojecta.cl/605/articles-1660\\_recurso\\_1.pdf](http://www.inapiprojecta.cl/605/articles-1660_recurso_1.pdf)).

Instituto Nacional de Estadísticas. 2007. Censo agropecuario 2007. [Consultado en Julio, 2016] ([http://www.ine.cl/canales/chile\\_estadistico/censos\\_agropecuarios/censo\\_agropecuario\\_07.php](http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/censos_agropecuarios/censo_agropecuario_07.php))

Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). [Consultado en Julio, 2016]. (<http://www.odepa.cl/estadisticas/productivas/>).

USDA. NRCS. 2009. Anerobic digester 366. Conservation practice Information sheet. [Consultado en Octubre, 2016]. ([https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/16/nrcs143\\_026500.pdf](https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/16/nrcs143_026500.pdf))

## Anexos

### Anexo 1. Referencias asociadas a base de datos de biodigestores en predios lecheros de las regiones de Los Ríos y Los Lagos.

Centro Nacional para la Innovación y Fomento de las Energías Sustentables. Disponible en <http://cifes.gob.cl/en/renovable-en-persona-resi-reinecke-biogas-en-la-industria-lechera/> (consultado en Abril, 2016).

Empresa Biotecsur. Disponible en <http://biotecsur.cl/proyectos-realizados-cofinanciados-por-sercotec-2014/> (Consultado en Abril, 2016).

Revista agrícola, Número 125, agosto, 2013. Disponible en [https://issuu.com/australosorno/docs/revista\\_agricola\\_agosto\\_2013](https://issuu.com/australosorno/docs/revista_agricola_agosto_2013) (Consultado en Abril, 2016).

Ministerio de Energía. Disponible en <http://proyectosdae.minenergia.cl/muestraproyecto.php?idProyecto=294> (Consultado en Marzo del 2016).

Empresa Biotecsur. Disponible en <http://biotecsur.cl/2011-biodigestores-energia-termica-el-coique/> (Consultado en Abril, 2016).

Empresa Biotecsur. Disponible en <http://biotecsur.cl/2012-planta-biogas-21kva-fundo-el-maqui/> (Consultado en Abril, 2016).

Empresa Biotecsur. Disponible en <http://biotecsur.cl/2011-planta-biogas-31kva-fundo-quebrada-honda/> (Consultado en Abril, 2016).

Energía en Chile. Disponible en <http://www.energiaenchile.cl/excremento-de-200-vacas-generan-8-horas-de-energia-electrica-al-dia/> (consultado en Mayo, 2016).

Consorcio Lechero. Disponible en <http://www.consorciolechero.cl/chile/documentos/documentos-interes/24junio/vision-lactea-n8.pdf> (consultado en Mayo, 2016).

Diario Las Últimas Noticias. Disponible en [http://www.lun.com/lunmobile//Pages/NewsDetailMobile.aspx?dt=2015-08-30&BodyId=0&PaginaID=10&NewsID=323345&Name=I31&PagNum=0&Return=R&SupplementId=0&Anchor=20150830\\_10\\_0\\_I323345](http://www.lun.com/lunmobile//Pages/NewsDetailMobile.aspx?dt=2015-08-30&BodyId=0&PaginaID=10&NewsID=323345&Name=I31&PagNum=0&Return=R&SupplementId=0&Anchor=20150830_10_0_I323345) (consultado en Julio, 2016).

Revista Campo & Tecnología, Edición 1, junio 2016, pág. 43-46.

Empresa Biotecsur. Disponible en <http://biotecsur.cl/2009-biodigestor-agricola-12kva-chacra-punadi/> (consultado en Abril, 2016).

Empresa Biotecsur. Disponible en <http://biotecsur.cl/2011-planta-biogas-27kva-fundo-el-coihue/> (consultado en Abril, 2016).

Portal de Agua Potable Rural Chile. Disponible en <http://www.aprchile.cl/index.php/articulos-de-aprchile/ecoenergias/1596-planta-de-biogas-alianza-creo-biotecsur-> (consultado en Junio, 2016).

Empresa Biotecsur. Disponible en <http://biotecsur.cl/2010-biodigestor-agricola-12kva-el-coigue-video/> (consultado en Abril, 2016).

**Anexo 2a. Encuesta Biodigestores: Aspectos generales y específicos de biodigestores implementados en predios lecheros en Regiones de Los Ríos y Los Lagos.**

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO INDUSTRIAL			
<b>Promoviendo el desarrollo de la energía a biogás en pequeñas y mediana industrias seleccionadas</b>			
<b>"Fortalecimiento del marco regulatorio, capacidades técnicas y cartera de proyectos para el desarrollo de una industria local de biogás en el sector lechero".</b>			
ID predio:	Fecha de visita:	Contrato N°: 3000030580	

**Ficha de Información General**

Identificación del biodigestor/predio lechero	Información específica	
Nombre del predio		
Nombre del propietario y administrador		
Ubicación geográfica (WGS 84 datum UTM y punto KMZ)	Coordenada X	Coordenada Y
Principal motivación del propietario para instalar biodigestor		
Aspectos técnicos	Información específica	
Estatus de la planta de biogás (operación actual)		
Año de construcción		
Empresa encargada del diseño		
Empresa encargada de la construcción		
Empresa a cargo de la operación		
Tipo de reactor (CSTR, UASB, fluidized bed, etc)		
Números de reactores y capacidad (m <sup>3</sup> )		
Sistema de calefacción: temperatura de operación y variaciones estacionales		
Sistema de mezclado/agitación		
Sistema de almacenamiento de biogás		

Manejo predial	Información específica			
Tamaño del predio				
Número de ganado (vacas en ordeña y estabuladas)				
Raza (ej. Holstein, Guernsey, etc)				
Producción de leche/año				
Manejos de purines y aguas sucias	Información específica			
Período de estabulación				
Utilización de purines				
Manejo de aguas lluvia				
Producción de purines (m <sup>3</sup> /predio/día)	Información predial		Muestra colectada y analizada	
Caracterización de purines o afluente	Parámetro	Unidad	Afluente	
			Información predial	Muestra colectada y analizada
	DQO	(mgO <sub>2</sub> /l)		
	Alcalinidad	(mgCaCO <sub>3</sub> /l)		
	pH	-		
	Materia Seca	(%)		
	Sólidos volátiles totales	(% lvs)		
	Nitrógeno total	(kg/t)		
	Nitrógeno amoniacal	(kg N-NH <sub>3</sub> /t)		
	Fósforo	(kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /t)		
	Potasio	(kg K <sub>2</sub> O/t)		
	Calcio	(kg CaO/t)		
	Magnesio	(kg MgO/t)		
Sodio	(kg Na/t)			

<b>Manejo del biodigestor</b>	<b>Información específica</b>	
Tipo de sustrato		
Método de colecta de purines		
Sistema de almacenamiento de sustrato		
Sistema de alimentación		
Volumen de purines agregados (m <sup>3</sup> /día)	<b>Información predial</b>	<b>Muestra colectada y analizada</b>
Frecuencia de llenado (ej. Hora, dos veces por día, una vez por día, etc)		
Recursos humanos utilizados en el biodigestor		
Nivel de entrenamiento y/o capacitación de los recursos humanos que operan biodigestor		
<b>Uso Biogás</b>	<b>Información específica</b>	
Co-generación, calor o electricidad (identificación del equipo utilizado)		
Tratamiento del biogás (lavado, extracción del Sulfuro de Hidrógeno, etc.)		

Manejo del digestato y uso	Información específica			
Sistema de procesamiento/tratamiento del digestato (Ej. Ninguno, gravitacional, tamices, separación de sólidos, etc.)				
Volumen del efluente recirculado (si lo hay)				
Uso de digestato en praderas y/o cultivos				
Equipos utilizados para manejo y aplicación del digestato				
Caracterización físico-química del digestato	Parámetro	Unidad	Información predial	Muestra colectada y analizada
	DQO	(mgO <sub>2</sub> /l)		
	Alcalinidad	(mgCaCO <sub>3</sub> /l)		
	pH	-		
	Materia Seca	(%)		
	Sólidos volátiles totales	(%) bpa)		
	Nitrógeno total	(kg/t)		
	Nitrógeno amoniacal	(kg N-NH <sub>4</sub> /t)		
	Fósforo	(kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /t)		
	Potasio	(kg K <sub>2</sub> O/t)		
	Calcio	(kg CaO/t)		
	Magnesio	(kg MgO/t)		
	Sodio	(kg Na/t)		
Indicadores de biodigestión	Información específica			
Meses de operación del biodigestor				
	Unidad	Información predial	Muestra colectada y analizada	
Valores promedio de generación de biogás	(m <sup>3</sup> /día)			
Porcentaje de metano del biogás	(‰CH <sub>4</sub> )			
Potencial de generación de biogás	(m <sup>3</sup> /día)			
Potencial térmico actual	(kWh/día)			
Potencial eléctrico actual	(kWh/día)			

Aspectos económicos	Información específica
Fuente de financiamiento (nombre de la institución y/o financiamiento privado)	
Costo de la inversión (CLP o USD)	
Costo de operación, mantención y/o reparación	
Descripción del modelo de negocios	
Aspectos ambientales	Información específica
Aprobación de estudio/declaración de impacto ambiental si la hay	
Aspectos generales	Información específica
Impacto de la operación del proyecto en la lechería	
Problemas relacionados con el éxito del biodigestor	
Principales dificultades para la implementación y operación (ej. financieras, autorizaciones, formación/capacitación/ habilidades del recurso humano, etc.)	

**Anexo 2b. Fichas de proyectos de biogás para el sector lechero dentro de la zona de estudio, Región de Los Ríos y Región de Los Lagos.**

**Anexo 2c. Coordenadas UTM biodigestores (versión digital en CD)**

### Anexo 3a. Hoja de datos de la evaluación económica

<b>Nombre predio:</b>			
<b>ID Predio:</b>			
<b>I.</b>	<b>Datos Base</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDAD</b>
1	N° de Vacas en Ordeña		N° vacas
2	Generación Biogás		m <sup>3</sup> /día/predio
<b>II. Ingresos / Ahorros de Energía</b>			
3	Potencial Energético:		kWh/año
4	Potencial Eléctrico:		kWh/año
5	Potencial Térmico:		kWh/año
6	Zona de Tarifario Eléctrico		Saesa
7	Tarifa Eléctrica Aplicable		\$/kWh
8	Tarifa Térmica Aplicable		\$/kWh
<b>9</b>	Valor de la Energía Generada $((4 \times 7) + (5 \times 8))$		\$/año
<b>III. Biofertilizantes</b>			
10	Volumen Generado al Año		m <sup>3</sup> /año
11	Ahorro en Compra de Fertilizantes		\$/año
12	Venta de digestato		\$/año
<b>A:</b>	<b>Ingresos Anuales: (II+III)</b>		\$/año
Costos:			
13	Operación		\$/año
14	Mantenimiento		\$/año
15	Otros costos /Labores		\$/año
<b>B:</b>	<b>Total de Costos: (13+14+15)</b>		
<b>C:</b>	Inversión:		
16	<b>Inversión Inicial Total</b>		\$
17	Subsidio		\$
18	Aporte Propio		\$
Fuente de Datos: Trabajo de Campo Equipo INIA Remehue - Proyecto Biogás UNIDO. 2016			

<b>CONSTANTES:</b>		
N° de Días en Ordeña	365	días /año
Contenido Energético del Biogás		kWh/m <sup>3</sup>
Volumen de efluente		m <sup>3</sup> /día
% de Materia Seca del Efluente		%
Kg de N total cada 1.000 Lts de Efluente		Kg
Kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total cada 1.000 Lts del Efluente		Kg
Kg de K <sub>2</sub> O total cada 1.000 Lts del Efluente		Kg
Precio urea	241.500	\$/t Fertilizante
Precio Superfosfato Triple	288.750	\$/t Fertilizante
Precio Muriato	279.000	\$/t Fertilizante
Precio del N (urea)	525	\$/Kg
Precio del P (Superfosfato Triple)	628	\$/Kg
Precio del K (Muriato)	465	\$/Kg
Sueldo Jornal:	2.000	\$/HH
<b>Datos de Conversión Utilizados:</b>		
Gasto Operación		De la inversión
Gasto Mantención:		De la inversión
Biogás por Vaca x día		m <sup>3</sup> /día
1 Kg gas Licuado	14,06	kWh
Precio Cilindro 45 Kgs de gas (Con Iva)	44.200	\$

### Anexo 3b. Resultados evaluación económica.

**Escenario “solo biogás” para la condición actual de biodigestores en funcionamiento.**

<b>Escenario: Sólo biogás</b>					
<b>ID predio</b>	<b>Inversión</b>	<b>VAN</b>	<b>TIR</b>	<b>B/C</b>	<b>PRI</b>
<b>1-10</b>	35.000.000	-36.541.316	Ind.	0,04	Ind.
<b>3-10</b>	8.000.000	-6.288.467	-15,7%	0,21	Ind.
<b>4-10</b>	26.000.000	-28.490.013	Ind.	0,10	Ind.
<b>5-10</b>	41.500.000	-40.285.977	-35,0%	0,03	Ind.
<b>Promedio</b>	<b>27.625.000</b>	<b>-27.901.443</b>	<b>-25,4%</b>	<b>0,03</b>	Ind.

Ind.: Indeterminado

Fuente: Elaboración propia (2016).

**Escenario “biogás + digestato” para la condición actual de biodigestores en funcionamiento.**

<b>Escenario: biogás + digestato</b>					
<b>ID predio</b>	<b>Inversión</b>	<b>VAN</b>	<b>TIR</b>	<b>B/C</b>	<b>PRI</b>
<b>1-10</b>	35.000.000	-30.598.691	-21,8%	0,13	Ind.
<b>3-10</b>	8.000.000	-5.782.164	-12,4%	0,28	Ind.
<b>4-10</b>	26.000.000	-23.178.068	-23,3%	0,11	Ind.
<b>5-10</b>	41.500.000	-37.066.606	-23,5%	0,11	Ind.
<b>Promedio</b>	<b>27.625.000</b>	<b>-24.156.382</b>	<b>-20,2%</b>	<b>0,15</b>	Ind.

Ind.: Indeterminado

Fuente: Elaboración propia (2016).

**Escenario “solo biogás” para la condición mejorada de biodigestores en funcionamiento.**

<b>Escenario: sólo biogás</b>					
<b>ID predio</b>	<b>Inversión</b>	<b>VAN</b>	<b>TIR</b>	<b>B/C</b>	<b>PRI</b>
<b>1-10</b>	35.000.000	-19.606.377	-5,7%	0,44	Ind.
<b>2-10</b>	71.160.000	-86.780.785	Ind.	-0,22	Ind.
<b>3-10</b>	8.000.000	-5.235.168	-9,3%	0,35	Ind.
<b>4-10</b>	26.000.000	-17.165.531	-9,5%	0,34	Ind.
<b>5-10</b>	41.500.000	-33.054.115	-16,3%	0,20	Ind.
<b>7-10</b>	32.200.000	-22.597.308	-11,4%	0,30	Ind.
<b>8-10</b>	11.630.000	-11.869.770	Ind.	-0,02	Ind.
<b>1-14</b>	8.000.000	-7.710.421	-33,3%	0,04	Ind.
<b>2-14</b>	15.000.000	-11.537.320	-14,7%	0,23	Ind.
<b>3-14</b>	15.000.000	-14.934.314	Ind.	0,00	Ind.
<b>Promedio</b>	26.349.000	-23.049.111	-14,3%	0,17	Ind.

Ind.: Indeterminado.

Fuente: Elaboración propia (2016).

**Escenario “biogás + digestato” para la condición mejorada de biodigestores en funcionamiento.**

<b>Escenario: biogás + digestato</b>					
<b>ID predio</b>	<b>Inversión</b>	<b>VAN</b>	<b>TIR</b>	<b>B/C</b>	<b>PRI (Años)</b>
<b>1-10</b>	35.000.000	4.192.244	12,7%	1,12	6
<b>2-10</b>	71.160.000	-57.284.033	-16,8%	0,19	Ind.
<b>3-10</b>	8.000.000	-2.228.754	3,0%	0,72	9
<b>4-10</b>	26.000.000	-319.316	9,7%	0,99	7
<b>5-10</b>	41.500.000	-22.892.906	-5,4%	0,45	Ind.
<b>7-10</b>	32.200.000	-5.216.293	6,1%	0,84	8
<b>8-10</b>	11.630.000	-9.865.494	-19,7%	0,15	Ind.
<b>1-14</b>	8.000.000	-6.207.213	-15,1%	0,22	Ind.
<b>2-14</b>	15.000.000	-5.921.915	-0,3%	0,61	Ind.
<b>3-14</b>	15.000.000	-12.260.312	-17,6%	0,18	Ind.
<b>Promedio</b>	26.349.000	-11.800.399	-4,3%	0,55	Ind.

Ind.: Indeterminado

Fuente: Elaboración propia (2016).

### **Análisis de conglomerado o clúster**

**Escenario “sólo biogás” en los análisis de conglomerado sobre plantas de digestión anaeróbica.**

<b>Escenario: sólo biogás</b>					
<b>Clúster</b>	<b>Inversión</b>	<b>VAN</b>	<b>TIR</b>	<b>B/C</b>	<b>PRI (Años)</b>
<b>Escenario actual promedio</b>	27.625.000	-27.901.443	-25,4%	0,03	Ind.
<b>Escenario mejorado promedio</b>	26.349.000	-23.049.111	-14,3%	0,17	Ind.
<b>Laguna cubierta promedio</b>	27.450.000	-19.815.828	-11,5%	0,25	Ind.
<b>Laguna cubierta + térmica</b>	21.666.667	-15.359.337	-10,2%	0,23	Ind.
<b>Laguna cubierta + eléctrica</b>	33.233.333	-24.272.318	-12,4%	0,28	Ind.
<b>Flujo pistón promedio</b>	9.210.000	-8.271.786	-21,3%	0,12	Ind.
<b>Flujo pistón + térmica</b>	8.000.000	-6.472.794	-21,3%	0,19	Ind.
<b>Flujo pistón + eléctrica</b>	11.630.000	-11.869.770	Ind.	-0,02	Ind.
<b>Mezcla completa + eléctrica</b>	71.160.000	-86.780.785	Ind.	-0,22	Ind.

Ind.: Indeterminado

Fuente: Elaboración propia (2016).

**Escenario “biogás + digestato” en los análisis de conglomerado sobre plantas de digestión anaeróbica.**

<b>Escenario: biogás + digestato</b>					
<b>Clúster</b>	<b>Inversión</b>	<b>VAN</b>	<b>TIR</b>	<b>B/C</b>	<b>PRI (Años)</b>
<b>Escenario actual promedio</b>	27.625.000	-24.156.382	-20,2%	0,15	Ind.
<b>Escenario mejorado promedio</b>	26.349.000	-11.800.399	-4,3%	0,55	Ind.
<b>Laguna cubierta promedio</b>	27.450.000	-7.069.750	0,9%	0,70	Ind.
<b>Laguna cubierta + térmica</b>	21.666.667	-4.663.328	-1,7%	0,64	Ind.
<b>Laguna cubierta + eléctrica</b>	33.233.333	-9.476.172	3,5%	0,76	Ind.
<b>Flujo pistón promedio</b>	9.210.000	-6.100.487	-10,6%	0,37	Ind.
<b>Flujo pistón + térmica</b>	8.000.000	-4.217.984	-6,0%	0,47	Ind.
<b>Flujo pistón + eléctrica</b>	11.630.000	-9.865.494	-19,7%	0,15	Ind.
<b>Mezcla completa + eléctrica</b>	71.160.000	-57.284.033	-16,8%	0,19	Ind.

Ind.: Indeterminado

Fuente: Elaboración propia (2016).

### Anexo 3c. Resultados en el modelo de negocios

#### Modelo de negocios 1: biogás + digestato para autoconsumo

<b>Aliados / Partners Clave (8)</b>	<b>Actividades Clave (7)</b>	<b>Propuesta de Valor (2)</b>	<b>Relación con el cliente (4)</b>	<b>Segmentos de cliente (1)</b>
<p>Diseño e Instalación de la Planta de Biogás por proveedores externos.</p> <p>Proveedores de equipos para utilizar el biogás.</p> <p>Proveedores de equipos para almacenamiento y aplicación de los digestato.</p>	<p>Elección del tipo de tecnología de la Planta de Biogás.</p> <p>Diseño e Instalación de la Planta de Biogás.</p> <p>Recopilación de purines.</p> <p>Almacenamiento de los digestatos.</p> <p>Aplicación de los digestatos.</p> <p><i>Mantenimiento de la planta.</i></p> <p><i>Operación de la planta.</i></p>	<p>Implementación y operación de una Planta de biogás para el autoconsumo de la energía generada y para la utilización, en el mismo predio, de los digestatos que se generen.</p>	<p>Gestión y comunicación interna.</p>	<p>El cliente es el mismo oferente o plantel lechero.</p>
	<p><b>Recursos Clave (6)</b></p> <p>Vacas en ordeña.</p> <p>Instalaciones de la Planta de Biogás.</p> <p>Equipos para utilización del biogás generado.</p> <p>Equipos para el almacenamiento y aplicación de</p>		<p><b>Canales de Comunicación y Distribución (3)</b></p> <p>Internos.</p>	

	digestato.  Recursos Financieros Propios.			
<b>Estructura de Costos (9)</b>  Operación (HH / Mes) Mantenión (HH /Mes) Materiales de reparación o reemplazo. Uso de Equipos de Aplicación de digestatos.		<b>Flujos de ingreso (5)</b>  Ahorros de energía por reemplazo de fuente (eléctrica o térmica).  Ahorros en la compra de fertilizantes comerciales.		

**Modelo de negocios 2: biogás + digestato para autoconsumo y venta de excedentes.**

<b>Aliados / Partners Clave (8)</b>	<b>Actividades Clave (7)</b>	<b>Propuesta de Valor (2)</b>	<b>Relación con el cliente (4)</b>	<b>Segmentos de cliente (1)</b>
Diseño e Instalación de la Planta de Biogás por proveedores externos.  Proveedores de equipos para utilizar el biogás.  Proveedores de equipos para almacenamiento y aplicación de los digestatos.  Proveedores de transporte de digestatos.  Empresa	Elección del tipo de tecnología de la Planta de Biogás.  Diseño e Instalación de la Planta de Biogás.  Conexión a la red de distribución eléctrica.  Recopilación de purines.  Almacenamiento de los digestatos.  Aplicación y/o despacho de los digestatos.  <i>Mantenión de la planta.</i>	Implementación y operación de una Planta de biogás para el autoconsumo y venta de los excedentes de la energía generada y para la utilización, en el mismo predio y/o la venta de excedentes de los digestatos que se generen.	Gestión y comunicación interna.  Solicitudes formales según la nueva Ley eléctrica.	El cliente 1: es el mismo oferente o plantel lechero.  El cliente 2: es la empresa distribuidora de energía eléctrica.  El cliente 3: es un agricultor que requiera digestato y no posea sus propias capacidades para generarlos.

Proveedora de Energía (distribuidora).	<i>Operación de la planta.</i>			
	<b>Recursos Clave (6)</b>  Vacas en ordeña.  Instalaciones de la Planta de Biogás.  Equipos para utilización del biogás generado.  Equipos para el almacenamiento y aplicación de digestatos.  Recursos Financieros Propios.		<b>Canales de Comunicación y Distribución (3)</b>  Interno.  Visita a Oficinas de empresa distribuidora y comunicaciones formales con ella.  Comunicación con otros agricultores (asociaciones gremiales, eventos).	
<b>Estructura de Costos (9)</b> Operación (HH / Mes) Mantenimiento (HH /Mes) Materiales de reparación o reemplazo. Uso de Equipos de Aplicación de digestatos. Almacenamiento y Transporte. Gestión de la Conexión al Sistema Eléctrico para distribuir energía.		<b>Flujos de ingreso (5)</b> Ahorros de energía por reemplazo de fuente (eléctrica o térmica). Venta de excedentes de energía a distribuidores (nueva ley). Ahorros en la compra de fertilizantes comerciales. Venta de excedentes a agricultores.		

Anexo 4. Formulario de inscripción de biodigestores ante la SEC (fuente: [http://www.sec.cl/portal/page?\\_pageid=33,6527711&\\_dad=portal&\\_schema=PORTAL](http://www.sec.cl/portal/page?_pageid=33,6527711&_dad=portal&_schema=PORTAL))



**DECLARIÓN DE PLANTAS DE BIOGÁS**

**TCB1**

**I. Tipo de Presentación**

NUEVA	<input type="checkbox"/>	MODIFICACIÓN	<input type="checkbox"/>	REGULARIZACIÓN	<input type="checkbox"/>	N° Inscripción SEC:	<input type="text"/>
-------	--------------------------	--------------	--------------------------	----------------	--------------------------	---------------------	----------------------

**II. Antecedentes del Propietario de la Instalación**

<input type="text"/>		
<b>RUT Propietario</b>		
<input type="text"/>		
<b>Teléfono Fijo</b>	<b>Nombre Completo Propietario o Razón Social del Propietario</b>	
<input type="text"/>	<input type="text"/>	
<b>Teléfono Celular</b>	<b>Dirección Postal del Propietario</b>	<b>Comuna</b>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

**III. Antecedentes del Representante Legal de Propietario**

<input type="text"/>		
<b>RUT Representante Legal</b>		
<input type="text"/>		
<b>Teléfono Fijo</b>	<b>Nombre Representante Legal</b>	
<input type="text"/>	<input type="text"/>	
<b>Teléfono Celular</b>	<b>Dirección Postal del Representante Legal</b>	<b>Comuna</b>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

**IV. Antecedentes del Instalador de Biogás**

<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<b>RUT</b>	<b>RNII SEC</b>	<b>Teléfono Fijo</b>	<b>Teléfono Celular</b>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<b>Nombre Completo Instalador (Apellido Paterno, Apellido Materno, Nombres)</b>			
<input type="text"/>			
<b>Dirección Postal</b>		<b>Región</b>	<b>Comuna</b>
<input type="text"/>		<input type="text"/>	<input type="text"/>



## IX. Antecedentes Generales de la Instalación

ITEM	DETALLE	Identifique (Marcar con X)
Tamaño de la Instalación (Potencia Nominal)	Pequeña < 60Kw	
	60 <Medianas <300 kW	
	Grandes > 300 kW	
Uso del Biogás Generado	Uso domiciliario (Cocina, Calefón, etc.)	
	Generación Eléctrica autoconsumo	
	Generación Térmica autoconsumo	
	Generación Eléctrica inyección a red eléctrica (SIC o terceros)	
	Producción Biometano	
	Destrucción Térmica de Biogás (Quema)	
	Cogeneración	
Otro		

## X. Variables de producción de Biogás:

Variables de Producción <sup>1</sup>	Valor	Unidad
Alimentación de Sustrato al Digestor		m <sup>3</sup> /día
Temperatura del Sustrato en el Digestor		°C
Tiempo de retención hidráulica		días
Producción de Biogás		m <sup>3</sup> /día
Producción de Biogás para uso generación eléctrica		m <sup>3</sup> /día
Producción de Biogás para uso generación de calor		m <sup>3</sup> /día
Caudal de operación de antorcha		m <sup>3</sup> biogás/hr

## XI. Variables de Generación de Biogás

Datos de Generación		Valor	Unidad
Potencia Nominal de Biogás			kW
Potencia instalada eléctrica			kW
Potencia Instalada Térmica			kW
Horas de uso del Biogás por día			h/día
Calidad del Biogás		Valor	Unidad
Metano			% V/V
Dióxido de Carbono			% V/V
Acido Sulfhídrico			ppm
Agua			mg/m <sup>3</sup>
Poder Calorífico Superior			Kcal/m <sup>3</sup> S
Origen de los Datos de Calidad del Gas			
	Marcar (x)	Detalle	
Referencia Bibliográfica:			
Caracterización por Laboratorio de Ensayo (Indicar Cual)			
Caracterización por medición de Biogás efectuada in situ (Indicar equipos utilizados):			

## XII. Firmas de responsabilidad

<p><u>Solo para Instalaciones Nuevas</u>          El profesional que suscribe en calidad <b>Instalador de Gas</b> declara que:          La instalación que se inscribe, se ha ejecutado conforme a las disposiciones establecidas en el diseño del proyecto y en las disposiciones legales, reglamentarias y técnicas sobre la materia y que la documentación que se adjunta es concordante con el diseño y construcción de la misma.          Los antecedentes del diseño de la instalación deberán estar a disposición de la Superintendencia, cuando esta lo requiera.</p>		<p>_____</p> <p>Firma          Nombre:          R.U.T.:</p>
<p><b>El propietario</b> de la instalación que se inscribe, a través de su representante legal, cuando corresponda, declara que ha velado que el diseño, construcción y modificación de ésta, se ajusta a las disposiciones legales, reglamentarias y técnicas sobre la materia, y que ha encomendado dichas actividades a profesionales que cuentan con los conocimientos y competencias para ello.</p>		<p>_____</p> <p>Firma          Nombre:          R.U.T.:</p>
<b>USO EXCLUSIVO DE LA SEC</b>		
<b>N° DE INSCRIPCIÓN :</b>		
<b>FECHA:</b>		<p>_____</p> <p>FIRMA Y TIMBRE</p>

**Nota:** Esta inscripción no constituye aprobación por parte de SEC.  
 La modificación de las condiciones originales de la instalación deja sin efecto el presente documento.