



## EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE REPLICABILIDAD DE LA TECNOLOGÍA DE BIOGÁS EN ESTABLECIMIENTOS LECHEROS

---

Diciembre2020

Victor Emmer, Ing. Quím. MSc.

Ester Zaha, Ec. MSc.

## 1 Introducción

Desde hace ya un tiempo se reconocen los problemas ambientales asociados a los establecimientos lecheros y la dificultad de implementar medidas que se adapten a la realidad del sector. En la búsqueda de alternativas que promuevan la economía circular en los procesos de producción, la valorización y el aprovechamiento de los residuos aparece como una alternativa atractiva de mejora y optimización de los procesos.

En línea con el aprovechamiento de los residuos, la alternativa que surge con mayor fuerza y consenso consiste en la aplicación al campo del efluente y residuos sólidos de forma de lograr la recirculación de los nutrientes y la sustitución en el uso de fertilizantes químicos. Esta alternativa es relativamente sencilla y puede ser implementada con una inversión relativamente baja, utilizando infraestructura que los establecimientos generalmente disponen. Sin embargo, para establecimientos de mayor escala pueden presentarse algunas complicaciones debido a la mayor superficie necesaria para aplicación del efluente a una tasa adecuada y los volúmenes muy importantes de acopio del efluente.

En este sentido, surge la posibilidad de incluir la producción de biogás a partir del estiércol como alternativa de valorización, con la intención de agregar mayor valor agregado a los residuos generados. Los escenarios en que este modelo de gestión de los residuos puede implementarse pueden ser diversos, incluyendo el escenario en que esta tecnología surge como alternativa y sustituye la aplicación de los efluentes a campo, o el escenario en que la planta de biogás se agrega al sistema como una unidad adicional, en la que se debería lograr una sostenibilidad económica por sí misma.

Basado en la experiencia adquirida en el desarrollo del proyecto demostrativo de Rincón de Albano, se plantea en el presente informe la evaluación técnica y económica del potencial de replicabilidad de esta tecnología en el sector lechero. Para ello se modelan distintos escenarios en los que esta tecnología podría ser implementada, evaluando la factibilidad técnica y económica en cada caso.

## 2 Justificación

Se considera necesario profundizar en el estudio del potencial de implementación de proyectos de biogás en tambos y el potencial de replicabilidad de esta tecnología en el sector.

La tecnología de biogás implica la adopción de un sistema con mayor nivel de sofisticación, comparado con otras posibles alternativas a la gestión de los residuos. Sin embargo, esta ofrece un retorno económico más directo y tangible, que puede resultar atractivo para establecimientos de mayor escala y posibilidad de inversión, así como capacidad de operación y mantenimiento del sistema implementado. También genera otros beneficios que deberían ser considerados, como la reducción de olores molestos y presencia de insectos, y la reducción de la carga orgánica del efluente, obteniendo una mejor calidad del mismo que podría hacer pensar en un sistema de recirculación para el lavado de las instalaciones, mejorando así la circularidad de la producción.

Partiendo de la base de la necesidad de adopción de un sistema de adecuado de gestión de los residuos que asegure el control de las emisiones y la calidad ambiental, la tecnología de biogás podría tener su oportunidad entre las distintas alternativas de gestión. O bien insertándose en el sistema de gestión de forma integral, que implique un negocio en si mismo además de una mejora sustancial en la calidad ambiental alcanzada.

Además, es necesario estudiar la sensibilidad de los parámetros que afectan la viabilidad de los proyectos, en la búsqueda de maximizar los rendimientos y beneficios obtenidos, así como de la adecuación tecnológica de acuerdo a las posibilidades del sector.

Si bien existen alternativas tecnológicas para establecimientos de pequeña escala, se considera que no han alcanzado la robustez necesaria para lograr un sistema confiable y sostenible. En este sentido, es necesario estimar la escala mínima para que este tipo de proyectos sean atractivos y, en base a ello, analizar el potencial real de replicabilidad.

### **3 Objetivo**

Evaluar factibilidad técnica y económica de la implementación de la tecnología de digestión anaerobia y aprovechamiento de biogás en tambos, como sistemas de gestión de residuos y aprovechamiento energético.

Estudiar distintos escenarios seleccionados en base al tamaño (escala de producción), al uso final del biogás, al nivel de sofisticación del sistema implementado, y al modelo en que la planta de biogás se implanta en el sistema, como alternativa en la gestión de efluentes o negocio independiente.

### **4 Metodología**

El estudio consiste en la evaluación técnica y económica de la implementación de proyectos de biogás en establecimientos lecheros. Para ello son modelados distintos escenarios como casos de estudio, variando la escala de producción, el nivel de sofisticación de los sistemas y el tipo de aprovechamiento que se realice del biogás. Para cada escenario se determina la cantidad de biogás y energía generada, así como la energía que requiere el propio sistema para su funcionamiento.

A partir de los ingresos definidos por el desempeño del sistema y la inversión requerida para su instalación, se evalúan los indicadores de rentabilidad en base al modelo implementado, es decir, como alternativa a la gestión de los efluentes, o como una unidad complementaria integrado a un sistema existente.

## 5 Alcance

### 5.1 Construcción de escenarios

#### 5.1.1 Escala de producción / Tamaño de los establecimientos

La escala de producción queda definida por el número de vacas en ordeño del establecimiento. Este parámetro determina la generación potencial de biogás y la inversión necesaria.

En la siguiente tabla se muestran las características productivas de los establecimientos según tamaño, así como la cantidad de establecimientos existentes y la cantidad de animales asociados a cada rango.

Tabla 1. Características de establecimientos existentes según tamaño.  
Fuente Encuesta Lechera 2014 de INALE

Estratos	Cantidad de remitentes	Vacas Ordeño 1° de Julio 2014	Producción (L/año) 2013/2014	N° órganos por explotación
250 VO o menos	2.437	75	465.967	6
251 - 500	158	358	2.518.629	20
501 - 750	46	627	4.397.057	32
751 - 1000	5	820	6.245.323	38
Más de 1000	8	1.486	9.677.965	55

Para el estudio, no son tenidos en cuenta los tambos pequeños con menos de 250 vacas en ordeño. Se asume que estos establecimientos no cuentan con capacidad necesaria para que la instalación de un sistema de biodigestión sea lo suficientemente robusto para que la operación sea estable, continua y confiable, y para que el aprovechamiento del biogás sea atractivo.

De esta manera, se definen escenarios para establecimientos de 250, 500, 750 y 1.000 vacas en ordeño, en base a las características típicas de cada estrato.

#### 5.1.2 Nivel de sofisticación del sistema

Dado que el monto de inversión es determinante en la viabilidad económica del modelo implementado, a través del nivel de sofisticación se pretende simular sistemas que, si bien pueden presentar un menor desempeño en la generación de biogás y energía, requieren menor inversión.

En base a la experiencia y lecciones aprendidas del proyecto desarrollado en Rincón de Albano, el cual podría ser considerado un sistema con alto nivel de sofisticación, se identifican aquellos componentes del sistema a través de los cuales es posible reducir el monto de inversión. De esta manera, se definen dos tipos de escenarios respecto a su nivel de sofisticación: alto y bajo.

Entre los posibles componentes que podrían diferenciarse entre estos escenarios se pueden mencionar el automatismo del sistema, la agitación del biodigestor por bombeo, la terminación de la obra civil y la instalación eléctrica, y el tipo de equipos instalados (motogenerador, separador de sólidos, etc.).

Por otro lado, debido a que los sistemas de alto nivel de sofisticación permiten un mayor control automático de las operaciones, es posible considerar que los sistemas de bajo nivel de sofisticación requieren mayor mano de obra asociado.

### **5.1.3 Tipo de aprovechamiento del biogás**

El destino del biogás depende de las opciones con las que cuente el establecimiento para el aprovechamiento energético. Como la mayoría de los establecimientos no presenta un uso de energía térmica en sus operaciones, o al menos no en cantidades significativas, el destino más común para el biogás es la generación de energía eléctrica. En estos escenarios, se asume que la generación de energía eléctrica se realiza exclusivamente en horario de punta, donde el consumo es menor y la energía es mayoritariamente inyectada a la red, lo que ocasiona un ingreso económico debido a la diferencia de precio entre la energía inyectada y la energía consumida.

Sin embargo, para aquellos establecimientos que cuenten con un uso asociado de calor, ya sea en el procesamiento de la leche para la elaboración de productos derivados, o para cualquier otra aplicación, la generación de energía térmica a partir de biogás puede resultar en una alternativa atractiva. Estos sistemas requieren de menor inversión y el ingreso económico es consecuencia del ahorro en la sustitución del combustible normalmente utilizado.

### **5.1.4 Modelo del sistema implementado**

La implementación de un proyecto de biogás puede responder a dos modelos distintos. Por un lado, la planta de biogás a partir de residuos y su aprovechamiento energético, ya sea eléctrico o térmico, puede integrarse a un sistema existente de gestión de los efluentes y, en principio, con una operación adecuada y suficiente. Por lo tanto, el sistema instalado representa una unidad adicional que, si bien mejora la calidad del efluente final y presenta otros diversos beneficios, debería ser un modelo de negocio rentable en sí mismo para asegurar la sostenibilidad del proyecto.

Por otro lado, en el caso que el establecimiento no cuente con un sistema de gestión de efluentes o no se encuentre en condiciones operativas aceptables, se podría pensar en la instalación de una planta de biogás y su aprovechamiento como alternativa a los sistemas habituales de gestión. De esta manera, a través del análisis comparativo puede considerarse los costos asociados a la alternativa como un “costo hundido” y descontarlo en el flujo de caja del sistema de generación de energía.

La alternativa más comúnmente implementada para la gestión de los efluentes en establecimientos lecheros, es la separación de sólidos, el acopio en laguna y su aplicación a campo. Este tipo de sistemas es muy común principalmente a pequeña escala, mientras que para establecimientos de gran escala, debido a la mayor superficie necesaria para la aplicación del efluente y la creciente necesidad de mano de obra, esta alternativa puede implicar una complejidad mayor.

Cabe aclarar que, debido a la mejor calidad del efluente final en el tratamiento anaerobio de los efluentes, debido a la significativamente menor carga orgánica alcanzada, se asume que el efluente es recirculado para el lavado de las instalaciones del establecimiento, permaneciendo en un circuito semi-cerrado. De esta forma, el abastecimiento de agua (pozo, bombas) debería incluirse dentro de los costos asociados al sistema alternativo.

### 5.1.5 Resumen de escenarios

De acuerdo a los parámetros anteriormente descriptos, se definen los escenarios a ser evaluados, según la tabla a continuación.

Tabla 2. Resumen de escenarios considerados.			
Escenario	Escala de producción (VO)	Nivel de sofisticación del sistema de biodigestión	Tipo de aprovechamiento del biogás
250-B-E	250	Bajo	Eléctrico
250-B-T	250	Bajo	Térmico
500-B-E	500	Bajo	Eléctrico
500-B-T	500	Bajo	Térmico
500-A-E	500	Alto	Eléctrico
500-A-T	500	Alto	Térmico
750-B-E	750	Bajo	Eléctrico
750-B-T	750	Bajo	Térmico
750-A-E	750	Alto	Eléctrico
750-A-T	750	Alto	Térmico
1000-A-E	1.000	Alto	Eléctrico
1000-A-T	1.000	Alto	Térmico

Además, como fue explicado, cada escenario es evaluado desde dos puntos de vista distintos, que difieren en las consideraciones del análisis económico:

- Modelo 1: como unidad adicional integrado a un sistema de gestión de efluentes existente.
- Modelo 2: como alternativa para la gestión de efluentes.

### 5.2 Descripción del sistema

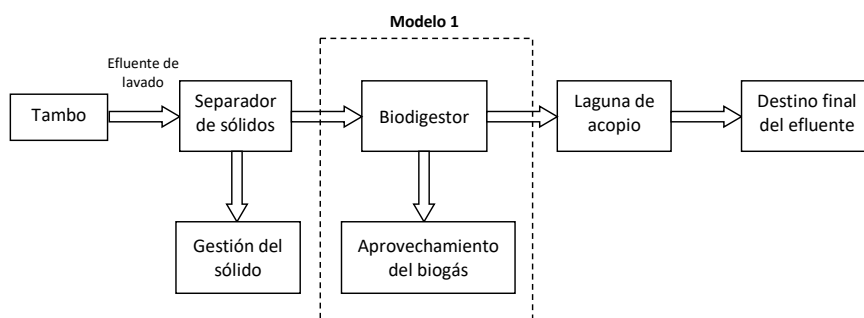
A continuación se describen los sistemas considerados según el modelo de implementación, ya sea para la tecnología de biodigestión y aprovechamiento energético del biogás, como para la alternativa de aplicación del efluente a campo.

#### 5.2.1 Modelo 1

El Modelo 1 considera que el establecimiento ya cuenta con un sistema de gestión adecuado y en correcto funcionamiento. Para esto se asume que en el sistema existente, el efluente del lavado de las instalaciones es recolectado y conducido a través de un separador de sólidos hacia una laguna de acopio, desde donde es tomado para su aplicación a campo o para su recirculación como agua de lavado. Cabe aclarar, que para la evaluación de este modelo es indistinto el destino final del efluente.

El biodigestor y el sistema de aprovechamiento del biogás para generación de energía, ya sea eléctrica como térmica, se incorpora en el sistema existente como una unidad adicional entre el separador de sólidos y la laguna de acopio, hacia donde es descargado el efluente que sale del biodigestor.

Figura 1. Diagrama de flujos del Modelo 1.



Para todos los escenarios, la tecnología de biodigestión considerada corresponde a sistemas de tipo laguna cubierta, con agitación por recirculación por bombeo, calefacción interna, soplador para la extracción del biogás y todos los componentes básicos de seguridad (antorcha, válvulas de seguridad, cerca perimetral, etc.). Se considera también el equipo de purificación (desulfurización - deshumidificación) y un balón de acumulación del biogás tratado previo al sistema de aprovechamiento.

Los escenarios de aprovechamiento para generación eléctrica, asumen la incorporación de un motor de combustión interna y un alternador para generación de energía (motogenerador). Se incluye el tablero de control, los elementos de medición y protección, y la conexión a la red. Por su parte, se considera que los escenarios de aprovechamiento térmico instalan algún tipo de calentador de agua a biogás, dependiendo de la escala de producción.

La diferencia entre los escenarios de bajo y alto nivel de sofisticación está en, por un lado en la calidad y robustez de los equipos instalados; por ejemplo, el motogenerador, los materiales de construcción de las casetas, serpentín de calentamiento, etc. Por otro lado, es posible pensar en la posibilidad de omitir algún elemento del sistema para los escenarios de nivel bajo, como puede ser el automatismo o duplicación de algunos equipos. La adopción de un sistema de bajo o alto nivel de sofisticación, afecta directamente en los costos de inversión de cada sistema, pero también el rendimiento de generación de energía y los costos de operación y mantenimiento, ya que se considera que los sistemas de alto nivel de sofisticación requieren menor cantidad de mano de obra. Por otro lado, se asume que en escenarios de baja sofisticación es necesario el incluir el 25% de un sueldo de una mano de obra especializada para operar el sistema.

A partir de la cantidad de estiércol generado, que depende básicamente del tamaño del establecimiento y de las características productivas, se determina la cantidad de energía generada y los ahorros asociados. Cabe aclarar, que no se considera el ahorro por el aprovechamiento de nutrientes, tanto del sólido como del efluente, al ser esta una práctica que ya era realizada previamente y no atribuible a la instalación del biodigestor.

En los escenarios del Modelo 1, a partir de 500 vacas en ordeño, se asume que todo el proyecto de inversión se presenta a la COMAP<sup>1</sup>, a través de lo cual es posible acceder a un determinado porcentaje de exoneración del impuesto a la renta de actividades económicas (IRAE), y a la exoneración de impuestos aduaneros y del impuesto al valor agregado (IVA) de la inversión realizada.

A efectos de simplificar, se considera la exoneración de IRAE para estimar un retorno de la inversión, pero no se tiene en cuenta la exoneración de impuestos de la aduana, ni de IVA. Los costos de inversión se detallan ya sin impuestos de la aduana<sup>2</sup> y sin IVA para todos los escenarios en los dos modelos. El IVA (y el anticipo del IVA) es posible exonerarlo a través del mecanismo del decreto 58/98 a partir del decreto modificatorio 11/020.

En los escenarios de 250 vacas en ordeño se estima que los tambos son contribuyentes del impuesto a la enajenación de bienes agropecuarios (IMEBA) y que no tributan IRAE, por lo que no pueden hacer uso del beneficio de la COMAP. Según la normativa fiscal, a partir de 2 millones de UI de facturación en el año anterior, los establecimientos lecheros deben tributar IRAE (ficto) de facturación anual. No obstante, no se descarta que existan tambos de 250 vacas en ordeño que tributen IRAE, pero no se consideran en los escenarios simulados.

En el 2015, 753 tambos uruguayos (equivalente al 26% de todos los tambos) eran contribuyentes de IRAE y el restante tributaba IMEBA. En una segmentación elaborada por INALE estiman que los tambos remitentes que contribuyen IRAE constituyen el 77% de la producción total y ocupan el 65% de la superficie total destinada a lechería<sup>3</sup>.

Para poder obtener el beneficio de la COMAP, es imprescindible (i) que el tambo ya cumpla con la normativa ambiental y la inversión en el biodigestor sea incremental y (ii) que la tecnología en la que se quiera invertir no sea la habitual o inherente a la naturaleza de la actividad. Estas condiciones están dadas en el Modelo 1, ya que el proyecto se incorpora en un sistema existente suficiente para una adecuada gestión de los efluentes. Además, las inversiones en “equipamiento y componentes para digestión anaerobia de subproductos orgánicos” se encuentran en el listado taxativo de inversiones computables de tecnologías limpias de la COMAP, por lo tanto la postulación es más ágil.<sup>4</sup>

---

<sup>1</sup>En Uruguay existe un régimen de promoción de inversiones para impulsar el desarrollo productivo, compuesto por una Comisión de Aplicación de la Ley de Inversiones (COMAP) que funciona en la órbita del Ministerio de Economía y Finanzas, que otorga beneficios fiscales, entre otros, para proyectos que utilicen tecnologías limpias. Más información aquí: <https://www.mef.gub.uy/13240/7/areas/un-regimen-de-inversiones-para-promover-el-desarrollo-productivo.html>

<sup>2</sup>En una evaluación más ajustada, en los escenarios sin COMAP, se debería asumir que la maquinaria importada (sin considerar la inversión de ponerla en marcha) podría ser un 23% más costosa, ya que son gravados por un 10% de impuestos por concepto de recargo, 8% de impuesto único a la importación (IMADUNI) y 5% de tasa consular, que son valores de referencia para biodigestores importados (NCM 3925.10) desde el Mercosur.

<sup>3</sup>Datos elaborados por INALE en base a la declaración jurada de DICOSE 2019 y DGI (año fiscal de julio 2014 a junio 2015).

<sup>4</sup>Anexo 1 Tecnologías Limpias Decreto 268/020



### 5.2.2 Modelo 2

El Modelo 2 considera que, en la búsqueda de la adecuación del sistema de gestión de los efluentes, la alternativa más comúnmente utilizada, en este caso la separación de sólidos, el acopio en laguna del efluente y su aplicación a campo para el aprovechamiento de los nutrientes (Alternativa 1); es sustituida por la alternativa de biodigestión y aprovechamiento del biogás (Alternativa 2).

De esta manera, bajo el supuesto de que el establecimiento debe realizar una inversión en el sistema de gestión de efluentes para cumplir con la normativa y al ser la Alternativa 1 la de menor inversión y más usual a nivel nacional, es posible considerar esa inversión como un costo hundido en el análisis comparativo.

Considerando los costos asociados a la Alternativa 1 como costos hundidos, es decir, los costos mínimos en que un establecimiento debería incurrir; en la evaluación económica de la Alternativa 2, se consideran solamente los costos incrementales de la inversión, y de operación y mantenimiento. De igual manera, es necesario descontar de los ingresos por la energía generada, los ingresos por sustitución de fertilizantes que se obtendrían por la aplicación a campo de los efluentes.

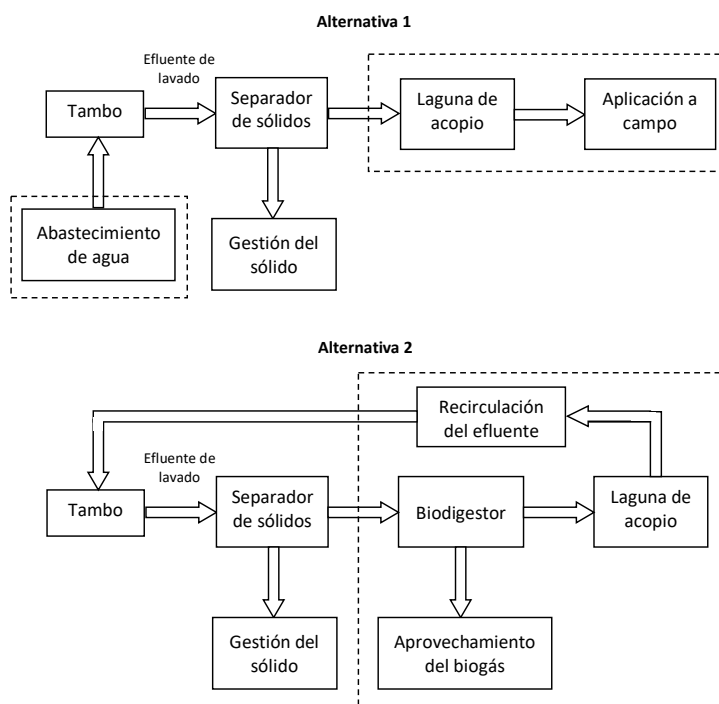
Debido a que el proceso de biodigestión, genera un efluente de mejor calidad al reducirse considerablemente el contenido de materia orgánica, se asume que a través de la Alternativa 2 es posible adoptar la recirculación del efluente para ser utilizada en el lavado de las instalaciones; por lo que para la Alternativa 1 es necesario incluir la inversión asociada al abastecimiento de agua para el lavado de las instalaciones.

Por otro lado, al ser común a ambas alternativas el sistema de separación de sólidos y su aplicación a campo, es posible excluir estos procesos del análisis.

En cuanto a la tecnología de biodigestión y aprovechamiento de biogás de la Alternativa 2, se asume que es la misma a la ya descrita para el Modelo 1. Además, se contempla la construcción de una laguna de acopio para el digestado, de piso compactado, sin impermeabilización y sin cubierta superior, así como el equipo de bombeo para la recirculación del efluente para el llenado de los tanques de lavado.

La Alternativa 1, de aplicación del efluente a campo, también supone el acopio en laguna abierta, aunque de un volumen considerablemente mayor, ya que debería ser capaz de acumular el efluente para aquellos momentos en que no es posible la aplicación a campo por las condiciones agrometeorológicas. El equipo utilizado para la aplicación a campo del efluente, depende de la escala de producción, pudiendo ser del tipo cañón fijo o móvil, o de pivot para establecimientos que requieren mayor superficie de aplicación. No se considera la aplicación por camión estercolero, ya que esta solución es prácticamente exclusiva para establecimientos pequeños. El abastecimiento de agua para el lavado de las instalaciones, incluye el pozo y la bomba.

Figura 2. Diagrama de flujos del Modelo 2.



En los escenarios del Modelo 2, a partir de 500 vacas en ordeño, se asume que solamente el equipo de generación de energía eléctrica o térmica se presenta como un proyecto de inversión a la COMAP, dado que representan los únicos componentes del sistema que no corresponden a una inversión necesaria para cumplir con la normativa. De acuerdo a lo ya explicado, esta fracción de la inversión exonera IRAE para la empresa y los impuestos de importación e IVA del equipamiento adquirido.

Cabe destacar que, llegado el caso, se podría presentar a la COMAP la membrana superior del biodigestor también, ya que tampoco es necesaria para cumplir con la normativa. Para un escenario conservador, en este modelo no fue considerado.

## 6 Resultados

En la sección a continuación se detallan los resultados obtenidos en el modelado de los sistemas considerados. En primer lugar se establece la cantidad de estiércol recolectable generado, la cual define la producción de energía. A su vez, se estiman los costos de inversión y de operación y

mantenimiento para cada escenario, a partir de lo cual se evalúa la viabilidad económica de su implementación.

### 6.1 Generación de energía en los sistemas de biodigestión

La generación de biogás, y consecuentemente de energía, depende directamente de la cantidad de estiércol recolectable que produce el establecimiento, aunque también se ve afectada por el nivel de sofisticación del sistema implementado, a través de la eficiencia de metanización que se alcanza. Cabe aclarar que la energía generada en cada escenario es la misma para ambos modelos estudiados.

El estiércol recolectable corresponde al que los animales excretan durante el tiempo que permanecen en las instalaciones (corral de espera, sala de ordeño y patio de alimentación) y que junto al agua de lavado se convierte en el efluente a gestionar. Su determinación se basa en la estimación de la tasa de generación total de estiércol y el tiempo medio de ordeño.

La tasa de generación total de estiércol por vaca en ordeño se estima a partir de la Ingesta de Materia Seca (IMS), la producción media de leche y la digestibilidad de la dieta, de acuerdo a las fórmulas desarrolladas en el estudio de INIA\_FPTA n° 138 (Gutiérrez-Cabrera, 2006). Para esto se adoptan valores promedio del sector, debido a que no se cuenta con datos promedio específicos según tamaño de los establecimientos.

**Tabla 3. Parámetros utilizados en la determinación de la tasa de generación total de estiércol y el tiempo medio de ordeño.**

Peso medio de vacas en ordeño:	550 Kg
Producción media de leche:	18 L/VO-día
Digestibilidad media de la dieta:	70 %
<b>Tasa de generación diaria de excretas totales:</b>	<b>5,5 kg_ST/VO-día</b>
Tiempo muerto en la preparación de la sala de ordeño:	30 min
Tiempo de ordeño por vaca:	6 min
Tiempo de estadía en el patio de alimentación:	90 min

El tiempo medio permite realizar un promedio ponderado según la cantidad de animales presentes en las instalaciones, teniendo en cuenta que los animales salen de la zona de ordeño en grupos definidos por el número de órganos de la sala. Para ello se utilizan datos promedio respecto a las características productivas específicas para cada segmento de la escala de producción (Datos Encuesta Lechera INALE 2014).

En cuanto a las características del efluente generado, se asume un contenido de Sólidos Volátiles del 67 % respecto a los Sólidos Totales. Al considerarse la existencia de un separador de sólidos, es necesario descontar esta separación del material que efectivamente ingresa al biodigestor. Para ello se adopta una eficiencia de separación de sólidos respecto a los Sólidos Volátiles del 20 % para todos los escenarios, a excepción de los establecimientos de 250 vacas en ordeño (250-B-E y 250-B-T) para los cuales se considera un 5 %.

Respecto a la generación de biogás, se toma un valor de potencial máximo de metanización de 300  $L_{CH_4}/kg_{SV}$ , definiéndose para cada escenario un nivel de aprovechamiento de este potencial máximo

de acuerdo a las características del sistema modelado (agitación, calefacción, tiempo de retención hidráulico, etc.). Tomando como base el proyecto demostrativo Rincón de Albano, que alcanza una producción estimada de 253  $L_{CH_4}/kg_{SV}$ , se asume que los sistemas de alto nivel de sofisticación alcanzan un 84 % del potencial máximo de metanización. Partiendo de este valor y la experiencia adquirida, se adopta un aprovechamiento de 60 % para los escenarios de bajo nivel de sofisticación y 50 % para los establecimientos pequeños.

A partir de estos valores se determina la generación de metano alcanzada para cada escenario.

**Tabla 4. Biogás generado en los escenarios modelados.**

Escenario	N° órganos	Tiempo medio de ordeño (hs)	Generación de estiércol recolectable ( $kg_{ST}/día$ )   ( $kg_{SV}/día$ )		Ingreso SV al biodigestor ( $kg_{SV}/día$ )	Aprovechamiento del potencial máximo de metanización (%)	Generación de metano ( $m^3_{CH_4}/día$ )
250-B-E	20	3,9	267	179	170	50	26
250-B-T	20	3,9	267	179	170	50	26
500-B-E	32	4,1	572	383	306	60	55
500-B-T	32	4,1	572	383	306	60	55
500-A-E	32	4,1	572	383	306	84	77
500-A-T	32	4,1	572	383	306	84	77
750-B-E	38	4,6	947	634	507	60	91
750-B-T	38	4,6	947	634	507	60	91
750-A-E	38	4,6	947	634	507	84	128
750-A-T	38	4,6	947	634	507	84	128
1000-A-E	55	4,4	1.219	817	653	84	165
1000-A-T	55	4,4	1.219	817	653	84	165

A partir de la cantidad de biogás producida, se estima la energía generada en base a un valor de eficiencia energética respecto al Poder Calorífico Inferior. Para los escenarios de generación de energía eléctrica, se asume un valor de eficiencia de 30 %, acorde a los valores medidos en Rincón de Albano. Por su parte, para los escenarios de generación térmica se toma entre 80 y 90 %, de acuerdo a las características del equipo instalado según el nivel de sofisticación.

Por otro lado, es necesario tener en cuenta el consumo de energía eléctrica necesario para el funcionamiento del propio sistema y, para determinar el costo asociado, el horario en que se produce este consumo. En base a los resultados del proyecto de Rincón de Albano, se asume que el sistema de biodigestión y aprovechamiento del biogás en los escenarios de alta sofisticación requieren 25 % de la energía producida, mientras que para los escenarios de baja sofisticación requiere 20 % y los escenarios de pequeña escala el 15 %. Se considera que los escenarios de generación térmica, el consumo es el mismo que para el escenario equivalente de generación eléctrica. Además, se supone que el 30 % de la energía necesaria es en horario de punta y el 70 % en horario llano. Para todos los casos se asumen 330 días al año de operación de los equipos de generación de energía.

**Tabla 5. Energía generada, energía eléctrica consumida por el sistema e ingresos por sustitución de energético en los escenarios modelados**

Escenario	Eficiencia de generación de energía eléctrica/térmica (%)	Generación de energía eléctrica/térmica (kWh/día)	Consumo de energía eléctrica en los equipos del sistema (kWh/día) Punta / Llano		Ahorro por sustitución de energético (UYU/día) / (USD/año)	
250-B-E	30	76	3	8	705	5.617
250-B-T	80	202	3	8	707	5.632
500-B-E	30	164	10	23	1.473	11.740
500-B-T	80	436	10	23	1.477	11.773
500-A-E	30	229	17	40	1.991	15.868
500-A-T	90	687	17	40	2.291	18.258
750-B-E	30	271	16	38	2.439	19.438
750-B-T	80	722	16	38	2.445	19.492
750-A-E	30	379	28	66	3.296	26.272
750-A-T	90	1.137	28	66	3.792	30.230
1000-A-E	30	488	37	85	4.245	33.839
1000-A-T	90	1.465	37	85	4.885	38.936

La tabla estima el ahorro por sustitución de energético considerado los parámetros descritos. Se asume que en caso del aprovechamiento térmico, se sustituye gas licuado de petróleo (GLP) en equivalentes de energía, asumiendo un Poder Calorífico Inferior (PCI) de 12,7 kWh/kg; mientras que en el caso de aprovechamiento eléctrico se sustituye energía eléctrica en horario de punta. Los costos asumidos para estimar este ahorro y la tasa de cambio empleada, se muestran en la tabla a continuación. Cabe aclarar que para facilitar la comparación entre los estudios realizados, se emplea la misma tasa de cambio que en el informe de Rincón de Albano.

**Tabla 6. Supuestos para estimar ingresos por generación de energía**

Energía eléctrica	Punta	10,252 UYU/kWh
	Llano	4,507 UYU/kWh
GLP		48,8 UYU/kg
Tipo de cambio 180 días (02/01/2020-30/06/2020)		41,4 UYU/USD

## 6.2 Sustitución de fertilizantes por aplicación de efluente a campo

Como ya fue mencionado, en el Modelo 1 el destino final del efluente que sale del sistema de biodigestión es indistinto en el análisis de la viabilidad, ya que queda por fuera del alcance del estudio. Por esta razón no se considera el aprovechamiento de los nutrientes y la sustitución de fertilizantes, por la eventual aplicación del efluente a campo.

Para el Modelo 2, en el que se comparan los sistemas de biodigestión del efluente (Alternativa 2) con la aplicación a campo (Alternativa 1), es necesario estimar la cantidad de nutrientes aprovechables y la cantidad de fertilizante sustituido, para este último. Para el estudio realizado, sólo fue considerado el aprovechamiento del nitrógeno contenido en el efluente. Asumiendo un contenido de nitrógeno de 1,5 % y que este se separa en el sólido en la misma proporción que los sólidos volátiles, se determina la cantidad de nitrógeno en el efluente a ser aplicado y la cantidad de fertilizante equivalente sustituido (Urea 46 %). Se asume un costo de 15 UYU por kilogramo de Urea y se utiliza la misma tasa de cambio que anteriormente (41,4 UYU/USD).

**Tabla 7. Nitrógeno aplicado a campo, cantidad de fertilizantes sustituidos y ahorro resultante (Alternativa 1 – Modelo 2).**

Escenario	N aplicado a campo (kg_N/día)	Fertilizante sustituido (kg/día)	Ahorro fertilizantes (UYU/día) / (USD/año)	
250-B-E	3,8	8,3	124	989
250-B-T	3,8	8,3	124	989
500-B-E	6,9	14,9	224	1.783
500-B-T	6,9	14,9	224	1.783
500-A-E	6,9	14,9	224	1.783
500-A-T	6,9	14,9	224	1.783
750-B-E	11,4	24,7	370	2.953
750-B-T	11,4	24,7	370	2.953
750-A-E	11,4	24,7	370	2.953
750-A-T	11,4	24,7	370	2.953
1000-A-E	14,6	31,8	477	3.803
1000-A-T	14,6	31,8	477	3.803

### 6.3 Costos de inversión

A continuación se detallan los costos de inversión para la implementación del sistema de biodigestión y generación de energía para cada uno de los escenarios considerados. En la Tabla 8 se muestran los costos de acuerdo a cada componente del sistema, mientras que en la Tabla 9 se desglosan los costos asociados a los equipos instalados.

Los costos de inversión adoptados se basan en la información proporcionada del proyecto demostrativo Rincón de Albano en USD, del cual se llevó un registro detallado de cada componente adquirido. Esta información fue corregida según las lecciones aprendidas en el desarrollo del proyecto, en cuanto a algunas inversiones que podrían haberse evitado o reducido. A partir de esta información y a juicio de la experiencia se estiman los costos de inversión de cada componente para los escenarios simulados.

A efectos de mayor comparabilidad entre escenarios, no se incluyen los gastos de la importación de la maquinaria en el costo total. Como ya fue mencionado, en una evaluación más ajustada, en los escenarios sin COMAP, se debería asumir que la maquinaria importada (sin considerar la inversión de ponerla en marcha) podría ser un 23% más costosa, ya que son gravados por un 10% de impuestos por concepto de recargo, 8% de impuesto único a la importación (IMADUNI) y 5% de tasa consular, que son valores de referencia para biodigestores importados (NCM 3925.10) desde el Mercosur.

A continuación se indican las consideraciones que justifican la adopción de los valores de inversiones:

- **Movimiento de tierra:** Depende de la generación de efluentes, que se asume proporcional a la escala de producción. A su vez, para establecimientos de 750 y 1.000 VO se considera una reducción de la tasa de generación de efluentes del 20 y 30 %, respectivamente.
- **Obra civil y sanitaria:** Se considera que el 50% de los costos son fijos y el 50 % restante variable con la escala de producción. Para ambos de nivel de sofisticación bajo se considera

además que estos costos fijos son el 50% menor y los costos variables con la escala de producción un 20% menor.

- Eléctrica: Se considera que el 50% de los costos son fijos y el 50 % restante variable con la escala de producción. Para tambos de nivel de sofisticación bajo se considera además que estos costos fijos son el 50% menor y los costos variables con la escala de producción un 20% menor.
- Asesorías: Se asume constante con la escala de producción, aunque para tambos de nivel de sofisticación bajo el costo de asesorías es 50% menor.
- Equipos:
  - o Membranas y accesorios: Proporcional a la escala de producción.
  - o Conexión biogás y válvulas de seguridad: Constante.
  - o Contador biogás y antorcha: Constante.
  - o Bombas de agitación por recirculación: Independiente de la escala de producción. Se asume que los tambos de nivel de sofisticación bajo tienen un costo 50% menor.
  - o Agitador pozo bombeo: Constante para tambos de nivel de sofisticación alto. Se asume que los tambos de nivel bajo no tienen.
  - o Motogenerador: Se asume que el 50% del costo es fijo y el resto proporcional a la escala de producción. Para tambos de nivel de sofisticación bajo se asume un costo fijo 40% menor.
  - o Adaptación quemador: Se asume 5.000 USD para tambos de 250 VO y 10.000USD para el resto.
  - o Soplador biogás: Se asume que el 50% del costo es fijo y el resto proporcional a la escala de producción. Para tambos de nivel de sofisticación bajo se asume un costo fijo 20% menor.
  - o Sistema purificación biogás: Se asume que el 50% del costo es fijo y el resto proporcional a la escala de producción. Para tambos de nivel de sofisticación bajo se asume un costo fijo 20% menor. A su vez, se asume que para el aprovechamiento térmico el costo es 20% menor para todas las escalas.
  - o Balón biogás purificado: Constante. Se asume que para aprovechamiento térmico no tienen.
  - o Tablero de control: Constante para tambos de nivel de sofisticación alto. Se asume que los tambos de nivel de sofisticación bajo el costo es 30 % menor.
  - o Instalación y puesta en operación: Constante para tambos de nivel de sofisticación alto. Se asume que los tambos de nivel de sofisticación bajo el costo es 30 % menor.

Cabe aclarar que la inversión no varía entre el Modelo 1 y Modelo 2, aunque para este último es necesario considerar los equipos adicionales necesarios para completar el sistema de gestión de efluentes en los escenarios de generación de energía (Alternativa 2), así como la instalación sustituida por el sistema implementado (Alternativa 1), los cuales se detallan en la Tabla 10. Como ya fue mencionado, se supone que el efluente final digerido es recirculado como agua de lavado de las instalaciones, mientras que el sistema alternativo sustituido corresponde a la aplicación a campo para el aprovechamiento de los nutrientes. A continuación se indican las consideraciones que justifican la adopción de los valores de estas inversiones:

- Equipos (Sistema 1 – Modelo 2):

- Laguna de acopio: Proporcional a la escala de producción.
- Sistema de aplicación del efluente a campo: Proporcional a la escala de producción.
- Sistema de abastecimiento de agua: Se asume 15.000 USD para establecimientos de 250 VO y 20.000 USD para el resto.
- Equipos adicionales (Sistema 2 – Modelo 2):
  - Laguna de acopio: Constante.
  - Sistema de recirculación: Constante.



**Tabla 8. Costos de inversión del sistema de biodigestión y generación de energía.**

Escenario	Costos sistema de biodigestión (USD)					Costos sistema de generación de energía (USD)				Total (USD)
	Movimiento de tierra	Obra civil y sanitaria	Eléctrica	Equipos	Asesorías	Obra civil y sanitaria	Eléctrica	Equipos	Asesorías y trámites	
250-B-E	10.598	12.663	5.118	50.697	1.536	4.872	6.835	36.740	5.760	<b>134.8</b>
250-B-T	10.598	12.663	5.118	50.697	1.536	0	0	23.771	5.760	<b>110.1</b>
500-B-E	21.196	18.291	7.393	68.620	1.536	7.037	11.858	47.877	5.760	<b>189.5</b>
500-B-T	21.196	18.291	7.393	68.620	1.536	0	0	32.038	5.760	<b>154.8</b>
500-A-E	21.196	28.140	11.373	87.055	3.071	10.826	18.243	59.401	5.760	<b>245.0</b>
500-A-T	21.196	28.140	11.373	87.055	3.071	0	0	37.621	5.760	<b>194.2</b>
750-B-E	25.435	23.919	9.667	86.543	1.536	9.202	15.506	59.015	5.760	<b>236.5</b>
750-B-T	25.435	23.919	9.667	86.543	1.536	0	0	35.305	5.760	<b>188.1</b>
750-A-E	25.435	35.175	14.217	104.978	3.071	13.533	22.804	77.964	5.760	<b>302.9</b>
750-A-T	25.435	35.175	14.217	104.978	3.071	0	0	40.889	5.760	<b>229.5</b>
1000-A-E	29.674	42.210	17.060	122.901	3.071	16.240	27.364	96.527	5.760	<b>360.8</b>
1000-A-T	29.674	42.210	17.060	122.901	3.071	0	0	45.938	5.760	<b>266.6</b>

**Tabla 9. Costos de inversión detallados para los equipos del sistema de biodigestión y generación de energía.**

Escenario		250-B-E	250-B-T	500-B-E	500-B-T	500-A-E	500-A-T	750-B-E	750-B-T	750-A-E	750-A-T	1000-A-E	1000-A-T
<b>Biodigestor</b>	Membranas y accesorios	17.923	17.923	35.846	35.846	35.846	35.846	53.769	53.769	53.769	53.769	71.692	71.692
	Conexión biogás y válvulas de seguridad	5.121	5.121	5.121	5.121	5.121	5.121	5.121	5.121	5.121	5.121	5.121	5.121
	Contador biogás y antorcha	10.242	10.242	10.242	10.242	10.242	10.242	10.242	10.242	10.242	10.242	10.242	10.242
	Bombas de agitación por recirculación	10.242	10.242	10.242	10.242	20.484	20.484	10.242	10.242	20.484	20.484	20.484	20.484
	Agitador pozo bombeo	0	0	0	0	5.121	5.121	0	0	5.121	5.121	5.121	5.121
	Instalación y puesta en operación	7.169	7.169	7.169	7.169	10.242	10.242	7.169	7.169	10.242	10.242	10.242	10.242
	<b>Total</b>	<b>50.697</b>	<b>50.697</b>	<b>68.620</b>	<b>68.620</b>	<b>87.055</b>	<b>87.055</b>	<b>86.543</b>	<b>86.543</b>	<b>104.978</b>	<b>104.978</b>	<b>122.901</b>	<b>122.901</b>
<b>Generación de energía</b>	Motogenerador	16.335	0	23.760	0	29.701	0	31.186	0	44.551	0	59.401	0
	Adaptación quemador	0	5.000	0	10.000	0	10.000	0	10.000	0	10.000	0	10.000
	Soplador biogás	3.861	3.861	5.346	5.346	5.940	5.940	6.831	6.831	7.425	7.425	8.910	8.910
	Sistema purificación biogás	5.792	5.346	8.019	7.128	8.910	8.019	10.247	8.910	11.138	9.801	13.365	13.365
	Balón biogás	1.188	0	1.188	0	1.188	0	1.188	0	1.188	0	1.188	0
	Tablero de control	5.405	5.405	5.405	5.405	7.722	7.722	5.405	5.405	7.722	7.722	7.722	7.722
	Instalación y puesta en operación	4.158	4.158	4.158	4.158	5.940	5.940	4.158	4.158	5.940	5.940	5.940	5.940
	<b>Total</b>	<b>36.740</b>	<b>23.771</b>	<b>47.877</b>	<b>32.038</b>	<b>59.401</b>	<b>37.621</b>	<b>59.015</b>	<b>35.305</b>	<b>77.964</b>	<b>40.889</b>	<b>96.527</b>	<b>45.938</b>

**Tabla 10. Costos de inversión para el sistema alternativo sustituido y los costos de inversión adicionales considerados para el Modelo 2.**

Escenario	Alternativa 1				Alternativa 2	
	Costo sistema de aplicación a campo (USD)			Costo abastecimiento de agua (USD)	Costos adicionales (USD)	
	Separador de sólidos	Laguna de acopio	Sistema de aplicación		Laguna de acopio digestado	Sistema de recirculación
250-B-E	0	50.000	15.000	15.000	20.000	5.000
250-B-T	0	50.000	15.000	15.000	20.000	5.000
500-B-E	15.363	70.000	30.000	20.000	20.000	5.000
500-B-T	15.363	70.000	30.000	20.000	20.000	5.000
500-A-E	15.363	70.000	30.000	20.000	20.000	5.000
500-A-T	15.363	70.000	30.000	20.000	20.000	5.000
750-B-E	15.363	80.000	40.000	20.000	20.000	5.000
750-B-T	15.363	80.000	40.000	20.000	20.000	5.000
750-A-E	15.363	80.000	40.000	20.000	20.000	5.000
750-A-T	15.363	80.000	40.000	20.000	20.000	5.000
1000-A-E	15.363	90.000	50.000	20.000	20.000	5.000
1000-A-T	15.363	90.000	50.000	20.000	20.000	5.000

#### 6.4 Costos de operación y mantenimiento

Los costos de operación y mantenimiento incluyen los gastos de mantenimiento de la maquinaria, el seguro anual y los gastos administrativos e imprevistos, y las suposiciones asumidas surgen de la información relevada del proyecto demostrativo de Rincón de Albano, para luego ser trasladado al resto de los escenarios modelados como un porcentaje de la inversión total.

Si bien los costos asociados a la energía eléctrica necesaria para los equipos del propio sistema podrían ser incluidos aquí, estos ya fueron descontados anteriormente de los ingresos por la sustitución de energía.

Para el Modelo 1, se considera que los costos de operación y mantenimiento del sistema de biodigestión y aprovechamiento de biogás alcanza el 1,05 % de la inversión total; mientras que para el Modelo 2 es de 1,01 %, dado que se consideran inversiones adicionales por el sistema de acopio en laguna y recirculación del efluente (verTabla 10).

A su vez, para los sistemas de bajo nivel de sofisticación, se asume el costo de mano de obra de 2.010 USD/año para monitorear el biodigestor, independientemente del tamaño del sistema o del tipo de aprovechamiento energético, lo que de alguna manera se evita en los de mayor nivel de sofisticación debido al mayor automatismo del sistema. La estimación de costo de mano de obra toma en cuenta los aportes patronales rurales según el BPS y los salarios mínimos según el MTSS para el sector de julio 2020<sup>5</sup>, según la siguiente tabla. Se utiliza la misma tasa de cambio que anteriormente.

**Tabla 11. Supuestos tomados para estimar el costo de mano de obra**

Sueldo nominal mínimo trabajador especializado	25.084UYU/mes
Aporte patronal rural adicional al sueldo nominal	2.650UYU/mes
Tipo de cambio 180 días (2.1.2020-30.6.2020)	41,4 UYU/USD
Sueldo nominal trabajador especializado (incl. aporte patronal)	8.039USD/año
Carga horaria para manejo del biodigestor de baja sofisticación	25 %
Adicional mano de obra para escenarios de baja sofisticación	2.010USD/año

Cabe mencionar que, aunque el beneficiario del proyecto de Rincón de Albano asegure no tener gastos administrativos, se estimó un mínimo del 1% sobre los ingresos para gastos en este rubro, considerando que dedica su tiempo al monitoreo y seguimiento del sistema. Se incluyó además un costo del 1% adicional sobre ingresos para abarcar imprevistos.

Debido a que para el Modelo 2 es necesario comparar el sistema de biodigestión y generación de energía (Alternativa 2) con el sistema de aplicación a campo del efluente (Alternativa 1), solo se deben considerar los costos de operación y mantenimiento incrementales. Para esto se asume que estos representan el 1,48 % de los costos de inversión correspondientes a la Alternativa 1 y 1.01% de la inversión para la Alternativa 2 (biodigestor con sistema de recirculación). La tabla siguiente lista los costos de operación y mantenimiento considerados en un tambo de 500 vacas en ordeño:

<sup>5</sup><https://www.gub.uy/ministerio-trabajo-seguridad-social/politicas-y-gestion/correctivo-final-julio-2020-6>

**Tabla 12. Costos de operación y mantenimiento (O&M) para un tambo de 500 VO según alternativa en Modelo 2.**

Alternativa 1: Aplicación a campo		Alternativa 2: Biodigestor + recirculación	
Sistema de riego	1.000 USD/año	Sistema biodigestor	2.574 USD/año
Abastecimiento de agua	1.000 USD/año	Sistema de recirculación	500 USD/año
<b>Total O&amp;M</b>	<b>2.000 USD/año</b>	<b>Total O&amp;M</b>	<b>3.074 USD/año</b>
% sobre inversión inicial	1,48 %	% sobre inversión inicial	1.01 %

De acuerdo a lo ya mencionado, en los escenarios de baja sofisticación en la Alternativa 2, se agrega el costo de mano de obra de 2.010 USD/año para monitorear el biodigestor, independientemente del tamaño del sistema o del tipo de aprovechamiento energético. La estimación del costo de mano de obra se calcula a la tasa de cambio mencionada, en base a los mismos supuestos que en el Modelo 1.

En la siguiente tabla se indican los costos de operación y mantenimiento para los distintos escenarios planteados según el modelo.

**Tabla 13. Costos de operación y mantenimiento de los escenarios planteados según modelo.**

Escenario	Modelo 1	Modelo 2	
		Alternativa 1	Alternativa 2
250-B-E	3.425	1.184	3.624
250-B-T	3.166	1.184	3.375
500-B-E	4.000	2.003	4.510
500-B-T	3.635	2.003	4.160
500-A-E	2.573	2.003	3.061
500-A-T	2.039	2.003	2.548
750-B-E	4.494	2.299	4.991
750-B-T	3.985	2.299	4.502
750-A-E	3.181	2.299	3.687
750-A-T	2.410	2.299	2.946
1000-A-E	3.788	2.595	4.314
1000-A-T	2.799	2.595	3.362

## 6.5 Períodos de retorno de la inversión

### 6.5.1 Modelo 1

En base a los montos de inversión, los ingresos por la generación de energía y los costos de operación y mantenimiento estimados, se obtiene el tiempo necesario para el retorno de la inversión. A continuación se presentan los resultados obtenidos para los escenarios planteados según el Modelo 1. No se considera una tasa de inflación y no se tienen en cuenta los beneficios de la COMAP.

**Tabla 14. Resultados evaluación económica Modelo 1 - retorno simple sin COMAP.**

Escenario	Inversión Total (USD)	Ingresos por sustitución de energía (USD/año)	Costo O&M (USD/año)	Ingresos netos (USD/año)	Retorno simple (años)
250-B-E	134.818	5.617	3.425	2.192	61,5

250-B-T	110.142	5.632	3.166	2.466	44,7
500-B-E	189.567	11.740	4.000	7.740	24,5
500-B-T	154.833	11.773	3.635	8.137	19,0
500-A-E	245.066	15.868	2.573	13.294	18,4
500-A-T	194.217	18.258	2.039	16.218	12,0
750-B-E	236.584	19.438	4.494	14.945	15,8
750-B-T	188.165	19.492	3.985	15.507	12,1
750-A-E	302.937	26.272	3.181	23.092	13,1
750-A-T	229.525	30.230	2.410	27.820	8,3
1000-A-E	360.808	33.839	3.788	30.050	12,0
1000-A-T	266.615	38.936	2.799	36.137	7,4

Como se puede observar, el periodo de retorno simple es menor a 10 años para los escenarios de alta sofisticación en tambos de mayor escala, en los que se aprovecha la energía para un uso térmico (750 y 1.000 vacas en ordeño). En el resto de los escenarios el periodo de retorno simple es mayor, principalmente en los establecimientos de pequeña escala (250 vacas en ordeño). Cabe destacar que al no incluir los impuestos de la aduana entre los gastos de inversión, el retorno simple es posiblemente un poco más elevado que lo descrito.

Debido a que en el Modelo 1, el proyecto se considera como un sistema adicional en la gestión de efluentes existente, la inversión es elegible para presentar a la COMAP en el indicador de tecnologías limpias. Por esta razón, se evalúan los escenarios con escalas de producción mayores a 500 vacas en ordeño, tomando en cuenta la exoneración de IRAE a través de la COMAP como un ingreso del sistema.

Con el fin de poder comparar el presente informe con el del proyecto demostrativo de Rincón de Albano, se asume que el proyecto de inversión se presenta en octubre 2020, tomando en consideración el mismo valor de la Unidad Indexada (4,71 UI/UYU) y tasa de cambio (42,58 UYU/USD) al 30/09/2020, la cual difiere levemente de la tasa utilizada para el cálculo de los demás valores donde se utiliza el promedio.

A su vez, se asume que los tambos de hasta 500 vacas en ordeño son micro o pequeñas empresas (mype)<sup>6</sup>, y medianas empresas los establecimientos mayores. De acuerdo al Decreto N° 268/020, se otorga a las empresas categorizadas como micro o pequeñas, que presenten proyectos de inversión dentro del ejercicio fiscal por un total acumulado de hasta 3.500.000UI, un 10% adicional de beneficio de IRAE y un ejercicio adicional al plazo de exoneración obtenido para dicho impuesto.

Asimismo, para el modelo se simula que el tambo se encuentra en San José, ya que el puntaje del indicador de descentralización dependerá del departamento en el que se ubique el establecimiento. Cabe destacar, que si el tambo se ubicara en Colonia (el otro departamento tradicionalmente lechero) o en Florida (zona lechera-ganadera con la mayor capacidad de procesamiento de la industria láctea) el puntaje obtenido por el indicador de descentralización sería mayor.

<sup>6</sup>Para quedar comprendida como micro o pequeñas empresas, de acuerdo al Decreto N° 504/007, deben cumplir las siguientes condiciones: - Personal ocupado: No más de 19 personas. - Ventas anuales sin IVA: No superen UI 10.000.000 (diez millones de unidades indexadas).

La inversión obtiene el puntaje máximo en el indicador tecnologías limpias dado que es enteramente computable bajo el ítem de digestión anaerobia de la lista taxativa de dicho indicador. A su vez obtiene el puntaje máximo que otorga el MGAP a través de su indicador sectorial por tratarse de una inversión en energías renovables.

**Tabla 15. Puntaje indicadores COMAP según simulador UNASEP**

Matriz general COMAP	Puntaje	Ponderación	Puntaje final
Descentralización (San José)	6	15%	0,9
Indicador sectorial MGAP - Inversión en energías renovables	10	25%	2,5
Tecnologías limpias	10	20%	2
<b>Total</b>			<b>5,4</b>

De acuerdo al puntaje obtenido, para mypes el simulador de la COMAP<sup>7</sup> arroja un 74,22% de exoneración de IRAE en un plazo máximo de 11 años y para las demás empresas una exoneración del 64,22% en un plazo máximo de 10 años.

Cabe mencionar que para la determinación de estos niveles de exoneración no fueron tenidos en cuenta los incentivos incrementales transitorios dispuestos en el último decreto 268/020.

Se calcula el valor del retorno simple solamente a partir de la fracción de la inversión que no es exonerada. El monto de la inversión sin fracción exonerada por IRAE corresponde al 25,78% de la inversión en el caso de las mypes y 35.78 % en el caso de los tambos más grandes. Cabe destacar que el modelo es básico, ya que no considera una inflación en dólares ni un valor futuro del dinero diferente al valor actual.

En la tabla siguiente se aprecia que si se contabiliza la exoneración de IRAE como un ingreso, se reduce significativamente el período de reembolso simple y la inversión se vuelve muy atractiva. Nuevamente se constata que la inversión es más rentable en escenarios de alta sofisticación y en los escenarios de aprovechamiento térmico. Como se mencionó, en el caso de presentarse a la COMAP el productor exonera los impuestos de la Aduana, y éstos no están incluidos en la inversión.

**Tabla 16. Resultados evaluación económica Modelo 1 - retorno simple con COMAP.**

Escenario	Ingresos netos (USD/año)	Monto de inversión exonerado por la COMAP (USD)	Monto restante no exonerado a través de la COMAP (USD)	Retorno simple (años)
250-B-E	2.192	N/A	N/A	N/A
250-B-T	2.466	N/A	N/A	N/A
500-B-E	7.740	140.697	48.870	6,3
500-B-T	8.137	114.917	39.916	4,9
500-A-E	13.294	181.888	63.178	4,8
500-A-T	16.218	144.148	50.069	3,1
750-B-E	14.945	151.934	84.650	5,7
750-B-T	15.507	120.840	67.325	4,3
750-A-E	23.092	194.546	108.391	4,7
750-A-T	27.820	147.401	82.124	3,0
1000-A-E	30.050	231.711	129.097	4,3
1000-A-T	36.137	171.220	95.395	2,6

<sup>7</sup> Accesible aquí: [http://comap.mef.gub.uy/29446/7/areas/simuladores-dec-268\\_020.html](http://comap.mef.gub.uy/29446/7/areas/simuladores-dec-268_020.html)

Por ejemplo, en el escenario de 500 vacas en ordeño de alta sofisticación y aprovechamiento térmico (500-A-T), la inversión es de 194.217 USD y a través de la COMAP se exoneran al productor 144.148 USD (74,2% de la inversión). Ese monto se le descuenta al productor del IRAE a pagar los próximos años. Dependiendo del saldo imponible de IRAE que tenga, lo podrá exonerar en los próximos 11 años o en menos tiempo. El tambo puede descontar hasta el 90% del IRAE que paga a través de este mecanismo en el plazo dado, siendo el IRAE efectivo mínimo del 3% sobre el saldo imponible hasta descontar el monto mencionado. En el peor escenario, para que el tambo pueda exonerar todo el monto en los 11 años, su saldo imponible debería ser de mínimo de 14.560 USD/año. En este caso, la inversión restante no exonerada por COMAP es de 50.069 USD que divididos por el resultado neto anual, arrojan un retorno (payback) simplificado de 3.1 años. Como se mencionó, no se incluye ni la inflación ni una tasa de descuento en el modelo.

6.5.2 Modelo 2

En esta sección se detallan los resultados obtenidos de la evaluación económica correspondiente al Modelo 2. La tabla siguiente resume los datos ya indicados respecto a las inversiones, los ingresos y los costos de operación y mantenimiento de cada escenario de las dos alternativas planteadas. Cabe destacar que la inversión en la Alternativa 2 detallada en la tabla es de 25.000 USD adicionales a los que se tomaron en cuenta en el Modelo 1, porque se incluyen costos constantes de 20.000 USD para una laguna de acopio y 5.000 USD para un sistema de recirculación. En los escenarios de 500 vacas en ordeño o más.

Los ingresos de la Alternativa 1 corresponden a ahorros en fertilizantes (ver Tabla 7) y los de la Alternativa 2 a la generación de energía (ver

Tabla 5). Éste último es igual en el Modelo 1.

Eliminado:   
Tabla 5

Escenario	Alternativa 1			Alternativa 2		
	Inversión (USD)	Costos O&M (USD/año)	Ingresos (USD/año)	Inversión (USD)	Costos O&M (USD/año)	Ingresos (USD/año)
250-B-E	80.000	1.184	989	159.818	3.624	5.617
250-B-T	80.000	1.184	989	135.142	3.375	5.632
500-B-E	135.363	2.003	1.783	<b>229.930</b>	4.332	11.740
500-B-T	135.363	2.003	1.783	<b>195.196</b>	3.981	11.773
500-A-E	135.363	2.003	1.783	<b>285.429</b>	2.883	15.868
500-A-T	135.363	2.003	1.783	<b>234.580</b>	2.369	18.258
750-B-E	155.363	2.299	2.953	<b>276.947</b>	4.807	19.438
750-B-T	155.363	2.299	2.953	<b>228.528</b>	4.318	19.492
750-A-E	155.363	2.299	2.953	<b>343.299</b>	3.467	26.272
750-A-T	155.363	2.299	2.953	<b>269.887</b>	2.726	30.230
1000-A-E	175.363	2.595	3.803	<b>401.170</b>	4.052	33.839
1000-A-T	175.363	2.595	3.803	<b>306.977</b>	3.100	38.936



Como ya fue mencionado, para estimar la viabilidad económica de la inversión, es preciso determinar el ingreso neto incremental de la Alternativa 2 frente a la Alternativa 1, ya que esta inversión se considera un costo hundido. La tabla siguiente lista la inversión, los costos de O&M y los ingresos incrementales de la Alternativa 2 en cada escenario. También estima la renta neta incremental del sistema y el retorno simple de la inversión sin considerar los beneficios que otorga la COMAP.

**Tabla 18. Resultados evaluación económica Modelo 2 - retorno simple sin COMAP.**

Escenario	Inversión incremental (USD)	Costos O&M incrementales (USD/año)	Ingreso incrementales (USD/año)	Ingresos netos incrementales (USD/año)	Retorno simple (años)
250-B-E	79.818	2.440	4.627	2.187	36,5
250-B-T	55.142	2.191	4.642	2.451	22,5
500-B-E	94.567	2.329	9.957	7.628	12,4
500-B-T	59.833	1.978	9.990	8.012	7,5
500-A-E	150.066	879	14.084	13.844	10,8
500-A-T	99.217	366	16.475	16.109	6,2
750-B-E	121.584	2.508	16.486	13.978	8,7
750-B-T	73.165	2.018	16.540	14.521	5,0
750-A-E	187.937	1.168	23.320	22.152	8,5
750-A-T	114.525	426	27.277	26.851	4,3
1000-A-E	225.808	1.456	30.036	28.580	7,9
1000-A-T	131.615	505	35.133	34.628	3,8

En este modelo, la inversión tiene un retorno simple menor a 10 años para tambos a partir de 500 vacas en ordeño con aprovechamiento térmico y para tambos a partir de 750 vacas con sistemas de alta sofisticación de aprovechamiento térmico y eléctrico. Como en el modelo 1, al no incluir los impuestos de la aduana entre los gastos de inversión, el retorno simple es posiblemente un poco más elevado que lo descrito.

En el Modelo 2, dado que la inversión se realiza, en parte, para adecuar el sistema de gestión de efluentes y cumplir con la normativa ambiental, la única inversión que se presenta a la COMAP es la relacionada con la generación de energía, ya sea eléctrica o térmica.

Para modelar el ingreso por la exoneración de IRAE de la COMAP se utilizan los mismos supuestos que en el Modelo 1:

- Los tambos más chicos (250 VO) no se presentan a la COMAP dado que no tributan IRAE,
- Los tambos de 500 VO son micro y pequeñas empresas y obtienen un 74,22% de la inversión como exoneración de IRAE
- Los tambos de 750 y 1000 VO son medianas empresas y obtienen un 64,22% de la inversión como exoneración de IRAE

La tabla siguiente muestra el monto de inversión presentado a la COMAP en cada escenario y estima el retorno simple a partir de la fracción que no obtuvo exoneración, obviando también el costo hundido.

**Tabla 19. Resultados evaluación económica Modelo 2 - retorno simple con COMAP.**

Escenario	Ingresos netos incrementales (USD/año)	Monto de inversión exonerado por la COMAP (USD)	Costo hundido (USD)	Monto restante no exonerado a través de la COMAP ni costo hundido (USD)	Retorno simple (años)
250-B-E	2.187	N/A	N/A	N/A	N/A
250-B-T	2.451	N/A	N/A	N/A	N/A
500-B-E	7.628	53.834	135.363	40.734	5,34
500-B-T	8.012	28.054	135.363	31.779	3,97
500-A-E	13.844	69.938	135.363	80.128	5,79
500-A-T	16.109	32.198	135.363	67.019	4,16
750-B-E	13.978	57.467	155.363	64.117	4,59
750-B-T	14.521	26.372	155.363	46.793	3,22
750-A-E	22.152	77.103	155.363	110.834	5,00
750-A-T	26.851	29.958	155.363	84.567	3,15
1000-A-E	28.580	93.691	175.363	132.116	4,62
1000-A-T	34.628	33.200	175.363	98.414	2,84

Dado que solo se presenta una fracción de la inversión total a la COMAP,(y solo el 74% u el 64% de éste es exonerado),aún considerando el costo hundido, el modelo 2 arroja retornos simples levemente menos atractivos considerando la COMAP que el Modelo 1.

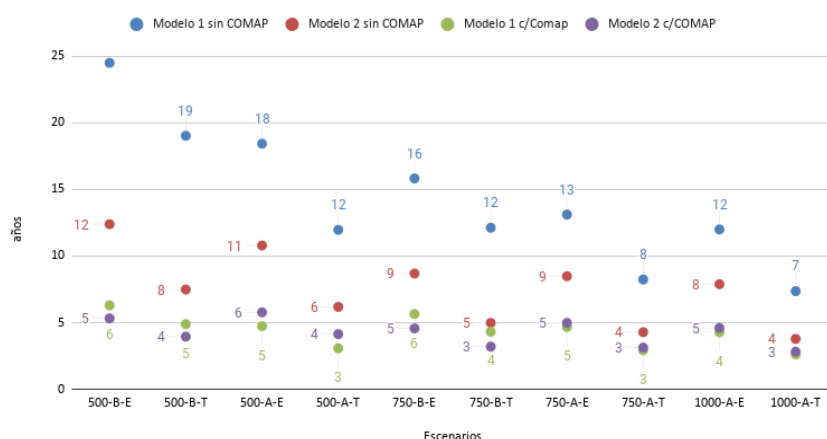
## 6.6 Resumen de resultados

A continuación se resumen los resultados obtenidos de la evaluación de la factibilidad económica para los escenarios planteados bajo los dos modelos considerados y los diferentes supuestos realizados.

En el siguiente gráfico presenta los resultados de retornos simples en años para cada escenario planteado bajo los dos modelos considerados, con y sin la COMAP.

Cabe recordar que, entre otros supuestos realizados, se parte de la base que no hay inflación en USD y que el valor actual del dinero equivale al valor futuro del dinero. En el caso de los modelos con la COMAP, se contabiliza la exoneración futura de IRAE de la empresa como un ingreso en el presente y el retorno simple se calcula sobre la fracción no exonerada de la inversión.

**Gráfico 1. Resultados de retorno simple (años) para los distintos escenarios evaluados.**



En este gráfico se observa que, de forma general, la inversión se torna más atractiva a mayor escala, y que a una escala determinada, es más atractivo el aprovechamiento térmico del biogás.

Además, se advierte que los escenarios de nivel de sofisticación alto implican menores tiempos de retorno de la inversión. Esto es consecuencia básicamente al supuesto del mayor requerimiento de mano de obra en los escenarios de bajo nivel de sofisticación, necesario para la operación y control del sistema.

Si no se consideran los beneficios de la COMAP, la inversión se recupera en menor tiempo para el Modelo 2, el cual asume la necesidad de adecuación del sistema de gestión de efluente y la inversión de la alternativa sustituida se asume como un costo hundido:

- Para el Modelo 1, la inversión se puede llegar a recuperar en menos de 10 años en los escenarios de 750 y 1.000 vacas en ordeño incorporando sistemas de alta sofisticación y aprovechamiento térmico.
- En el Modelo 2 dado que la inversión es menor por considerar un costo hundido, en todos los escenarios de 750 y 1.000 vacas en ordeño y en los escenarios de aprovechamiento térmico de 500 vacas en ordeño la inversión se recupera en menos de 10 años.

Estos resultados se invierten si se considera la presentación de los proyectos a la COMAP y se evalúan los beneficios por exoneración de impuestos como ingresos. Las inversiones en el Modelo 1 se recuperan más rápidos que en el Modelo 2, ya que toda la inversión puede postular al mecanismo, obteniéndose mayores niveles de exoneración de IRAE. Todos los escenarios modelados presentan retornos simples de recuperación de la inversión menores a 10 años.

Como casos particulares, resulta interesante destacar aquellos escenarios que presentan períodos de retorno simple menores a 5 años:

- Sin COMAP: Los escenarios del Modelo 2 de 750 y 1.000 vacas en ordeño, con y sin COMAP, de alta sofisticación y aprovechamiento térmico (750-A-T) y (1000-A-T).

- Con COMAP: Todos los escenarios del Modelo 1, con excepción de los de aprovechamiento eléctrico de baja sofisticación (500-B-E y 750-B-E) y todos los escenarios del Modelo 2 con excepción de los de aprovechamiento eléctrico de 500 vacas en ordeño (500-B-E y 500-A-E)

## 7 Conclusiones

Luego de la experiencia del proyecto demostrativo de Rincón de Albano, el análisis de la replicabilidad de la tecnología y la posibilidad de consolidarse dentro de las alternativas de gestión de los efluentes de tambos, adquiere un especial interés. Además de la posibilidad de contar con información real sobre los distintos aspectos que involucra el desarrollo de este tipo de proyecto.

Desde el punto de vista técnico, esta tecnología es por demás interesante ya que genera energía almacenable, de fácil manejo y con diversos usos posibles. A su vez, permite reducir considerablemente la carga contaminante del efluente, lo que habilita un mejor aprovechamiento del efluente final, ya sea como agua de lavado o para su aplicación a terreno.

Los distintos componentes del proyecto admiten cierta flexibilidad en su diseño, ajustándose a un eventual sistema existente o a las posibilidades de cada caso particular. De esta manera, es posible adoptar sistemas con mayor o menor grado de sofisticación, aunque de esto dependa tanto los requerimientos de operación y control, como el desempeño respecto al rendimiento general del proceso. Como pudo observarse en el procesamiento de los datos, la inversión del sistema es el parámetro de mayor sensibilidad, por lo que esta flexibilidad es fundamental en la búsqueda de opciones para viabilizar un emprendimiento en este sentido.

En cuanto a los aspectos ambientales, la producción de biogás representa una de las pocas alternativas asociadas al sector para reducir emisiones de Gases de Efecto Invernadero, al mismo tiempo que se reducen los olores molestos y la presencia de moscas en el establecimiento.

En relación a la factibilidad económica, es necesario indicar que esta depende del punto de partida del establecimiento respecto al sistema existente de gestión de los efluentes, ya que como ya ha sido mencionado, si el establecimiento ya cuenta con un sistema adecuado, la producción de biogás y su aprovechamiento energético debería ser rentable por sí mismo (Modelo 1); mientras que si el establecimiento debe adecuar el sistema, esta alternativa debería ser considerada como una inversión adicional a lo que podría suponerse como una instalación mínima o escenario base (Modelo 2).

En cualquier caso, se confirma que para tambos pequeños y medianos, de hasta 500 vacas en ordeño, esta tecnología de gestión de efluentes no es viable. Al menos no para los sistemas modelados con este tipo de tecnologías de biodigestión, que requieren montos de inversiones mínimos demasiado altos. Además, a estas escalas de producción, difícilmente se tribute IRAE, cuya exoneración a través de la COMAP viabiliza este tipo de proyectos, como pudo observarse para escalas mayores de acuerdo a los resultados obtenidos.

Como era de esperar, a mayor escala de producción, la inversión se torna más atractiva, debido a que gran parte de los costos, tanto de inversión como de operación y mantenimiento, son

independientes del tamaño del establecimiento, mientras que la generación de energía útil es directamente proporcional a la cantidad de animales en ordeño.

Por otro lado, se confirma que el aprovechamiento térmico del biogás es más atractivo que la generación de energía eléctrica. Lamentablemente, existen muy pocos establecimientos de gran porte que presenten un uso de energía térmica asociado al establecimiento lechero y más considerando que la generación de energía puede llegar a ser significativa. De acuerdo a consultas realizadas a expertos vinculados al sector, las queserías artesanales y la elaboración de otros derivados se encuentran generalmente en establecimientos de muy pequeña escala.

En otro sentido, los resultados obtenidos indican que los sistemas de alta sofisticación son más rentables que los sistemas de baja sofisticación, lo que se debe, por un lado a un mejor desempeño del sistema y a la menor necesidad de mano de obra en la operación y mantenimiento. Este último aspecto presenta gran sensibilidad en la viabilidad y se basa en una suposición realizada para el análisis, por lo que debería ser evaluado con mayor precisión para casos particulares.

En cuanto a los dos puntos de vista modelados en que puede enmarcarse una inversión en este tipo de sistema, se observó que la viabilidad de la inversión depende claramente de la posibilidad de que pueda presentarse a la COMAP<sup>8</sup> para la exoneración del IRAE. Es así que para proyectos en que la planta de biogás y su aprovechamiento energético se incorporan al sistema de gestión de efluente como una unidad adicional (Modelo 1), la inversión pasa de ser muy poco atractiva a presentar períodos de repago cortos si se presenta a la COMAP, tornando la inversión interesante. Algo similar ocurre para el modelo en que el sistema de gestión de efluente debe adaptarse y se compara esta tecnología con la opción más comúnmente implementada (Modelo 2); aunque esto se da en menor medida, ya que la necesidad de cumplir con la normativa imposibilita a presentar toda la inversión a la COMAP para obtención del beneficio.

Cabe mencionar que la comparación entre las alternativas de gestión de efluentes para el Modelo 2, se basan en que el efluente final producto de la biodigestión es reutilizado para el lavado de las instalaciones. Si esta recirculación del efluente no se da, el modelo planteado no es válido y la comparación cambia, ya que es necesario plantear cual es efectivamente el destino final del efluente. No obstante, se considera necesario destacar la posibilidad que ofrece el sistema de biodigestión en cuanto a la recirculación del efluente como agua de lavado, producto a la mejora de la calidad final del efluente y su contenido significativamente menor de materia orgánica.

A partir de estas observaciones, se podría concluir que la tecnología de biogás es atractiva para aquellos establecimientos de mayor escala que requieran adaptar sus sistemas de gestión de efluentes y puedan reutilizar el efluente final como agua de lavado de las instalaciones.

Además, para aquellos establecimientos, de prácticamente todas las escalas y bajo cualquier modelo de implementación, que tributen IRAE y tengan oportunidad de presentar el proyecto a la COMAP, esta alternativa se torna interesante en el modelo.

---

<sup>8</sup> Cabe recordar que se parte desde el supuesto para el modelo que el valor actual del dinero equivale al valor futuro del dinero y no se considera una tasa de descuento. La exoneración futura de IRAE de la empresa a través de la COMAP se contabiliza como un ingreso en el presente y el retorno simple se calcula sobre la fracción no exonerada de la inversión.

Queda como desafío continuar la búsqueda de mejores adaptaciones tecnológicas a las condiciones locales y posibilidades del sector, a través de diseños de sistemas que requieran menores montos de inversión, principalmente a pequeñas escalas donde a su vez existe la posibilidad de aprovechamiento térmico, sin perder robustez y confiabilidad en la operación.

En el sentido de promover el uso térmico del biogás, queda pendiente el estudio de aplicación a otros sectores en los cuales esto presente mayores perspectivas, entre los que se pueden mencionar el sector de cría de porcinos y el sector agroindustrial en general, en los que además el potencial de generación de biogás podría ser mayor, dadas las características de los residuos y las prácticas productivas. A modo de ejemplo, es posible estimar que la misma cantidad de biogás que se genera un tambo de 500 vacas en ordeño en un sistema de alta sofisticación ( $77 \text{ m}^3_{\text{CH}_4}/\text{día}$ , [Tabla 4](#)), es alcanzada por un establecimiento de cría de porcinos de ciclo completo de aproximadamente 290 animales.

Eliminado: Tabla 4