



Proyecto demostrativo

# Rincón de Albano

Desarrollo de una planta de biogás en  
establecimiento lechero

Evaluación técnica-económica

Ing. Quím. Víctor Emmer

Ec. María Ester Zaha

Octubre 2020

## Índice

Acerca de este documento .....	3
Resumen ejecutivo .....	4
Introducción .....	6
Objetivos del estudio .....	8
Objetivo general .....	8
Objetivos específicos .....	8
Marco teórico .....	9
La digestión anaerobia como alternativa para el tratamiento y valorización de residuos de establecimientos lecheros .....	9
Aprovechamiento del biogás para generación de energía eléctrica .....	10
Efecto de la temperatura en la generación de biogás .....	10
Inhibición por nitrógeno .....	11
Descripción del caso de estudio .....	11
Resultados .....	19
Evaluación técnica .....	19
Evaluación económica .....	37
Conclusiones .....	56
Referencias .....	60

## **Acerca de este documento**

En el presente documento se detalla la información relativa al proyecto demostrativo para el desarrollo de una planta de biogás en el establecimiento lechero Rincón de Albano, con el fin de generar conocimiento respecto a la tecnología y analizar los aspectos asociados al diseño, la instalación y el seguimiento del proyecto.

La evaluación de los resultados obtenidos de la experiencia, es fundamental en la búsqueda de alternativas de mejora de la tecnología y en la promoción para su replicación.

El documento comienza con una breve introducción en la que se reconocen los antecedentes del sector y los problemas asociados a la gestión de los residuos que generan. Además, se presenta al Proyecto Biovalor, como una iniciativa que busca explorar posibles soluciones a estos problemas, y al proyecto de Rincón de Albano como caso particular de estudio.

A continuación se plantean los objetivos generales y específicos de la evaluación realizada, indicando los aspectos particulares analizados, propios del proyecto y la tecnología implementada.

Se presenta luego una breve introducción al marco teórico aplicado al proyecto, describiendo las bases de la tecnología y puntualizando sus principales características que fueron las bases para el análisis realizado.

En la siguiente sección se presentan los resultados obtenidos y sistematizados durante el seguimiento del proyecto, determinando los parámetros de control del proceso y los indicadores necesarios para la evaluación del desempeño del sistema. Además, se realiza la evaluación económica del proyecto bajo distintas hipótesis, que permiten analizar tanto la sostenibilidad del proyecto como el potencial de replicabilidad de la tecnología.

Por último, se detallan las conclusiones de la implementación del proyecto, tanto desde el punto de vista técnico como económico, así como las lecciones aprendidas, la identificación de mejoras y la necesidad de profundización en el análisis.

## Resumen ejecutivo

El sector lechero ha presentado históricamente desafíos en cuanto al correcto manejo de los efluentes, lo que ha originado diversas iniciativas para la búsqueda de alternativas de mejorar la gestión de los residuos y lograr una producción más sostenible.

El proyecto de implementación de una planta de biogás en el establecimiento lechero Rincón de Albano de valorización de los efluentes para la generación de energía eléctrica, representa la primera experiencia de esta tecnología en el sector y el primer proyecto de microgeneración a partir de biomasa en Uruguay. El mismo busca demostrar la viabilidad técnica de esta tecnología y evaluar su factibilidad económica y potencial de replicabilidad, de forma de consolidarla como alternativa de valorización de los residuos del sector.

El proyecto consiste en la recolección de los efluentes producidos en el lavado de las instalaciones de la etapa de ordeño y su procesamiento por digestión anaerobia para la producción de biogás. Este biogás alimenta un motogenerador para generar energía eléctrica, la cual es consumida en el propio establecimiento e intercambiada con la red a través de una conexión bidireccional. Al ser el biogás una energía almacenable, es posible acumularlo durante el día para generar energía eléctrica en horario punta, cuando la demanda de energía es superior y se requiere mayor generación a partir de fuentes fósiles.

De acuerdo a los resultados obtenidos, la generación de biogás y energía eléctrica se encuentra dentro de los valores esperados de diseño. La generación promedio de energía eléctrica es de aproximadamente 200 kWh/día, de los cuales el 86 % se inyecta a la red nacional de UTE, donde el 8 % corresponde al ahorro por autoconsumo en las operaciones del tambo y el restante 6 % es utilizado en los equipos del propio sistema de generación.

En cuanto a la evaluación de la factibilidad económica, el proyecto logra un período de recuperación de la inversión de 13 años y una tasa interna de retorno, desde el punto de vista del beneficiario del proyecto y descontando el apoyo de Biovalor en el monto de la inversión.

Como ejercicio de evaluación de la replicabilidad, si se parte de un establecimiento tipo que no cuenta con un sistema de gestión de efluentes y se debe decidir qué tipo de sistema implementar, se obtienen resultados mucho más atractivos. Las alternativas son la implementación de un sistema de biodigestión y generación de energía eléctrica o la tecnología usualmente instalada de acopio del efluente y aplicación al terreno. Considerando únicamente los costos de inversión incremental entre el biogás y el sistema usual, se alcanza un período de recuperación de la inversión de menos de 8 años y una tasa interna de retorno mayor al 9 %, si se aplica a los beneficios de exoneración de impuestos previstos para este tipo de inversión.

Si bien la evaluación económica no ha arrojado resultados muy atractivos respecto a la rentabilidad, el proyecto presenta diversos beneficios adicionales que deben ser resaltados. En primer lugar, la mejor calidad del efluente que se obtiene en el biodigestor, permite pensar en un sistema de recirculación para reutilizar el efluente en el lavado de las instalaciones, práctica que el caso particular de Rincón de Albano ya realizaba, pero que no representa una práctica común en este tipo de establecimientos en nuestro país. Este modelo aumenta la circularidad de la producción, en el cual a su vez se generan ingresos directos y más tangibles. Se reduce también la generación de olores molestos y la proliferación de insectos. Además, esta

tecnología es simple desde la operativa, ya que es posible automatizar fácilmente todo el proceso y requerir una mano de obra mínima.

El nivel de replicabilidad de esta tecnología para la valorización de los residuos, depende principalmente de la escala del emprendimiento, ya que para establecimientos pequeños esta alternativa no parece ser la más adecuada por los altos costos de inversión asociados. Por otro lado, la rentabilidad del proyecto depende en gran medida del escenario de partida, es decir, las condiciones en que se encuentra el establecimiento respecto a la gestión de sus efluentes. Aquellos establecimientos que no cuentan con un sistema adecuado, podrían evaluar la alternativa de generación de biogás y lograr un modelo de negocio sostenible.

Entre los desafíos para potenciar esta tecnología podrían mencionarse la necesidad de alcanzar diseños de sistemas que requieran una inversión menor, pudiendo incluso resignar desempeño, dada la sensibilidad de este aspecto.

Por último, se reconoce la necesidad de avanzar en mecanismos de incentivo que valoricen la circularidad de los procesos y logre una diferenciación de los productos, que promueva una mejora de la gestión de los residuos y mitigación de los impactos ambientales asociados.

## Introducción

El sector lechero en Uruguay está constituido por 3.718 establecimientos y un rodeo total de aproximadamente 780.000 vacas en ordeño. Si bien la producción lechera se encuentra distribuida en todo el país, existe una concentración de establecimientos en el sur, principalmente en los departamentos de San José, Colonia y Florida. Según datos del censo del 2011, el 73% de los tambos es de producción familiar (Sganga, 2012). Por su parte, se estima que hay 20.000 personas en el país vinculadas a este sector<sup>1</sup>.

La producción total de leche alcanzó en 2018 los 2.173 millones de litros (DIEA, 2019), de los cuales el 73 % fueron enviados a la industria para su procesamiento y producción de derivados. Aproximadamente, el 70 % de la producción es exportada a más de 60 países, siendo Argelia y Brasil los principales compradores en el 2018 (Pedemonte, 2019). En el 2019, el 9% de las exportaciones totales del país fueron productos lácteos, totalizando 674 millones de USD (DIEA, 2019). Cabe destacar que, de las regiones agropecuarias del país, la lechería solo ocupa el 2%, equivalente a 344.000 há y que es el sector de mayor ingreso por hectárea de exportaciones<sup>2</sup>.

Desde hace unos años, el sector atraviesa problemas de sostenibilidad provocados por la crisis económica global, el descenso de los precios internacionales y los altos costos de producción. Desde el 1987 la cantidad de remitentes se redujo en un 40% mientras que en el mismo lapso, los litros por día de leche remitidos por productor lechero aumentaron de 262 litros a 2.120 litros (Correa *et al*, 2016).

Estos procesos de concentración e intensificación de la producción deben contemplar los aspectos ambientales para evitar una serie de externalidades negativas. A su vez, las presiones nacionales e internacionales para el cumplimiento de normativas ambientales ha ido en aumento y los productores se enfrentan a nuevas exigencias del mercado definidas por las grandes cadenas de suministro y los consumidores en general. Dentro de esta coyuntura, el sector continúa analizando alternativas para mejorar su sostenibilidad y adecuarse a exigencias nacionales respecto a los modelos de producción y su impacto ambiental.

En este sentido, desde hace ya un tiempo se busca mejorar la gestión ambiental de los establecimientos lecheros con el fin de prevenir la contaminación de los cuerpos de agua (Gutiérrez y Cabrera, 2006; MVOTMA, 2015; Correa *et al*, 2016), así como la valorización de los residuos y aprovechamiento de los recursos presentes en estos.

El principal aspecto ambiental asociado a este sector son las excretas (estiércol y orina) de los animales durante el tiempo que estos se encuentran en las instalaciones de ordeño. Durante el lavado de las instalaciones, las excretas son arrastradas con agua y el efluente así generado es conducido al sistema de gestión de efluentes.

---

<sup>1</sup> Estimación INALE en base a Encuesta lechera del 2014 y el registro de industrias,

<sup>2</sup> Estimación INALE en base a datos del anuario estadístico 2019

De acuerdo a estudios realizados, el sector tambos es el tercer mayor generador de residuos del sector agroindustrial del país, alcanzando más de 72.000 ton/año de residuos generados expresadas en base seca (UGP Biovalor, 2016).

Los efluentes de tambo presentan elevadas cargas de materia orgánica y nutrientes, que si no son gestionados adecuadamente pueden causar importantes impactos ambientales como la emisión de Gases de Efecto Invernadero y la eutrofización<sup>3</sup> de cuerpos de agua.

A nivel general, este tipo de establecimientos cuenta con sistemas muy precarios para el control y tratamiento del efluente generado. Por distintas razones, estos no logran un desempeño adecuado y los elementos contaminantes son liberados al ambiente prácticamente sin ningún tipo de tratamiento. Si bien a través de la aplicación a campo es posible el aprovechamiento de los nutrientes en los cultivos, para que esto pueda realmente ser así, debe asegurarse que no existan descargas de los sistemas de acopio y respetarse las tasas de aplicación de acuerdo a los requerimientos de los cultivos donde es aplicado, ya que de otra forma los nutrientes pueden escurrir o infiltrarse causando eventos de contaminación en cuerpos de agua.

Las dificultades económicas coyunturales que atraviesa el sector, la escasez de controles y la falta de cultura para abordar los problemas ambientales vinculados a estas actividades, dificultan la adopción de estrategias de internalización de los aspectos ambientales en los procesos productivos. Es por ello que a partir de distintas políticas públicas se han desarrollado acciones para facilitar la búsqueda e incorporación de tecnología, que permita reducir la carga contaminante vertida por estos establecimientos y promueva la valorización de los residuos generados para obtener recursos beneficiosos para el propio establecimiento.

En este sentido, el Proyecto Biovalor, una iniciativa del gobierno uruguayo a través del Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM), el Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA, hoy Ministerio de Ambiente - MA) y el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP), ha impulsado diversas iniciativas para promover la valorización de residuos generados en sectores agroindustriales. En la búsqueda y desarrollo de alternativas de gestión y valorización de residuos, el Proyecto Biovalor realizó en el 2016 una convocatoria abierta a proyectos demostrativos interesados en implementar alguna de las alternativas tecnológicas promovidas con apoyo financiero no reembolsable (Proyecto Biovalor, s.f.).

En esta convocatoria fue seleccionada la propuesta de implementación de un proyecto de generación de energía eléctrica a partir de biogás en el establecimiento lechero Rincón de Albano A.A.R.L. Este proyecto se consideró de interés debido a la solución tecnológica propuesta de tratamiento y estabilización de un residuo para la generación de energía útil. Además, es fundamental poder contar con una unidad demostrativa de esta tecnología en este tipo de establecimiento, por el nivel de innovación y el potencial de replicabilidad. Si bien

---

<sup>3</sup> La eutrofización es la adición de nutrientes de forma masiva al suelo o a cuerpos de agua, que promueve el rápido crecimiento de biomasa, causando consumo y agotamiento del oxígeno por las bacterias que degradan la materia orgánica, lo que provoca serios efectos en la flora y fauna del cuerpo de agua.

existen algunas experiencias nacionales de plantas de biogás, ninguna de ellas en el sector tambos y a esa escala productiva.

Actualmente, la planta se encuentra instalada y en operación, generando energía eléctrica que es inyectada a la red nacional de transmisión. Este proyecto representa un caso exitoso de generación de energía eléctrica a partir de residuos en un establecimiento lechero en Uruguay, confirmando a esta tecnología como una alternativa para la adecuada gestión y valorización de los efluentes generados.

## **Objetivos del estudio**

### **Objetivo general**

El objetivo general del trabajo es la presentación del proyecto implementado en el establecimiento Rincón de Albano A.A.R.L., en el cual fue instalado un biodigestor para el tratamiento del efluente proveniente de la sala de ordeño y patio de espera (estiércol, orina, restos de alimento y agua) y un sistema de generación de energía eléctrica a partir del biogás producido.

Es de gran interés disponibilizar la información recopilada, su análisis y las lecciones aprendidas relacionadas al proyecto desarrollado, evaluando el potencial de replicación y promover la implementación de soluciones sostenibles en el contexto nacional.

### **Objetivos específicos**

Recopilar y procesar los datos de desempeño del sistema, para evaluar la eficiencia de valorización de los residuos. Además, a partir del procesamiento de la información se busca determinar los indicadores más adecuados para realizar el seguimiento y control de los parámetros del sistema que permitan identificar los aspectos de mayor significancia y sensibilidad, y analizar posibles medidas de mejora del desempeño.

Se estudian de forma particular los efectos de la temperatura en el desempeño del biodigestor y la producción de biogás, y los posibles procesos de inhibición por exceso de nitrógeno en el efluente, ya que estos han sido algunos de los aspectos de mayor preocupación e incertidumbre durante el desarrollo del proyecto.

Además, se estima la reducción del potencial de Calentamiento Global y Eutrofización asociado al proyecto, en relación a la situación previa al mismo.

Por último, se analiza la factibilidad económica del proyecto, evaluando la rentabilidad de la inversión en distintos escenarios para determinar bajo qué supuestos económicos es replicable esta tecnología.



## Marco teórico

### La digestión anaerobia como alternativa para el tratamiento y valorización de residuos de establecimientos lecheros

La digestión anaerobia es la descomposición de la materia orgánica a través de una asociación de microorganismos que actúan en ausencia de oxígeno. Como producto de esta descomposición se obtiene un gas combustible, mezcla de metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), un líquido degradado con menor carga orgánica y un sólido estabilizado (digestado).

La digestión anaerobia comprende múltiples procesos relacionados entre sí, que involucran distintas poblaciones de microorganismos. Las moléculas más complejas deben ser primero hidrolizadas en moléculas más sencillas (azúcares, ácidos grasos y aminoácidos), que en pasos subsiguientes se transforman en ácidos grasos volátiles (AGV), hidrógeno y dióxido de carbono; culminando con los procesos de metanogénesis a partir de ácido acético para la producción de  $\text{CH}_4$ . En presencia de altas cargas de sólidos, la hidrólisis del material particulado posee una importancia especial y puede comprender la etapa limitante del proceso.

El biogás producido es una mezcla gaseosa formada principalmente de metano (50 – 75 %) y dióxido de carbono (25 – 50 %), saturado en agua y que contiene trazas de otros gases ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$ , etc.). Este puede ser utilizado para la generación de calor, energía eléctrica o como combustible vehicular, de lo cual depende el nivel de purificación requerido.

Si bien existen otros materiales con mayor potencial de generación de biogás, como el estiércol de cerdos o el de gallina, es de interés evaluar el aprovechamiento del estiércol vacuno a través de sistemas de digestión anaerobia y producción de biogás, principalmente por los elevados volúmenes de residuos que son generados y la cantidad de establecimientos existentes. De acuerdo a estudios realizados, los establecimientos lecheros pastoriles no confinados generan en el entorno de 0,6  $\text{kg}_{\text{ST}}/\text{animal}\cdot\text{día}$  de estiércol recolectable en el lavado de las instalaciones, con un contenido de sólidos volátiles entre 45 y 75 % de los sólidos totales (UGP Biovalor, 2016). Por su parte, el potencial de metanización del estiércol vacuno se encuentra entre 130 y 330  $\text{L}_{\text{CH}_4}/\text{kg}_{\text{SV}}$  (FNR, 2010; BIOPROA, 2015).

El efluente procesado que se obtiene de la digestión anaerobia presenta menor carga orgánica y un mayor nivel de estabilización, que reduce las emisiones durante el almacenamiento del digestado, reduce el nivel de olores molestos, y mejora la calidad del efluente posibilitando su reutilización. Además, para aquellos establecimientos que apliquen a campo el efluente digestado, este presenta mejor eficiencia y biodisponibilidad a corto plazo de los nutrientes, a través de una mayor concentración de nitrógeno de acción rápida, fácilmente soluble y absorbible (FNR, 2010).

Existen distintas tecnologías posibles de biodigestores, dependiendo su selección principalmente de la escala de producción y la capacidad de inversión en este tipo de emprendimientos. A nivel regional, la tecnología de biodigestores más utilizada para el tratamiento de residuos del sector primario es la de lagunas cubiertas. Esta consiste en una laguna impermeabilizada y con una cubierta superior que permite captar y almacenar el biogás. Al ser muy difícil lograr una agitación efectiva en este tipo de biodigestores, realizada

generalmente mediante recirculación por bombeo en distintas zonas del biodigestor, la velocidad de digestión es relativamente baja. Es por esto que el sistema debe diseñarse para tiempos de retención hidráulicos entre 30 y 100 días, y tasas de carga de sólidos volátiles entre 0,1 y 1 /día·m<sup>3</sup> de biodigestor. Además, para evitar la acumulación de sólidos y la pérdida del volumen útil del biodigestor, el contenido de sólidos totales en el efluente bruto no debe ser mayor al 5 % (Varnero Moreno, M.T., 2011; FNR, 2010). Si bien se resigna rendimiento y se pierde capacidad de control del sistema, los menores costos de inversión necesarios, hacen a los biodigestores de laguna cubierta una tecnología adecuada para viabilizar proyectos de mediana escala en el medio rural con efluentes de baja carga.

### **Aprovechamiento del biogás para generación de energía eléctrica**

El aprovechamiento energético del biogás puede realizarse mediante la generación de energía eléctrica, energía térmica o incluso como combustible automotriz si es previamente purificado. Si bien la alternativa más eficiente y con menor inversión es el aprovechamiento térmico a través de quemadores, calderas u otro tipo de equipos, no todos los establecimientos productivos cuentan con un consumo de calor que pueda absorber toda la energía contenida en el biogás.

Por esta razón, la generación de energía eléctrica surge como única alternativa posible para el biogás. Su aprovechamiento se realiza mediante motores de combustión interna conectados a un alternador que genera energía eléctrica. Este sistema permite realizar co-generación de energía eléctrica y térmica, mediante el enfriamiento del motor y aprovechamiento térmico de los gases de combustión, para aprovechar el calor residual en la calefacción del propio biodigestor. La eficiencia energética global de estos equipos se encuentra entre el 80 y 90 % respecto a la energía contenida en el biogás, siendo la eficiencia en la generación eléctrica en el entorno del 30 % (Varnero Moreno, M.T., 2011; FNR, 2010).

Previo a su uso, el biogás crudo producido debe ser secado y desulfurizado para proteger los equipos utilizados de posibles problemas de corrosión. El secado puede realizarse mediante compresión y enfriado, o adsorción en carbón activado o sílica gel; mientras que la desulfurización puede realizarse por lavado con soluciones de soda, o por adsorción en carbón activado u óxido de hierro, o incluso por inyección de oxígeno en el depósito de biogás (Varnero Moreno, M.T., 2011).

### **Efecto de la temperatura en la generación de biogás**

Al igual que otros procesos microbiológicos, la digestión anaerobia es altamente dependiente de la temperatura. La velocidad de crecimiento de los microorganismos se incrementa al aumentar la temperatura, aumentando a su vez la velocidad de los procesos de digestión y la producción de biogás (Varnero Moreno, 2011; FNR, 2010). Además, los microorganismos involucrados son muy sensibles a las variaciones de temperaturas, por lo que es necesario mantener una temperatura homogénea en el biodigestor y evitar cambios bruscos que puedan desestabilizar el sistema (FNR, 2010).

Los digestores anaerobios son típicamente diseñados para ser operados en el rango mesofílico (20 – 45 °C), dado que a bajas temperaturas los microorganismos metanogénicos reducen considerablemente su actividad, incluso deteniéndose completamente a temperaturas por

debajo de los 4 °C. Mayores temperaturas permiten mayores cargas volumétricas de alimentación y menores tiempos de residencia, lo que posibilita contar con biodigestores de menores tamaños, aunque estos sistemas son muy sensibles a los cambios de temperatura por lo que requieren un mayor nivel de control (Safley - Westerman, 1992).

Se entiende de gran importancia poder contar con la relación entre la generación de biogás y la temperatura, ya que esto permite predecir el desempeño del sistema en función de la temperatura y evaluar el comportamiento en los meses de invierno.

A pesar de la importancia de la temperatura en la producción de biogás, no se ha encontrado mucha bibliografía internacional al respecto. Una de las referencias más importantes encontradas, corresponde al trabajo realizado por Safley y Westerman publicado en 1994, sobre estudios realizados en digestores anaerobios a escala de laboratorio alimentados con estiércol vacuno de establecimientos lecheros con cargas de 0,1 y 0,2 kg<sub>SV</sub>/m<sup>3</sup>·día en un rango de temperaturas entre 10 y 25 °C. De acuerdo a este estudio, la relación entre el potencial de generación de biogás y la temperatura, puede ser descripta según (Safley - Westerman, 1994):

$$\text{Alimentación } 0,1 \text{ kg}_{SV}/\text{m}^3\cdot\text{día} \quad \quad \quad \mathbf{B = 0,1153 + 0,0053 \cdot T} \quad \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\text{Alimentación } 0,2 \text{ kg}_{SV}/\text{m}^3\cdot\text{día} \quad \quad \quad \mathbf{B = 0,0820 + 0,0063 \cdot T} \quad \quad \text{Ecuación 2}$$

$$[B] = \frac{m_{CH_4}^3}{kg_{SV}} ; [T] = ^\circ C$$

### Inhibición por nitrógeno

Los compuestos orgánicos del sustrato liberan el nitrógeno en su descomposición, que se convierte en amoníaco (NH<sub>3</sub>) en equilibrio con su forma disuelta amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). Si bien el nitrógeno es un nutriente esencial para el crecimiento de los microorganismos de la digestión anaerobia, una alta concentración de amoníaco/amonio puede presentar un efecto inhibitorio sobre la metanogénesis y comprometer la generación de biogás. Es sabido que la especie causante del efecto inhibitorio corresponde al amoníaco, la cual predomina a valor de pH alcalinos (>7). Si bien los microorganismos pueden presentar una buena adaptabilidad al medio, la experiencia muestra que la inhibición del nitrógeno del proceso de biogás puede esperarse a una concentración total de nitrógeno amoniacal de 3.000-3.500 mg/L (FNR, 2010), dependiendo del pH y la temperatura.

### Descripción del caso de estudio

El establecimiento lechero Rincón de Albano A.A.R.L se ubica en Ruta Nº 45, km. 77, departamento de San José, Uruguay. Cuenta con un total de entre 450 y 500 vacas en ordeño asociadas a una sala de 30 órganos, donde se realizan 2 ordeños al día. Corresponde a un tambo de sistema pastoril (sistema no confinado), donde la producción de leche se remite en su totalidad a la industria láctea.

El residuo tratado es el efluente líquido generado en el lavado del corral de espera, la sala de ordeño y la playa de alimentación, que se componen básicamente de estiércol y orina que las vacas excretan durante el tiempo que se encuentran en las instalaciones.

El lavado del corral de espera y la playa de alimentación se realiza por inundación con el efluente recirculado de la laguna final de acopio, mientras que el lavado de la sala de ordeño se realiza con agua fresca de pozo. En total se utilizan 65 m<sup>3</sup>/día de agua de lavado.

**Figura 1. Lavado de las instalaciones.**



Fuente: Proyecto Biovalor

Por su parte, si bien la superficie de las instalaciones que realizan aportes de pluviales al sistema de efluentes alcanza los 4.500 m<sup>2</sup>, la operativa del sistema permite que, ante eventos importantes de precipitaciones, el sistema de bombeo de efluentes sea desactivado y los pluviales descargados por desborde directamente al sistema de lagunas. Dado que esta acción solo puede ser realizada de forma manual, no es realizada en todos los casos, por lo que parte de los pluviales ingresan indefectiblemente al biodigestor.

El sistema de gestión de efluentes anterior al proyecto se basaba en un sistema de retención pasiva de sólidos y el acopio del efluente en una laguna desde donde se tomaba para recirculación a los tanques de lavado de las instalaciones.

El proyecto implementado se compone de una primera unidad desarenadora, la cual fue adaptada a partir de la unidad existente, donde se separan por sedimentación (separación pasiva) los sólidos de mayor peso específico (arena, tierra, etc.). Estos podrían comprometer el correcto desempeño del resto de las unidades, por ejemplo, por abrasión de equipos mecánicos y pérdida de volumen útil del biodigestor. Este sedimentador se limpia con una frecuencia semanal o quincenal con pala mecánica mediante el retiro de los sólidos acumulados.

El efluente del desarenador ingresa a un pozo de bombeo, que cuenta con un agitador mecánico de paletas para mantener los sólidos en suspensión. Por medio de una bomba accionada por el nivel del pozo, se envía el efluente hacia un separador de sólidos del tipo filtro-prensa extrusora (separación mecánica), que separa principalmente la fibra más gruesa del estiércol, que al presentar muy baja degradabilidad, se acumularía en el biodigestor y reduciría su volumen útil. Todo este sistema se acciona de forma automática luego de cada lavado por el volumen del pozo de bombeo.

El sólido separado presenta un contenido de humedad relativamente bajo, el cual es tratado posteriormente por un proceso de compostaje que permite su reaprovechamiento como mejorador de suelos en las chacras del propio establecimiento. Por su parte, el efluente clarificado que sale del filtro-prensa, es conducido a través de otra unidad de separación de arena y enviado por gravedad hacia el biodigestor.

**Figura 2. Separador mecánico de sólidos y compostaje del sólido separado.**



Fuente: Proyecto Biovalor.

El biodigestor instalado es del tipo laguna cubierta y cuenta con una primera fosa de calefacción, que contiene un serpentín por donde circula el agua caliente proveniente de la refrigeración del motogenerador. El efluente pasa por desborde hacia el resto de la laguna donde se da la digestión anaerobia de la materia orgánica. El biodigestor presenta un tiempo de retención hidráulico de aproximadamente 35 días, suficiente para alcanzar la degradación del efluente y una recuperación adecuada de su potencial de metanización.



**Figura 3. Instalación y llenado del biodigestor.**



Fuente: Proyecto Biovalor

La agitación del contenido del biodigestor, se realiza mediante la recirculación por bombeo, por un lado del contenido de la fosa de calefacción y, por otro de la zona de digestión. Esta recirculación funciona de forma automática durante algunas horas al día, siendo necesaria para favorecer el contacto entre los microorganismos y la materia orgánica, y evitar la acumulación de sólidos y presencia de zonas muertas.

**Figura 4. Biodigestor en operación.**



Fuente: Proyecto Biovalor.

El efluente del biodigestor sale por desborde hacia una laguna de acopio, desde donde se toma por una bomba para el llenado de los tanques utilizados para el lavado de las instalaciones del establecimiento.

El biodigestor cuenta con un sistema de válvulas de seguridad, conectadas a una antorcha de encendido automático. En caso de producirse un aumento de la presión dentro del biodigestor, las válvulas se accionan y el biogás es desagotado a través de la antorcha.

**Figura 5. Válvulas de seguridad y antorcha.**



Fuente: Proyecto Biovalor.

El biogás producido en el sistema de biodigestión es deshumidificado y desulfurizado para poder ser utilizado en la generación de energía eléctrica mediante un motor generador. La generación de energía eléctrica se enmarca en el decreto de microgeneración (Decreto 173 del 2010 y posterior resolución del 2017), el cual permite a los suscriptores conectados a la red de distribución de baja tensión instalar generación de origen renovable con potencia instalada menor a 150 kW, intercambiando energía de forma bidireccional y remunerando la energía entregada al mismo precio del cargo de acuerdo a la tarifa contratada, siempre que la energía generada sea menor a la energía consumida en el balance anual.

El motogenerador instalado tiene una potencia de 70 kW en régimen continuo, siendo el consumo medio de biogás de 22 m<sup>3</sup>/h a plena carga. Dependiendo de la generación de biogás del sistema de biodigestión, será la cantidad de horas que el motor generador se encuentre operando. El sistema está diseñado para maximizar la generación durante las 4 horas de horario de punta del pliego tarifario (entre 18 y 22 hs) cuando el precio de la energía es mayor.

Como ya fue mencionado, el sistema cuenta con un sistema de intercambio de calor que refrigera el motor y aprovecha el calor residual de los humos de combustión para calentar agua, que es utilizada en el calentamiento del biodigestor a través de un circuito cerrado.

Figura 6. Sistema de purificación de biogás y motogenerador.



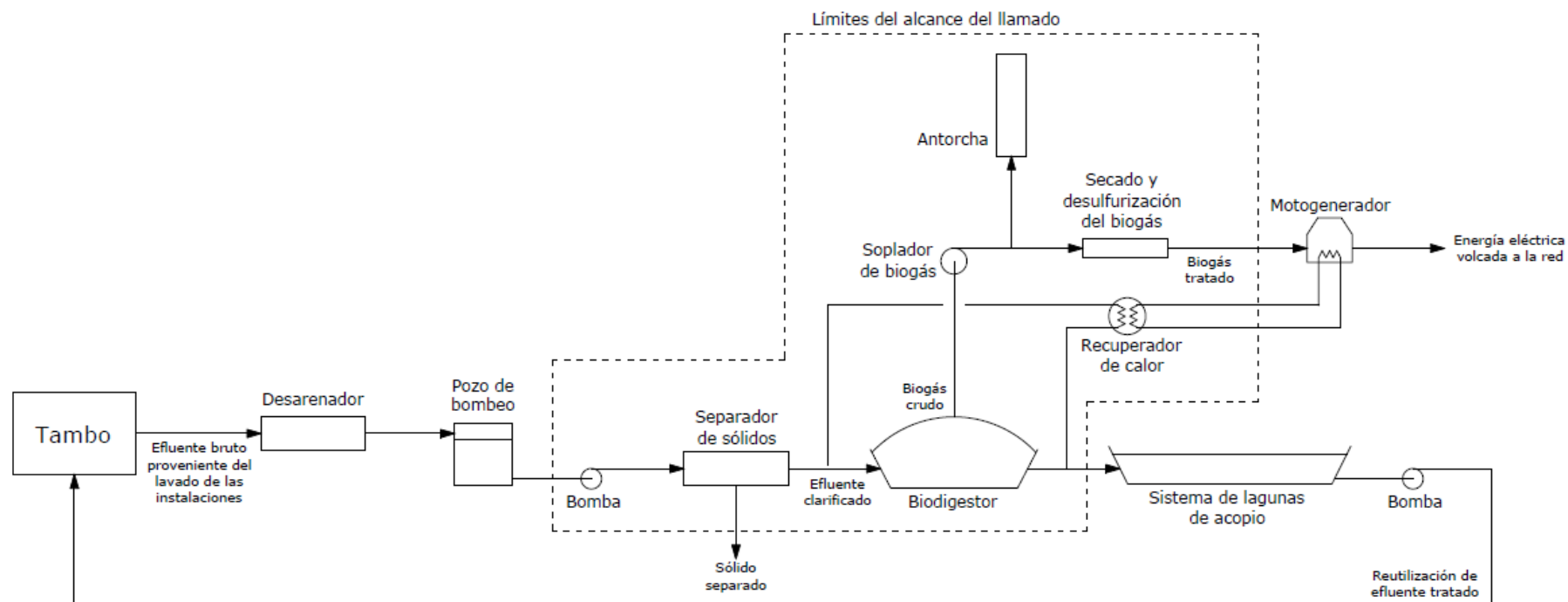
Fuente: Proyecto Biovalor.

La instalación del sistema comenzó en noviembre de 2017 con los trabajos de movimiento de tierra y obra civil, culminando el llenado e instalación de la cubierta superior del biodigestor en abril de 2018; mientras que en setiembre de 2019 culminó la habilitación y puesta en marcha del motor generador, comenzando la generación e inyección de energía a la red.

La inversión total alcanzó los 288.961 USD, de los cuales 110.000 USD fueron financiados por el Proyecto Biovalor.



Figura 7. Diagrama de flujos del sistema de digestión anaerobia y generación de energía eléctrica de Rincón de Albano.



Fuente: Proyecto Biovalor.

**Tabla 1. Características del sistema de digestión anaerobia y generación de energía eléctrica de Rincón de Albano.**

Nº de vacas en ordeño	500	
Nº de órganos operativos de sala de ordeño	30	
Producción media de leche por vaca	20	L/VO
Digestabilidad media de la dieta de los animales	60	%
Número de lotes de ordeño	2	
Número de ordeños por día	2	
Tiempo medio total de ordeño	100	min
Tiempo total en patio de alimentación	120	min
Consumo de agua fresca en el lavado de las instalaciones	10	m³/día
Consumo de efluente recirculado en el lavado de las instalaciones	55	m³/día
Generación total de efluentes	78	m³/día
Volumen útil biodigestor	2.250	m³
Tiempo de residencia	35	días
<b>Caracterización efluente de ingreso al biodigestor</b>	<b>Concentración</b>	<b>Carga</b>
DQO	8.235 mg/L	535 Kg/día
pH	7,7	
N total	529 mg <sub>N</sub> /L	34 Kg/día
N amoniacal	275 mg <sub>N-NH4</sub> /L	18 Kg/día
Nitratos	3,6 mg <sub>N-NO3</sub> /L	0,2 Kg/día
P total	99 mg <sub>P</sub> /L	6,5 Kg/día
Sólidos totales	9.697 mg/L	630 Kg/día
Sólidos totales volátiles	5.643 mg/L	367 Kg/día
Sólidos suspendidos totales	3.445 mg/L	224 Kg/día
Sólidos suspendidos volátiles	2.700 mg/L	176 Kg/día
<b>Caracterización efluente de egreso del biodigestor</b>	<b>Concentración</b>	<b>Carga</b>
DQO	3.564 mg/L	232 Kg/día
pH	7,0	
N total	465 mg <sub>N</sub> /L	30 Kg/día
N amoniacal	328 mg <sub>N-NH4</sub> /L	21 Kg/día
Nitratos	6,1 mg <sub>N-NO3</sub> /L	0,4 Kg/día
P total	97 mg <sub>P</sub> /L	6,3 Kg/día
Sólidos totales	5.786 mg/L	376 Kg/día
Sólidos totales volátiles	2.644 mg/L	172 Kg/día
Sólidos suspendidos totales	1.518 mg/L	99 Kg/día
Sólidos suspendidos volátiles	1.310 mg/L	85 Kg/día
Potencia del motogenerador	70	kW
Consumo de energía de los equipos del sistema	56	kWh/día

## Resultados

### Evaluación técnica

En la sección a continuación se detallan los resultados obtenidos de la evaluación técnica del sistema desde su puesta en operación. Para ello fue sistematizada toda la información registrada de los distintos parámetros operativos.

En la Tabla 2 se detallan los valores promedio de los indicadores determinados respecto al desempeño del sistema en cuanto a la remoción de contaminantes y producción de biogás.

**Tabla 2. Resumen de resultados e indicadores degradación de contaminantes y producción de biogás.**

Fuente: Elaboración propia a partir de la sistematización de la información registrada.

<b>Remoción contaminantes</b>		
DQO	55	%
Sólidos Totales	45	%
Sólidos Volátiles	53	%
<b>Carga del biodigestor</b>		
Por unidad de producción		
DQO	1,071	kg <sub>DQO</sub> /VO/día
Sólidos Totales	1,261	kg <sub>ST</sub> /VO/día
Sólidos Volátiles	0,734	kg <sub>SV</sub> /VO/día
Por volumen de biodigestor		
DQO	0,238	kg <sub>DQO</sub> /m <sup>3</sup> /día
Sólidos Totales	0,280	kg <sub>ST</sub> /m <sup>3</sup> /día
Sólidos Volátiles	0,163	kg <sub>SV</sub> /m <sup>3</sup> /día
<b>Generación de biogás</b>		
Generación media de biogás	125	m <sup>3</sup> /día
Concentración media de metano	71	%
Potencial de metanización por SV alimentado	0,242	m <sup>3</sup> <sub>CH<sub>4</sub></sub> /kg <sub>SV</sub>
Potencial de metanización por SV degradado	0,460	m <sup>3</sup> <sub>CH<sub>4</sub></sub> /kg <sub>SV</sub>
Generación de metano por volumen útil del biodigestor	0,039	m <sup>3</sup> <sub>CH<sub>4</sub></sub> /m <sup>3</sup>
Generación de metano por vaca en ordeño	0,177	m <sup>3</sup> <sub>CH<sub>4</sub></sub> /VO/día

VO: vacas en ordeño

Como puede observarse, el nivel de remoción de materia orgánica (DQO, sólidos volátiles) se encuentra en valores aceptables, dentro del rango esperable. No obstante, cabe aclarar que sólo fueron realizados 3 muestreos del efluente de entrada y salida del biodigestor, desde que este se encuentra en operación, y se ha podido observar un aumento en la degradación de materia orgánica con el tiempo. Esto se debe a que, con el tiempo, los microorganismos mejoran su adaptación al medio, aumentan en cantidad y mejora su actividad microbiológica, por lo que es esperable que estos niveles puedan seguir incrementándose a medida que el sistema continúe en funcionamiento.

Por otro lado, una forma de lograr mejorar el nivel de remoción de la materia orgánica, es aumentando el tiempo de retención hidráulico del biodigestor, y así permitir una mayor estadía del efluente dentro del biodigestor. Como se verá más adelante, esto podría realizarse

mediante la reducción del consumo de agua de lavado y evitando el ingreso de pluviales al sistema.

En cuanto a la tasa de carga del biodigestor, esta se encuentra dentro de valores adecuados. De acuerdo con referencias bibliográficas (Safley - Westerman, 1992), se han reportado buenos desempeños de sistemas de digestión anaerobia a baja temperatura para cargas entre 0,07 y 0,17 kg<sub>SV</sub>/m<sup>3</sup>/día.

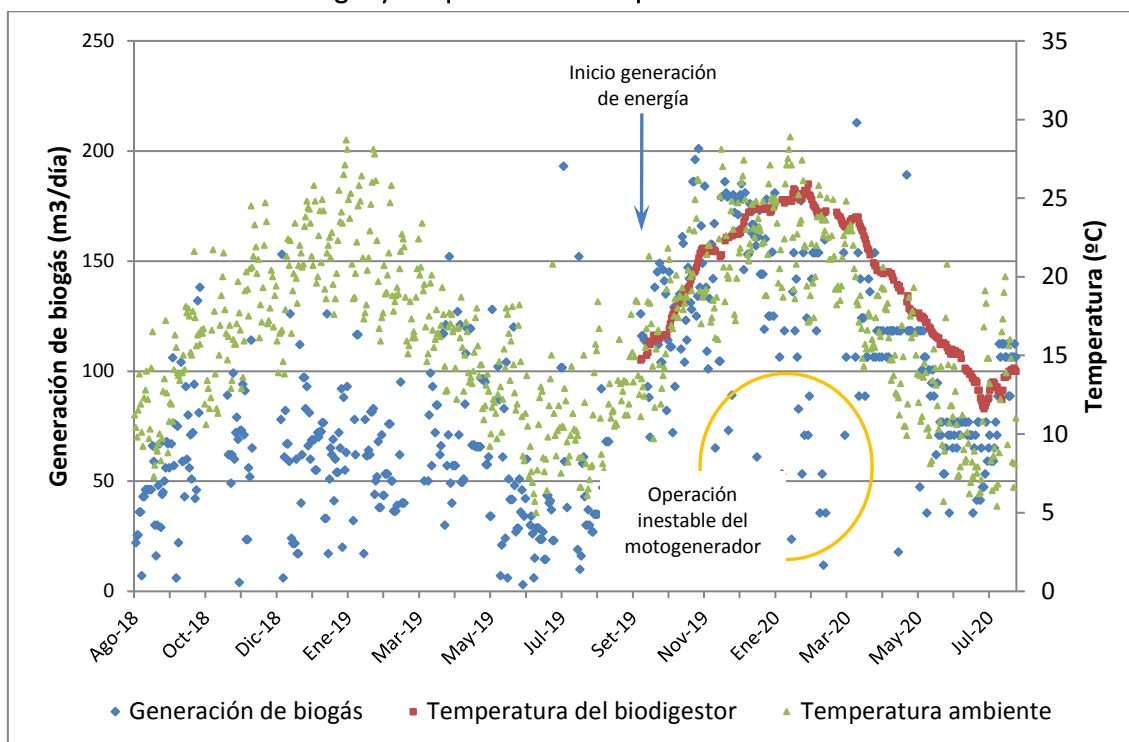
Un aspecto importante, que queda reflejado en los resultados de la caracterización de los efluentes indicada en la Tabla 2, es la disminución en el contenido de nitrógeno y fósforo entre la entrada y la salida del biodigestor. Esto puede deberse a la acumulación de sólidos, provocado por una mezcla no del todo efectiva del sistema.

Respecto a la generación de biogás, en el Gráfico 1 se muestra su evolución en el tiempo, junto a la temperatura media ambiente y la temperatura del biodigestor.

Cabe aclarar que hasta la puesta en marcha del motogenerador, la generación de biogás era medida mediante un contador previo a la descarga hacia la antorcha, por lo que representaba una medida suficientemente precisa de la generación. Una vez instalado el motogenerador, la generación de biogás es estimada a partir del consumo del motogenerador mediante un contador. Esta forma de estimación no es exacta, ya que aquellos días en que el motogenerador sufre desperfectos y no logra una operación estable, el biogás es venteado hacia la antorcha sin ser medido. Además, el 25/01/2020, el medidor de biogás dejó de funcionar sin volver a ser reparado, momento a partir del cual la generación de biogás es estimada mediante las horas de funcionamiento del motogenerador y el consumo horario del mismo.

De acuerdo a los datos registrados, la generación media de biogás es de 125 m<sup>3</sup>/día, con un contenido de 71 % de CH<sub>4</sub>. Por su parte, el potencial medio de metanización es de 0,242 m<sup>3</sup><sub>CH<sub>4</sub></sub>/kg<sub>SV</sub> alimentados, encontrándose dentro de los valores reportados en bibliografía para este tipo de sustrato (Safley - Westerman; FNR, 2010; BIOPROA, 2015). Es necesario señalar que para el cálculo de la generación media de biogás y, consecuentemente, del potencial de metanización, no fueron considerados los días identificados en que el motogenerador sufrió desperfectos y la generación de energía no se dio de forma estable, dado que es esperable que en estos días parte del biogás generado haya sido venteado a la atmósfera a través de la antorcha.

Gráfico 1. Generación de biogás y temperatura vs tiempo



Fuente: Elaboración propia.

En este gráfico se observa como la producción de biogás previo a la puesta en marcha del motogenerador es algo inferior comparada con los registros una vez iniciada la generación de energía. Esto se debe, por un lado, a que con el tiempo los microorganismos logran una mejor adaptación al medio y una mejor actividad microbiológica, y a que una vez puesto el motogenerador en funcionamiento, se comienza la calefacción del biodigestor mediante el agua de refrigeración del motor.

Por otro lado, se observa como la generación de biogás acompaña la variación de temperatura y cómo esta mantiene un comportamiento estable, amortiguando las oscilaciones de la temperatura ambiente. Este hecho es de gran importancia, ya que se evitan las variaciones bruscas de la temperatura, lo que sería perjudicial para el desempeño del biodigestor.

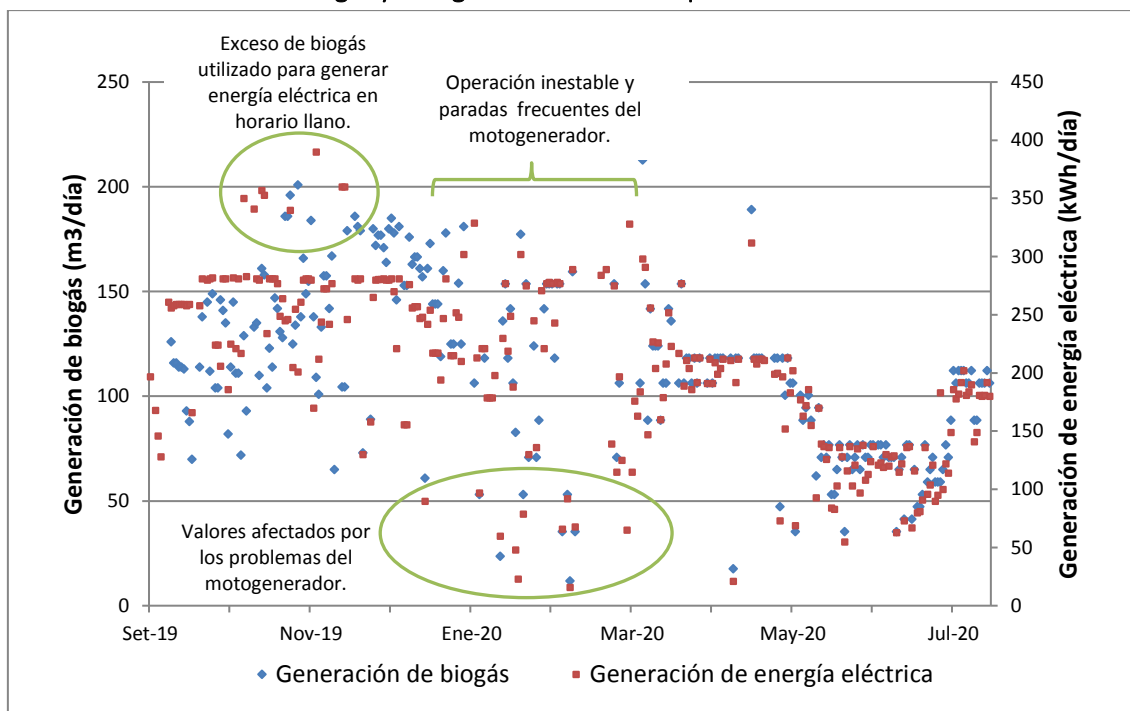
En el siguiente gráfico se muestra la generación de biogás y energía eléctrica, en la que se indican algunas zonas que merecen atención. Por un lado, se advierten algunos puntos donde existió exceso de biogás, correspondiente a tiempo con mayor temperatura, durante los cuales fue necesario generar energía en horario llano, adicional a la generada en horario punta.

Por otro lado, entre enero y febrero de 2020, el motogenerador sufrió diversas interrupciones en la generación debido a un problema relacionado con elevadas temperaturas del motor, que ocasionó que no se pudiera mantener en funcionamiento estable por las 4 horas previstas. Como ya fue explicado, el consumo de biogás en estos casos no representa la generación real de biogás, ya que en estos días seguramente parte del biogás se quemó en la antorcha.

En cuanto a la distribución de los puntos de generación de energía, se observa cómo estos se dan en escalones a determinados valores más o menos fijos. Esto se debe a que el sistema se ajusta para que funcione durante determinadas horas al día, dependiendo de la cantidad

disponible de biogás. Es así que para los meses más cálidos el sistema opera durante 4 horas, además del tiempo que eventualmente funcione adicionalmente en horario llano por contar con exceso de biogás; mientras que a medida que la temperatura ambiente desciende, el sistema se ajusta para operar menor cantidad de horas.

**Gráfico 2. Generación de biogás y energía eléctrica vs. tiempo.**

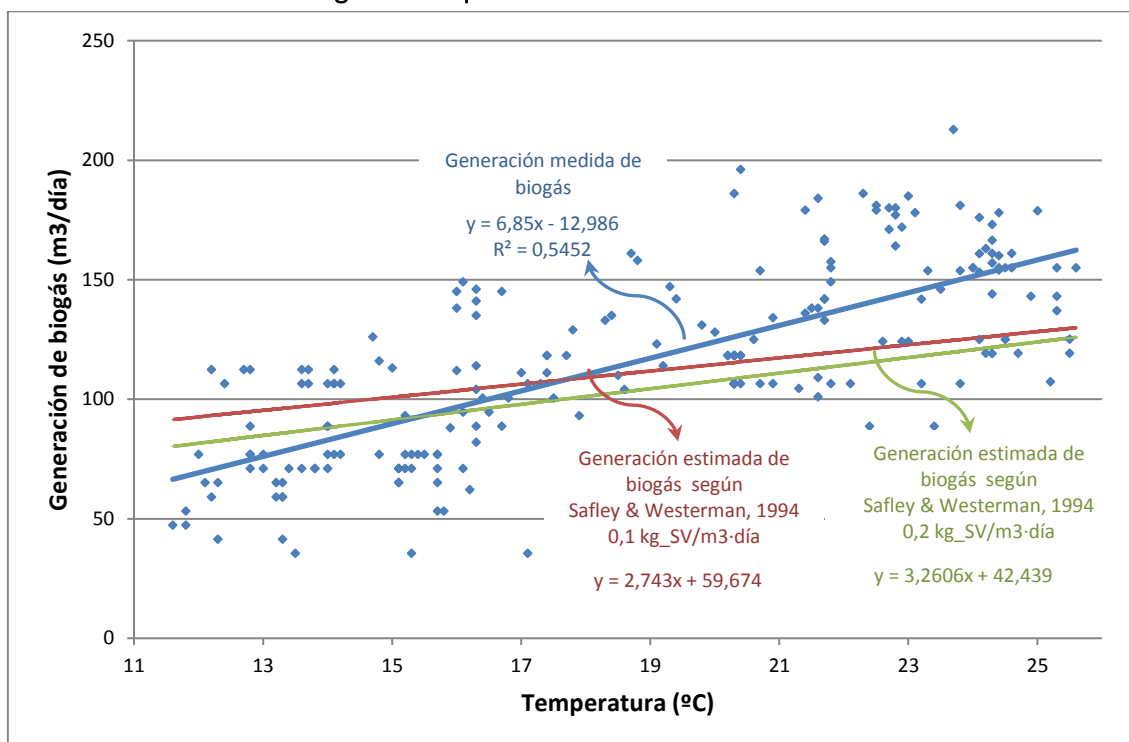


Fuente: elaboración propia.

En el siguiente gráfico se analiza el efecto de la temperatura en la generación y se comparan los resultados con datos de referencias. Para ello fueron descartados los datos de generación de biogás en aquellos días en los que se identificaron problemas de funcionamiento del motogenerador y la estimación corresponde a un sub-registro de la cantidad real de biogás generado.

Si bien fue trazada la línea de tendencia de la correlación entre generación de biogás y temperatura, cabe aclarar que debido a la forma de estimar la cantidad de biogás, que no necesariamente coincide con la generación real, y al poco tiempo de registros con los que se cuenta, es de esperar que este ajuste a la distribución de los datos no sea demasiado buena. Sin embargo, se considera especialmente importante poder contar con este tipo de análisis, para mejorar la predicción del comportamiento del sistema y la estimación del potencial de generación de energía durante los meses fríos.

Gráfico 3. Generación de biogás vs. temperatura.

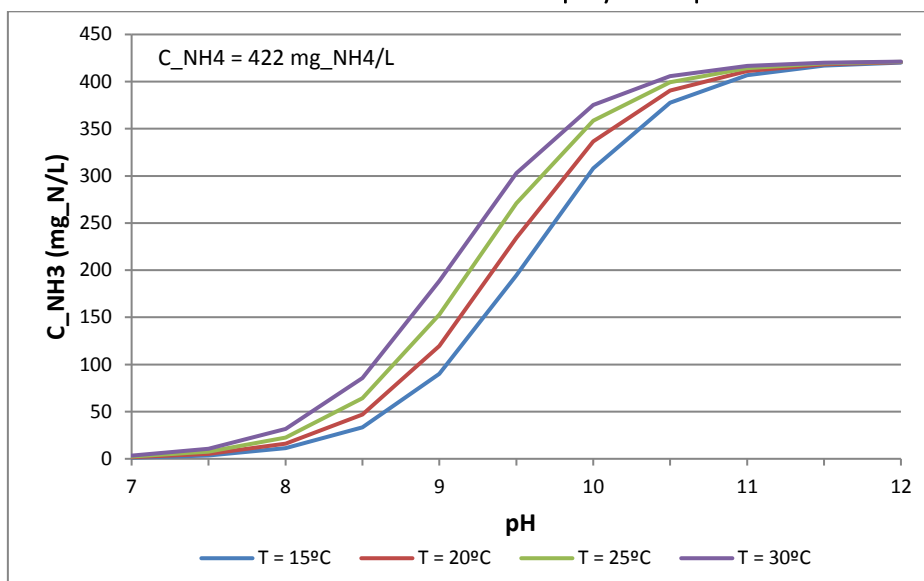


Fuente: elaboración propia.

Debido a la recirculación desde la laguna de acopio del efluente para el lavado de las instalaciones, otro aspecto que requiere ser evaluado es la posible inhibición por nitrógeno que pueda sufrir el sistema. Si bien existen pérdidas de nitrógeno, principalmente por distintos mecanismos de volatilización, el efluente puede concentrarse como consecuencia de la recirculación. De acuerdo a la caracterización del efluente de entrada y salida al biodigestor, la concentración de nitrógeno y el valor de pH no corresponden a niveles inhibitorios según referencias indicadas anteriormente. Debido a la falta de información de las características de algunos de los flujos del sistema, resulta muy difícil completar el balance de masa del sistema, que permita alcanzar mejores conclusiones al respecto.

En el gráfico a continuación, se muestra como varía la concentración de amoníaco con el pH y la temperatura, partiendo de la concentración medida de amonio determinada en el efluente.

Gráfico 4. Concentración de NH<sub>3</sub> en función del pH y la temperatura.

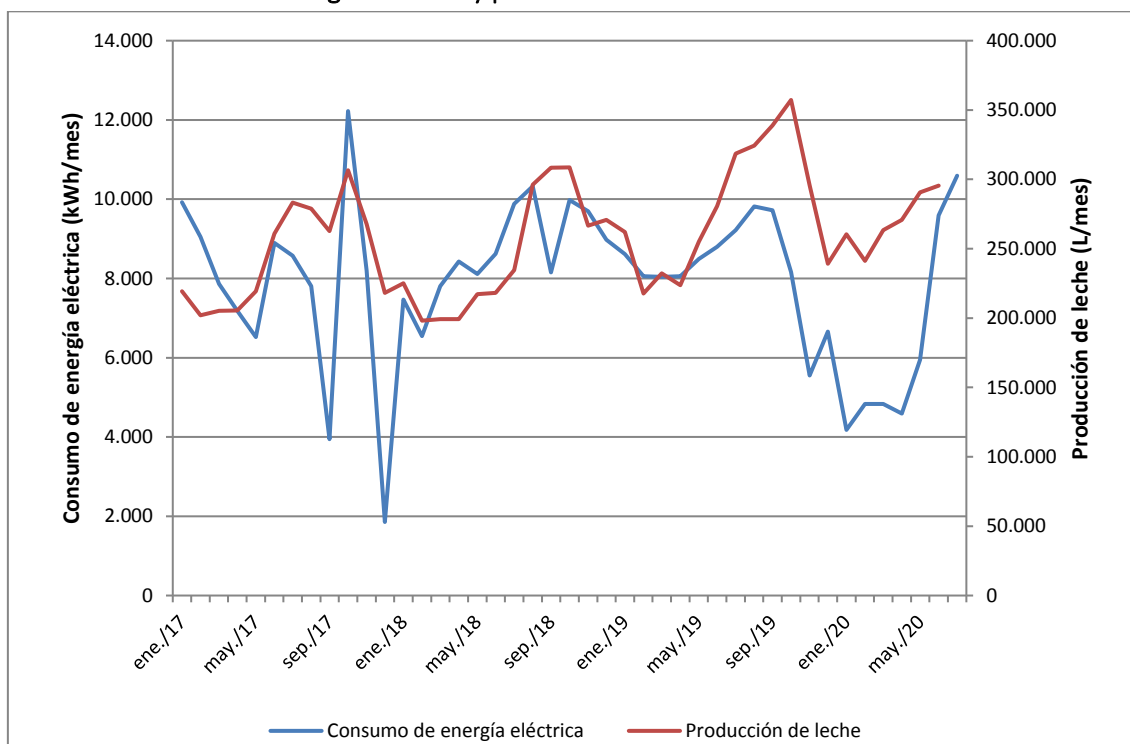


Fuente: elaboración propia a partir de FNR, 2010.

En cuanto a los aspectos energéticos derivados del proyecto, vale comenzar evaluando como es el consumo de energía en el establecimiento y como varía de acuerdo a la producción. En el siguiente gráfico se muestra el consumo histórico mensual de energía eléctrica de la red junto a la producción de leche, donde se observa una clara relación entre ambas variables previo a la puesta en funcionamiento del motogenerador. Esta relación se explica por ser el equipo de ordeño y el tanque de frío los mayores consumos de energía del establecimiento, y ser estos proporcionales a la producción.



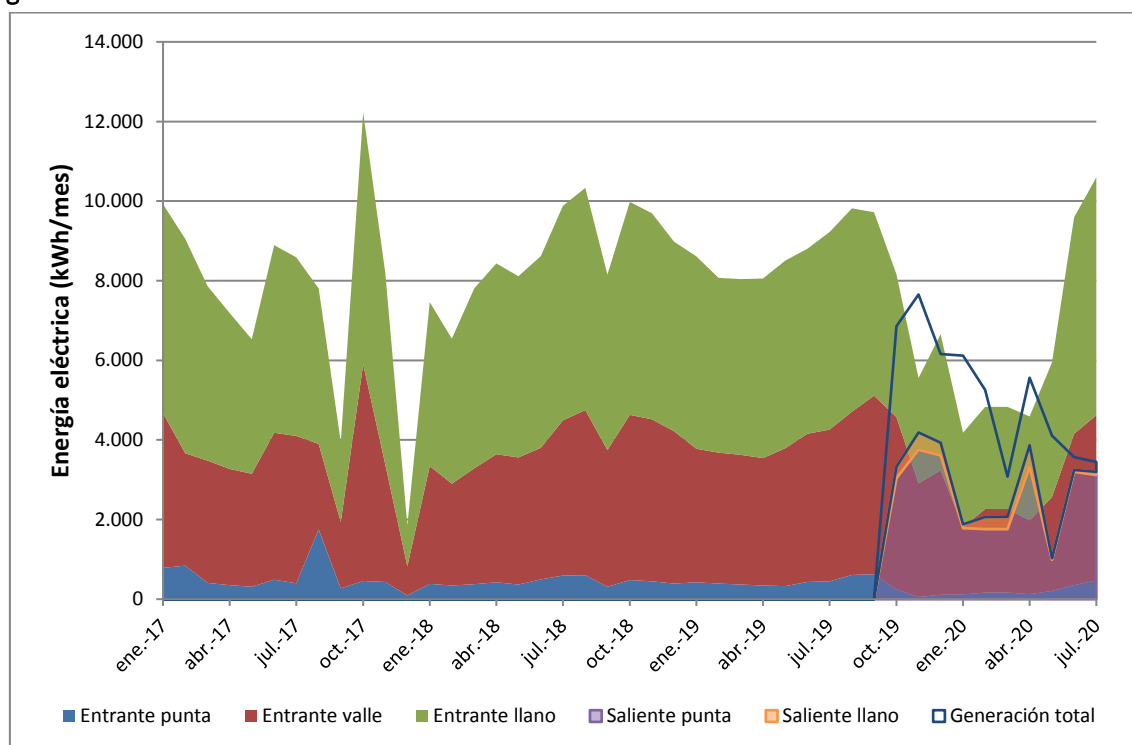
Gráfico 5. Consumo de energía eléctrica y producción de leche.



Fuente: elaboración propia, a partir de datos de UTE y datos de producción.

En el siguiente gráfico se presenta la energía de la red entrante y saliente al establecimiento diferenciados según los horarios del pliego tarifario, así como la energía total generada por el sistema; mientras que en la tabla a continuación se indican los valores promedio y los ahorros producidos por la generación de energía por el sistema respecto a distintos períodos previos.

Gráfico 6. Energía eléctrica entrante y saliente, según horario del pliego tarifario, y total generada.



Fuente: elaboración propia, a partir de datos de UTE y medidas del motogenerador.

Tabla 3. Valores promedio de energía entrante y saliente a la red, y energía total generada.

	Energía eléctrica entrante de la red (kWh/mes)				Energía eléctrica saliente de la red (kWh/mes)				Generación total de energía eléctrica por el sistema (kWh/mes)
	Punta	Valle	Llano	Total	Punta	Valle	Llano	Total	
Promedio 2017	550	2.989	4.132	7.670					
Promedio 2018	434	3.474	4.759	8.666					
Promedio Ene-Set 2019 (con biodigestor)	442	3.633	4.686	8.759					
Promedio Oct-19 - Jun-20 (con generación eléctrica)	170	2.691	3.177	6.039	2.578	0	267	2.880	5.373
<b>Ahorro por implementación del sistema (Promedio Oct-19 - Jul-20)</b>									
Respecto 2017	380	298	955	1.631					
Respecto 2018	264	783	1.582	2.627					
Respecto Ene-Set 2019	272	942	1.509	2.720					

Fuente: elaboración propia.

Aquí se observa cómo históricamente el consumo de energía se concentra en los horarios de valle y llano. Por su parte, la generación de energía por el sistema se realiza de forma prácticamente exclusiva en horario punta, con el objetivo de maximizar los beneficios económicos.

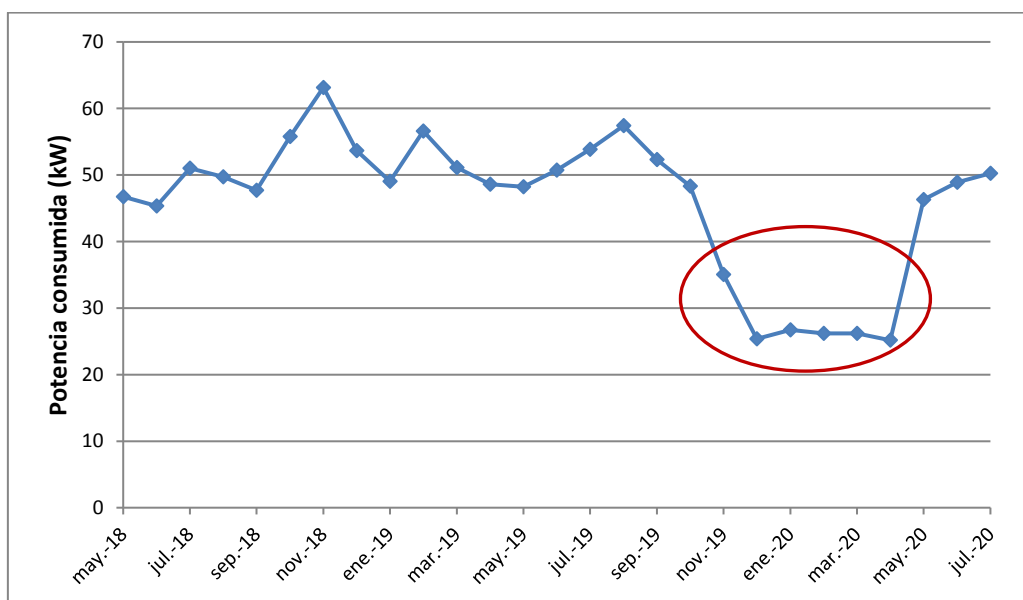
Desde del comienzo de la generación e inyección a la red (octubre 2019), el consumo de energía de la red sufre un drástico descenso, que luego vuelve a aumentar a partir de mayo 2020.

Si bien en algunos casos puntuales, existió generación fuera del horario punta (por ejemplo, durante las pruebas de puesta en marcha del motogenerador, o por contar con exceso de biogás), el descenso en el consumo de energía de la red y el ahorro registrado en horarios valle y llano, no puede ser atribuido a la generación. Cabe aclarar que, de acuerdo a afirmaciones del propietario del establecimiento, no existieron otros cambios a nivel de producción que justifiquen estas observaciones.

Lo esperable en este tipo de sistema es que se mantenga incambiado el consumo en horario valle y llano, desplazar en su totalidad el poco consumo de la red en horario punta e inyectar a la red el resto de la energía sobrante generada. En este sentido, también resulta llamativa la diferencia observada entre la energía generada, medida en el contador del motogenerador, con los registros de energía saliente a la red.

Otro aspecto que evidencia la ocurrencia de algún tipo de anomalía en las medidas, es la potencia consumida de la red, la cual se muestra en el Gráfico 7. Aquí también se constata un brusco descenso a partir del comienzo de la generación. En la forma que es medida la potencia consumida por parte de UTE, la cual se establece como la potencia instantánea máxima registrada en cualquier momento del mes, no es posible que dicha potencia haya sido suministrada por el sistema de generación, ya que existieron días en que no hubo generación por desperfectos en el motogenerador, además de que seguramente el máximo consumo de potencia se dé en horario valle o llano, cuando el sistema de generación de energía no está operativo.

**Gráfico 7. Potencia consumida de la red.**

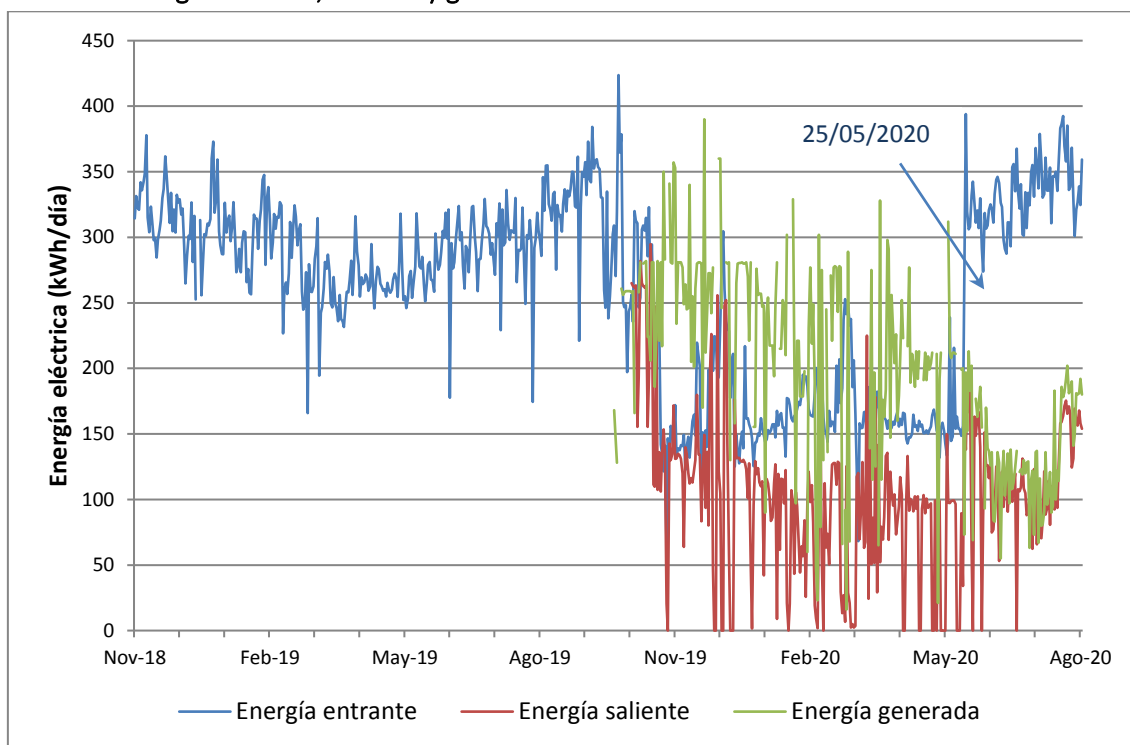


Fuente: elaboración propia a partir de datos de UTE.

Todas estas observaciones realizadas, evidencian a algún tipo de problema en la medida en los intercambios de energía, que comienzan con el cambio del contador de energía de UTE por uno bidireccional y el inicio de las operaciones del motogenerador. La situación parece haberse corregido a partir del 25 de mayo de 2020, que coincide con la visita de técnicos de UTE al establecimiento respondiendo a un reclamo por las inconsistencias observadas. Si bien, los técnicos de UTE no identificaron ningún problema, algo parece haber sido modificado que

restableció el sistema de medida y corrigió los registros desde entonces. Esto se verifica claramente en el siguiente gráfico que indica en base diaria el intercambio de energía con la red y la generación. A partir de la fecha indicada, se comprueba un importante aumento en la energía entrante, a valores muy similares a la situación previa al comienzo de la generación, y se observa como la energía saliente se aproxima hasta prácticamente igualarse con la generación.

**Gráfico 8. Energía entrante, saliente y generada en base diaria.**



Fuente: elaboración propia a partir de datos de UTE.

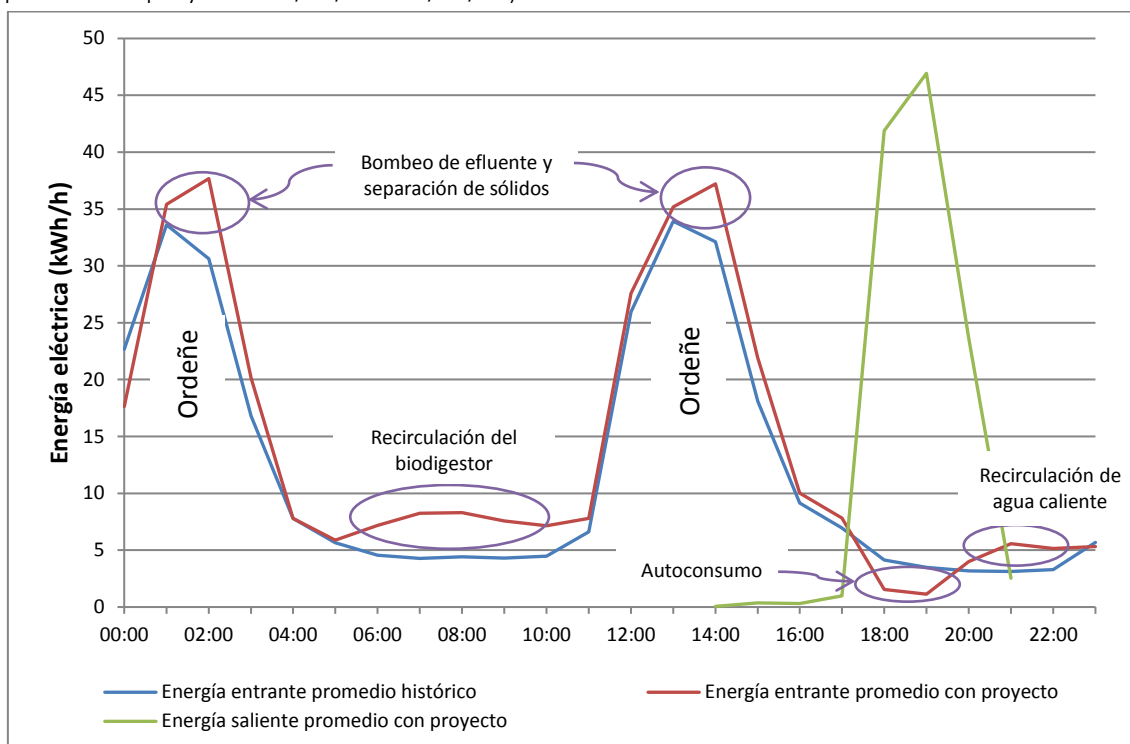
Por las razones expuestas, el balance de energía y los indicadores de desempeño serán determinados a partir del 25 de mayo de 2020. Lamentablemente, de esta forma no se estaría considerando el período de mayor generación correspondiente a las mayores temperaturas. Desde ese día, al estar limitado en la cantidad de biogás disponible, solo se ha podido generar energía entre 2 y 3 horas al día.

De acuerdo a los registros realizados hasta el momento, la generación de energía eléctrica medida en el motogenerador, alcanzó un promedio de 5.373 kWh/día con una eficiencia de generación de 26 % respecto a la energía contenida en el biogás. Debido a los problemas ya mencionados en relación a los subregistros en las medidas de energía entrante y saliente, no es posible comparar este valor con la energía inyectada a la red.

Si se considera el período posterior al 25 de mayo de 2020, la generación promedio de energía eléctrica fue de 135kWh/día, con una media de generación diaria de 2,2 horas y sólo el 4 % de los días del período considerado sin generación por desperfectos en el sistema u otros inconvenientes. Por su parte, la inyección promedio de energía eléctrica a la red alcanzó los 116 kWh/día, lo que representa el 86 % de la energía generada y el 35 % de la energía consumida de la red.

En la gráfica a continuación se muestra la energía entrante histórica promedio en base horaria, previo a la puesta en funcionamiento del sistema, y la energía entrante y saliente con el sistema operando. De esta manera, se observa cómo ha cambiado el perfil de consumo de energía por la implementación del proyecto.

**Gráfico 9. Energía entrante promedio previa al proyecto, y energía entrante y saliente promedio con el proyecto, en base horaria.** (Período previo al proyecto: 15/09/18 - 31/08/19; Período posterior al proyecto: 25/05/20 - 07/07/20)



Fuente: elaboración propia a partir de datos de UTE.

Por un lado se advierte un aumento del consumo de energía luego de cada ordeño de aproximadamente 1 hora cada vez, atribuible a la operación de bombeo del efluente y operación del separador de sólidos; un aumento entre las 05:00 y 11:00 h. producto de la recirculación por bombeo del biodigestor; y un aumento en el consumo luego de la generación de energía eléctrica entre 20:00 y 23:00 h, posiblemente debido a la recirculación de agua caliente. Por otro lado, se observa una reducción en el consumo de 17:00 a 20:00 h, durante la generación debido al autoconsumo de la energía generada. Ocultos en esta disminución observada, también se da el consumo de energía del soplador y el sistema de purificación de biogás, y en la recirculación de agua caliente, que continúa tiempo después de culminar la generación, como ya fue mencionado. El consumo de los equipos del sistema se puede determinar mediante la diferencia de las áreas bajo las curvas del consumo histórico y posterior al proyecto. Es posible estimar el consumo total de la recirculación de agua caliente, asumiendo que el consumo posterior a la generación durante 3 horas, se realiza en un total de 5 horas. Por su parte, el consumo del soplador y del sistema de purificación, se estima mediante la potencia nominal y el tiempo de funcionamiento. A continuación se presentan los resultados obtenidos.

**Tabla 4. Consumo de energía eléctrica de los equipos asociados al sistema.**

Bombeo efluente + agitador + separador de sólidos	7,6 kWh/día
Bombeo recirculación biodigestor	17,2 kWh/día
Bombeo recirculación de agua caliente	7,6 kWh/día
Soplador y purificación	3,8 kWh/día
<b>Total</b>	<b>36,1 kWh/día</b>

Fuente: elaboración propia a partir de la diferencia del área bajo las curvas del consumo histórico y posterior al proyecto del Gráfico 9, y estimación del consumo del soplador y del sistema de purificación en base a la potencia nominal y el tiempo de funcionamiento.

Por otro lado, el autoconsumo de la energía generada en el propio establecimiento puede determinarse mediante la diferencia de las áreas bajo la curvas del consumo histórico y posterior al proyecto en el horario en punta que se inyecta la energía eléctrica en la red. A esta diferencia es necesario sumarle los consumos de los equipos del sistema que funcionan durante la generación. De esta manera, se obtienen de forma separada los consumos de los equipos del sistema (en punta, llano y valle) y el autoconsumo de energía (en punta) en las operaciones del establecimiento.

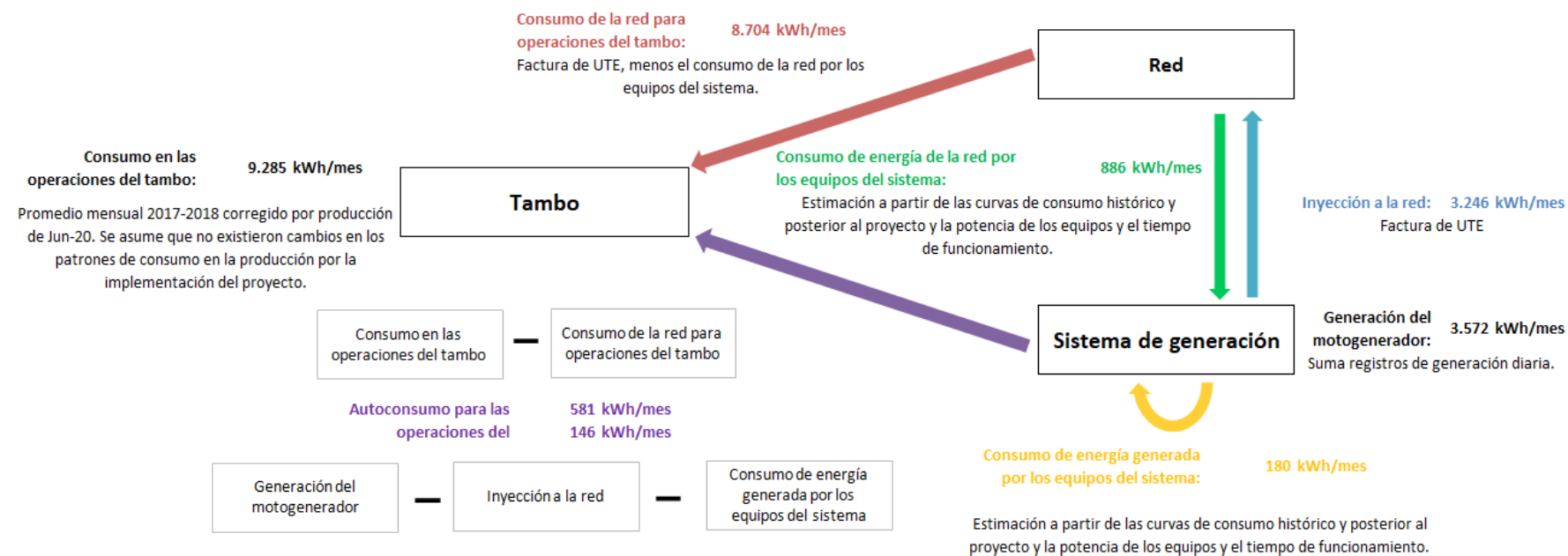
El autoconsumo promedio de la energía generada por las operaciones del propio establecimiento alcanzan los 10,9 kWh/día, representando el 8 % de la energía generada. La determinación del autoconsumo es de gran importancia, ya que significa un ahorro o ingreso de energía por la implementación del proyecto.

A partir de estos datos determinados, es posible establecer el balance de energía del sistema y evaluar la coherencia de los supuestos realizados y los valores estimados. El siguiente diagrama muestra el balance de energía para el mes de junio de 2020.

Así planteado, el balance permite determinar el autoconsumo de energía por las operaciones del tambo de dos formas. Por un lado, a partir del consumo histórico de las operaciones del tambo y asumiendo que estas no han sufrido modificaciones, y la energía entrante de la red de UTE, descontando el consumo de energía de los equipos del sistema fuera del horario de generación. Por otro lado, en base a la energía generada por el motogenerador, la energía saliente inyectada a la red y el consumo de los equipos del sistema durante la generación.

Si bien el balance cierra en valores distintos de autoconsumo para las dos formas que este es calculado, los valores determinados son coherentes con los resultados obtenidos anteriormente.

Figura 8. Balance de energía del sistema para el mes de Junio 2020.



Fuente: elaboración propia.

A partir del análisis realizado sobre la experiencia de los aspectos operativos del sistema, es posible estimar una proyección de la generación durante todo el año. Para ello se supone una distribución a lo largo del año de las horas al día que funciona el motogenerador, la cual varía de acuerdo a la temperatura ambiente. La energía inyectada a la red se determina asumiendo que la relación respecto a la energía generada permanece constante. Por su parte, se asume que el autoconsumo es también constante, e igual al valor determinado. A este balance es necesario descontar el consumo de energía de la red de los equipos del sistema, la cual se considera que se divide en proporciones iguales en horario valle y llano, y constante a lo largo del año.

A partir de estas estimaciones, es posible determinar los ingresos económicos de acuerdo al pliego tarifario vigente (ajustado al 01/04/2020), considerando que si la cantidad de horas es menor o igual a 4, estas se dan en horario punta, y si es mayor, el resto se da en horario llano. En la Tabla 5 se muestra el resumen de los resultados obtenidos, considerando que el sistema funciona correctamente durante 25 días al mes, lo que totalizaría una operación de 300 días al año. A partir de estos resultados se realiza la evaluación económica del proyecto.

Por su parte, en la Tabla 6 se indican los valores de proyección de la generación y los ingresos asociados que podrían obtenerse al adoptar medidas de mejora del desempeño y optimización de la operación. Además de esperar una mejora vinculada a una mayor actividad microbiológica por una mejor adaptación al medio por parte de los microorganismos, es posible implementar algunas medidas que mejorarían la generación de biogás, especialmente en invierno, de forma de lograr un mayor tiempo de funcionamiento del motogenerador. Entre estas medidas, se encuentra la reducción del consumo de agua en el lavado de las instalaciones, mediante el ajuste del volumen de llenado de los tanques de lavado, o desvío efectivo de las aguas pluviales. Estas medidas aumentarían el tiempo de retención hidráulico del biodigestor, lo que podría compensar las bajas temperaturas en invierno. También es posible aumentar la carga de materia orgánica al biodigestor, mediante la incorporación de residuos de otros establecimientos cercanos. Si bien la proyección en el escenario de mejora del desempeño se basa en suposiciones, se considera con altas probabilidades de ser alcanzado.



**Tabla 5. Proyección de la generación de energía e ingresos económicos asociados a lo largo del año.**

Fuente: elaboración propia.

Mes	Horas de funcionamiento del generador (h/día)	Generación mensual (kWh)	Consumo de la red de los equipos del sistema (kWh)	Autoconsumo (kWh)	Inyección a la red (kWh)	Costo consumo de la red de los equipos del sistema (UYU)	Ahorro por autoconsumo (UYU)	Ingresos por inyección (UYU)	Ingresos netos totales (UYU)
Enero	4,3	6.946	886	327	5.970	2.904	3.349	58.813	59.258
Febrero	4,3	6.946	886	327	5.970	2.904	3.349	58.813	59.258
Marzo	4	6.461	886	327	5.554	2.904	3.349	56.935	57.380
Abril	3,4	5.492	886	327	4.721	2.904	3.349	48.395	48.840
Mayo	3	4.846	886	327	4.165	2.904	3.349	42.702	43.147
Junio	2	3.231	886	327	2.777	2.904	3.349	28.468	28.913
Julio	2	3.231	886	327	2.777	2.904	3.349	28.468	28.913
Agosto	2	3.231	886	327	2.777	2.904	3.349	28.468	28.913
Setiembre	3,4	5.492	886	327	4.721	2.904	3.349	48.395	48.840
Octubre	4	6.461	886	327	5.554	2.904	3.349	56.935	57.380
Noviembre	4	6.461	886	327	5.554	2.904	3.349	56.935	57.380
Diciembre	4,3	6.946	886	327	5.970	2.904	3.349	58.813	59.258
<b>Total año</b>		<b>65.745</b>	<b>10.631</b>	<b>3.920</b>	<b>56.508</b>	<b>34.844</b>	<b>40.185</b>	<b>572.139</b>	<b>577.479</b>

Tabla 6. Proyección de la generación de energía e ingresos económicos asociados a lo largo del año, adoptando medidas de mejoras en el desempeño del sistema.

Fuente: elaboración propia.

Mes	Horas de funcionamiento del generador (h/día)	Generación mensual (kWh)	Consumo de la red de los equipos del sistema (kWh)	Autoconsumo (kWh)	Inyección a la red (kWh)	Costo consumo de la red de los equipos del sistema (UYU)	Ahorro por autoconsumo (UYU)	Ingresos por inyección (UYU)	Ingresos netos totales (UYU)
Enero	5	8.077	886	327	6.942	2.904	3.349	63.193	63.638
Febrero	5	8.077	886	327	6.942	2.904	3.349	63.193	63.638
Marzo	4	6.461	886	327	5.554	2.904	3.349	56.935	57.380
Abril	4	6.461	886	327	5.554	2.904	3.349	56.935	57.380
Mayo	3,5	5.654	886	327	4.859	2.904	3.349	49.818	50.263
Junio	3	4.846	886	327	4.165	2.904	3.349	42.702	43.147
Julio	3	4.846	886	327	4.165	2.904	3.349	42.702	43.147
Agosto	3	4.846	886	327	4.165	2.904	3.349	42.702	43.147
Setiembre	3,5	5.654	886	327	4.859	2.904	3.349	49.818	50.263
Octubre	4	6.461	886	327	5.554	2.904	3.349	56.935	57.380
Noviembre	4	6.461	886	327	5.554	2.904	3.349	56.935	57.380
Diciembre	5	8.077	886	327	6.942	2.904	3.349	63.193	63.638
<b>Total año</b>		<b>75.922</b>	<b>10.631</b>	<b>3.920</b>	<b>65.255</b>	<b>34.844</b>	<b>40.185</b>	<b>645.061</b>	<b>650.402</b>

Si bien el compostaje de los sólidos separados del efluente, es una práctica que era realizada con anterioridad a la implementación del proyecto, es posible decir que la instalación del separador mecánico de sólidos facilita mucho la operativa, al lograr un sólido con menor contenido de humedad y libre de materiales inertes, y permite alcanzar un compost de mejor calidad. Es por esto que será incluido en el análisis como parte del proyecto.

De acuerdo a los registros realizados, la generación semanal de sólidos alcanza los 6 m<sup>3</sup>, con una humedad promedio del 75 %. Este sólido es procesado por compostaje en pilas, para la producción de aproximadamente 180 m<sup>3</sup> de compost al año, con una composición media de N:P:K de 0,95:0,42:0,62 %. Debido al bajo contenido de fósforo, el compost producido es enriquecido con 5 ton/año de fosforita, para ser luego aplicado a campo en una superficie de 70 há.

Conforme a lo manifestado por el propietario del establecimiento, la aplicación de compost enriquecido ha sustituido por completo la aplicación de fertilizantes de fosfato diamónico y cloruro de potasio en una dosis de 150 y 200 kg/há/año, respectivamente.

Por último, se determinan la reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) alcanzadas por la implementación del proyecto, respecto a la situación previa o línea de base. Este indicador, puede ser visto como una medida de la mejora en la gestión de los efluentes y residuos, y como un indicador que puede ser utilizado en una eventual diferenciación del producto. Para su determinación se utilizan las directrices del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático, que establece una metodología consensuada internacionalmente para estos cálculos (IPCC, 2006)

Principalmente, la reducción de emisiones de GEI se da por evitar en gran medida la descomposición anaerobia en la laguna final de acopio del efluente de lavado, al llegar a ésta, un efluente con una carga considerablemente menor. Teniendo en cuenta la caracterización de los efluentes indicada anteriormente, se asume que el efluente que llegaba a la laguna de acopio en el escenario de línea de base es igual a lo que ingresa al biodigestor, es decir una carga media de sólidos volátiles de 367 kg/día; mientras que en el escenario de proyecto corresponde a la salida del biodigestor, es decir 172 kg/día. Asumiendo que la laguna presenta condiciones anaeróbicas, se considera un factor de conversión de metano de 76 % para una temperatura media de 17 °C (IPCC, 2006). El potencial de metanización máximo para este tipo de residuos es de 300 L<sub>CH<sub>4</sub></sub>/kg<sub>SV</sub> (BIOPROA, 2015). Se asume un valor para el Potencial de Calentamiento Global para un horizonte de 100 años de 21 para el CH<sub>4</sub>, de acuerdo al segundo reporte técnico de evaluación del IPCC (Second Assessment Report of the IPCC, SAR).

Por su parte, para estimar la reducción de emisiones causada por la sustitución de la energía eléctrica de la red, se considera la proyección de inyección y ahorro de energía del proyecto que alcanza los 60.428kWh/año, según lo indicado en la Tabla 5. De acuerdo a los datos del Balance Energético Nacional<sup>4</sup>, factor de emisión promedio de los últimos años (2016 – 2018), es de 0,022 kg<sub>CO<sub>2</sub>eq</sub>/kWh. Cabe mencionar que, si bien se adoptó el valor promedio del factor de

---

<sup>4</sup><https://ben.miem.gub.uy/index.html>

emisión de la matriz eléctrica, al ser la energía sustituida la correspondiente al horario de punta, es esperable que el factor de emisión correspondiente a esta energía sea mayor, ya que es en este rango horario que se da la generación eléctrica a partir de fuentes fósiles.

En cuanto a la reducción de emisiones debido al proceso de compostaje del sólido separado, se asume que en el escenario de línea de base el sólido era simplemente acopiado en pilas sin ningún tipo de control de proceso, por lo que se daba una mayor descomposición anaerobia de la materia orgánica y generación de CH<sub>4</sub>. Además, se asume que el material que se producía no presentaba la calidad necesaria para sustituir efectivamente el uso de fertilizantes químicos.

De esta manera, para el acopio en pilas se considera un factor de emisión de metano de 4 % y un factor de emisión directa de óxido nitroso de 0,005 kg<sub>N<sub>2</sub>O-N</sub>/kg<sub>N</sub>, mientras que para el proceso de compostaje se asume un factor de emisión de metano de 0,5 % y un factor de emisión directa de óxido nitroso de 0,01 kg<sub>N<sub>2</sub>O-N</sub>/kg<sub>N</sub> (IPCC, 2006). Por su parte, se considera un factor de emisión asociado a los fertilizantes químicos de 600 g<sub>CO<sub>2</sub>eq</sub>/kg<sub>P</sub> y 600 g<sub>CO<sub>2</sub>eq</sub>/kg<sub>K</sub>, para el fosfato diamónico y el cloruro de potasio, respectivamente (Skowrońska-Filipek, 2014), siendo las cantidades evitadas las mencionadas anteriormente.

**Tabla 7. Resultados de la estimación de reducción de emisiones de GEI por implementación del proyecto (kg<sub>CO<sub>2</sub>eq</sub>/año).**

Fuente: elaboración propia.

	Escenario Línea de Base	Escenario Proyecto
Emisiones CH <sub>4</sub> acopio de efluente en laguna	429.457	201.206
Emisiones matriz eléctrica	1.348	
Emisiones acopio en pilas/compostaje:	8.369	3.542
Emisiones fertilizantes	5536	
<b>Total</b>	<b>444.709</b>	<b>204.749</b>
<b>Reducción total de GEI</b>		<b>239.961</b>

Como se observa, se alcanza una reducción de 239.961kg<sub>CO<sub>2</sub>eq</sub>/año, lo que representa el 54 % respecto al escenario de línea de base y 72g<sub>CO<sub>2</sub>eq</sub>/L de leche producida, según la producción de 2019.

Cabe aclarar que estos valores son marginales respecto a las emisiones del establecimiento, ya que, el mayor aporte a las emisiones corresponde a la fermentación entérica de los animales. Si bien no se cuenta con datos publicados a nivel nacional respecto a las emisiones en términos absolutos asociadas a la producción de leche, de acuerdo a estudios realizados (Becoña-Oyhantcabal, 2013), sólo el 7 % de las emisiones asociadas a la leche corresponden al manejo del estiércol, ya que la producción se basa en sistemas pastoriles, en los cuales la cantidad de estiércol recolectable es relativamente baja. No obstante, es necesario reconocer que la adopción de prácticas sostenibles en la gestión del estiércol, representa prácticamente la única forma viable de reducir las emisiones a nivel predial. De acuerdo al último Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI, 2019), las emisiones asociadas al manejo de estiércol de ganado vacuno lechero es de aproximadamente 14.740 ton<sub>CO<sub>2</sub>eq</sub>/año, por lo que la reducción de emisiones alcanzadas por el proyecto desarrollado corresponden al 1,4 % de estas emisiones.

## Evaluación económica

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la evaluación de la viabilidad económica. Para ello, se evalúa la rentabilidad del proyecto desde dos perspectivas: (i) desde el punto de vista del beneficiario, el establecimiento Rincón de Albano, y desde el punto de vista de un tambo hipotético, de la misma escala productiva que Rincón de Albano y sin considerar el apoyo de Biovalor, pero analizando los posibles escenarios en que la implementación de este tipo de proyecto se incorpora a la producción, ya sea como modelo de negocio en sí mismo o como alternativa en la gestión de los efluentes.

La tabla a continuación describe la línea de base, la inversión inicial utilizada y los escenarios que se modelaron desde cada perspectiva.

**Tabla 8. Escenarios para la evaluación económica.**

	Línea de base	Inversión inicial	Escenarios
Perspectiva del beneficiario	Situación del tambo Rincón de Albano previo al proyecto.	Se descuenta de la inversión inicial el apoyo de Biovalor.	<ul style="list-style-type: none"><li>• Escenario 1: con los datos de proyección de generación (Tabla 5).</li><li>• Escenario 2: con los datos de proyección incluyendo medidas de mejora del desempeño (Tabla 6)</li></ul>
Perspectiva de un tambo tipo	Un tambo con la misma cantidad de vacas en ordeño (500) que Rincón de Albano.	Se considera una inversión inicial ajustada, que omite costos que se tuvieron en Rincón de Albano que podrían haberse evitado, que en una segunda instalación no se harían. No se considera el apoyo de Biovalor.	<ul style="list-style-type: none"><li>• Escenario 3: El tambo ya cumple con la normativa ambiental y presenta toda la inversión en el sistema en la COMAP.</li><li>• Escenario 4: El tambo no cumple aún con la normativa ambiental y evalúa esta opción frente a una inversión en un sistema de aplicación a campo. Presenta el motogenerador a la COMAP.</li></ul>

Para cada escenario, se realizó un flujo de caja de tipo incremental. Se tomaron en cuenta solamente los ingresos y los costos atribuibles al proyecto. A partir de los flujos de caja se determinaron tres indicadores que permiten evaluar la rentabilidad de la inversión: el período de retorno simple, el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). Se presentan a continuación los datos y supuestos generales empleados en los flujos de caja realizados.

Se toman valores y precios hasta el 30/6/2020, que fue la fecha en la que se terminaron de recabar valores para el estudio económico.

**Tabla 9. Supuestos generales económico-financieros.**

Tabla 3. Supuestos generales económicos financieros:			
Costo energía eléctrica:			
Horario punta	10,252	UYU/kWh	Pliego tarifario UTE ajustado al 01/04/2020; MC1 triple horario
Horario valle	2,048	UYU/kWh	
Horario llano	4,507	UYU/kWh	
Tipo de cambio:			
Tipo de cambio 180 días (2.1.2020-30.6.2020)	41,4	UYU/USD	INE; tasa compra
Datos económicos:			
Inflación UYU	10,36	%	INE; índice de precios del consumo (IPC) acumulado 12 meses al 30/06/2020
Inflación USD	0,00	%	
Tasa de descuento USD real	7,50	%	OPP; tasa de descuento social
Tasa de descuento USD nominal	7,50	%	
Tasa IRAE	25	%	
Amortización fiscal de la inversión	15	años	
IVA	0,22		

Cabe aclarar que se considera una vida útil del sistema de 15 años por que el seguro (incluido entre los costos de operación y mantenimiento) cubre el costo de reponer la membrana superior del biodigestor y posibles roturas de la misma.

Si no está especificado, el estudio utiliza la tasa de cambio promedio de los últimos 180 días de 41,4 UYU/USD<sup>5</sup>.

### **Perspectiva del beneficiario**

Se evalúa a continuación la rentabilidad de la inversión desde la perspectiva del beneficiario. El primer escenario evalúa concretamente la inversión hecha por el beneficiario, en el segundo escenario se asume una mejora en el sistema que aumenta la generación de energía.

En ambos escenarios, se toma en cuenta el apoyo obtenido por Biovalor detallado en la tabla siguiente, junto a las demás inversiones hechas por el beneficiario.

---

<sup>5</sup>Más adelante, se considera la tasa promedio del 2019 al evaluar la renta de un tambo tipo en 2019 y la tasa puntual a finales de setiembre 2020 para estimar el monto de la inversión en unidades indexadas que se evalúa con la COMAP.

**Tabla 10. Inversiones realizadas– Escenarios 1 y 2.**

Ítem	Inversión (USD)	Comentarios
Movimiento de tierra	26.495	Biodigestor
Obra civil y sanitaria	35.175	
Eléctrica	16.248	
Equipos - Biodigestor	100.000	
Equipos - Repuestos biodigestor	751	
Asesorías	3.071	
Trámites aduana equipos	1.525	
Trámites aduana repuestos equipos	142	Motogenerador
Obra civil y sanitaria	13.533	
Eléctrica	26.061	
Equipos - motogenerador	57.915	
Asesorías	3.541	
Trámites UTE	2.219	
Trámites aduana - motogenerador	1.486	
Otros	799	
<b>Inversión por beneficiario</b>	<b>175.950</b>	(61 %)
<b>Aporte de Biovalor</b>	<b>113.011</b>	(39 %)
<b>Total inversión</b>	<b>288.961</b>	

La inversión fue realizada entre 2017 y 2019, según el avance de las obras. Los gastos realizados en UYU fueron convertidos a USD de acuerdo a la tasa de cambio al momento de la compra correspondiente, la cual osciló entre 28,3 y 37,7 UYU/USD con una clara tendencia en alza en el período indicado.

En el monto de inversión no se incluyen los costos de importación de la maquinaria (por ejemplo el recargo, el impuesto aduanero único a la importación (IMADUNI), el anticipo de IRAE y las tasas consulares) ni tampoco el IVA de los equipos, ya que el beneficiario las pudo exonerar gracias a que el equipamiento se importó a través del mecanismo preferencial de las Naciones Unidas. El precio del equipamiento y el motogenerador incluye el transporte terrestre desde Brasil, la instalación y la puesta en marcha.

El resto de los ítems listados si incluye el IVA (obra civil y sanitaria, eléctrica, asesorías, trámites), tal cual fueron pagados por el beneficiario en plaza.

Este escenario no incluye la exoneración fiscal que se puede obtener a través de la COMAP<sup>6</sup> por la instalación de un biodigestor, que es una inversión computable como tecnología limpia según el listado taxativo de tecnologías limpias<sup>7</sup>, ya que las inversiones que reciban subsidios de

<sup>6</sup>En Uruguay existe un régimen de inversiones para promover 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, cuyo objetivo es la promoción de inversiones, generando 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>7</sup> En la lista taxativa se denomina “Equipamiento y componentes para compostaje y digestión anaerobia de subproductos orgánicos”, accesible aquí: [https://www.mef.gub.uy/innovaportal/file/24971/6/criterios-de-elegibilidad-de-los-proyectos-de-inversion\\_decreto-143-018--v3-convertido.pdf](https://www.mef.gub.uy/innovaportal/file/24971/6/criterios-de-elegibilidad-de-los-proyectos-de-inversion_decreto-143-018--v3-convertido.pdf)

organismos públicos, no son elegibles para presentarse a la COMAP por la parte directamente subsidiada<sup>8</sup>. El beneficiario no hizo uso de este beneficio.

Las fuentes de ingresos que componen el flujo de caja son tres:

1. Ingresos por inyección de energía eléctrica a la red de UTE.
2. Ahorro por autoconsumo de energía eléctrica en las operaciones del tambo.
3. Ahorro por sustitución de fertilizante químico por aplicación a campo del compost producido.

No se consideran los ingresos adicionales que fueron adjudicados a este proyecto particular, como lo fueron la declaración de la inversión como de interés departamental, a través de la cual se exoneraron las patentes de los vehículos asociados al establecimiento durante 10 años.

Para la estimación de la inyección y del autoconsumo se considera el pliego tarifario vigente (ajustado al 01/04/2020). La estimación de la energía generada y los ingresos por su comercialización es la única variable que cambia entre los escenarios 1 y 2:

- En el escenario 1, se considera la proyección de generación y los ingresos económicos asociados a la generación descritos en la Tabla 5. En términos anuales, los ingresos por inyección son de 13.948 USD, tomando una tasa de cambio promedio de los últimos 180 días según la Tabla 9.
- En el escenario 2, se consideran la proyección de generación con las mejoras en el desempeño del sistema descritos en la Tabla 6, que redundarían en una mayor generación de energía, especialmente en invierno, aunque no implican gastos de operación y mantenimiento adicionales. En términos anuales, los ingresos por inyección son de 15.710 USD.

El ahorro por autoconsumo abarca la energía generada y consumida por el tambo en el horario que el motogenerador está en funcionamiento, generando un ahorro por la sustitución del consumo de energía de UTE de 971 USD para ambos escenarios según la Tabla 5 y la Tabla 6.

Además, como ya fue mencionado, el compost producido a partir de los sólidos separados del efluente, es aplicado en el campo sustituyendo el uso de fertilizantes químicos. El ahorro total generado por el uso de compost es de 1.071 USD/año.

En la tabla a continuación, se detallan los costos de operación y mantenimiento. Éstos son relativamente bajos, ya que el sistema está automatizado y no se requiere un operario adicional para su manejo.

Aunque el beneficiario asegure no tener gastos administrativos, se estimó un mínimo del 1% sobre los ingresos para gastos administrativos, considerando que dedica su tiempo al monitoreo y seguimiento del sistema. Se incluyó además un costo del 1% adicional sobre ingresos para abarcar imprevistos. Dado que los costos administrativos y de imprevistos se calculan sobre

---

<sup>8</sup> Según decreto 268/020 art.3



ingresos totales, los costos de operación y mantenimiento (o&m) varían levemente entre los escenarios 1 y 2.

Se agrega a los costos de o&m el consumo eléctrico de los equipos fuera del horario de generación, ya que durante la generación el equipamiento consume de la energía generada de acuerdo a los resultados mencionados en la Tabla 6.

**Tabla 11. Costos de operación y mantenimiento – Escenarios 1 y 2.**

<b>Supuestos costos de producción</b>	<b>Monto</b>	<b>Unidad</b>
3 cambios de aceite y filtros al motor por año , con un costo aproximado de \$ 5000 en cada cambio	362	USD/año
Cambio de soda cada 15 días	116	USD/año
Cambio de las 6 bujías (especiales)	85	USD/año
Cada 10 años mantenimiento general al motor y al generador (anualizado)	400	USD/año
<b>Total mantenimiento</b>	<b>963</b>	<b>USD/año</b>
Consumo equipos	842	USD/año
Seguros	450	USD/año
Administración e imprevistos	2%	s/ingresos
<b>Total costos o&amp;m escenario 1</b>	<b>2.567</b>	<b>USD/año</b>
<b>Total costos o&amp;m escenario 2</b>	<b>2.602</b>	<b>USD/año</b>

El seguro cubre el costo de reponer la membrana superior del biodigestor (7.000 USD costo membrana y 5.000 USD por la venida de los técnicos de Brasil a colocarla) y roturas de la misma por múltiples factores.

Las tablas siguientes detallan el flujo de caja del proyecto para los escenarios 1 y 2. No se consideraron costos financieros ni impuestos al sistema.

Tabla 12. Flujo de caja - Escenario 1.

Unidad USD   Años	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>Inversión</b>	288.961															
Ahorro por autoconsumo	costo evitado	971	971	971	971	971	971	971	971	971	971	971	971	971	971	971
Inyección a la red	ingreso	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948
Ahorro de fertilizantes	costo evitado	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071
<b>Total ingresos (+)</b>		<b>15.990</b>	<b>15.990</b>	<b>15.990</b>	<b>15.990</b>	<b>15.990</b>	<b>15.990</b>	<b>15.990</b>	<b>15.990</b>	<b>15.990</b>	<b>15.990</b>	<b>15.990</b>	<b>15.990</b>	<b>15.990</b>	<b>15.990</b>	<b>15.990</b>
Costo O&M		2.574	2.574	2.574	2.574	2.574	2.574	2.574	2.574	2.574	2.574	2.574	2.574	2.574	2.574	2.574
<b>Total costos Producción (-)</b>		<b>2.574</b>	<b>2.574</b>	<b>2.574</b>	<b>2.574</b>	<b>2.574</b>	<b>2.574</b>	<b>2.574</b>	<b>2.574</b>	<b>2.574</b>	<b>2.574</b>	<b>2.574</b>	<b>2.574</b>	<b>2.574</b>	<b>2.574</b>	<b>2.574</b>
Amortización		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Intereses		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Saldo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Total Costos Financieros (-)</b>		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Aporte Biovalor</b>	<b>113.011</b>															
<b>Saldo antes de impuestos (=)</b>	-175.950	13.415	13.415	13.415	13.415	13.415	13.415	13.415	13.415	13.415	13.415	13.415	13.415	13.415	13.415	13.415
<b>Flujo de caja acumulado cliente</b>	-175.950	-162.535	-149.119	-135.704	-122.288	-108.873	-95.458	-82.042	-68.627	-55.211	-41.796	-28.380	-14.965	-1.550	11.866	25.281

Tabla 13. Flujo de caja - Escenario 2.

Unidad USD   Años	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>Inversión</b>	288.961															
Ahorro por autoconsumo	costo evitado	971	971	971	971	971	971	971	971	971	971	971	971	971	971	971
Inyección a la red	ingreso	15.710	15.710	15.710	15.710	15.710	15.710	15.710	15.710	15.710	15.710	15.710	15.710	15.710	15.710	15.710
Ahorro de fertilizantes	costo evitado	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071
<b>Total ingresos (+)</b>		<b>17.752</b>	<b>17.752</b>	<b>17.752</b>	<b>17.752</b>	<b>17.752</b>	<b>17.752</b>	<b>17.752</b>	<b>17.752</b>	<b>17.752</b>	<b>17.752</b>	<b>17.752</b>	<b>17.752</b>	<b>17.752</b>	<b>17.752</b>	<b>17.752</b>
Costo O&M		2.609	2.609	2.609	2.609	2.609	2.609	2.609	2.609	2.609	2.609	2.609	2.609	2.609	2.609	2.609
<b>Total costos Producción (-)</b>		<b>2.609</b>	<b>2.609</b>	<b>2.609</b>	<b>2.609</b>	<b>2.609</b>	<b>2.609</b>	<b>2.609</b>	<b>2.609</b>	<b>2.609</b>	<b>2.609</b>	<b>2.609</b>	<b>2.609</b>	<b>2.609</b>	<b>2.609</b>	<b>2.609</b>
Amortización		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Intereses		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Saldo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Total Costos Financieros (-)</b>		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Aporte Biovalor</b>	<b>113.011</b>															
<b>Saldo antes de impuestos (=)</b>	-175.950	15.142	15.142	15.142	15.142	15.142	15.142	15.142	15.142	15.142	15.142	15.142	15.142	15.142	15.142	15.142
<b>Flujo de caja acumulado cliente</b>	-175.950	-160.808	-145.666	-130.523	-115.381	-100.239	-85.097	-69.955	-54.813	-39.670	-24.528	-9.386	5.756	20.898	36.040	51.183

Los indicadores de rentabilidad se detallan a continuación:

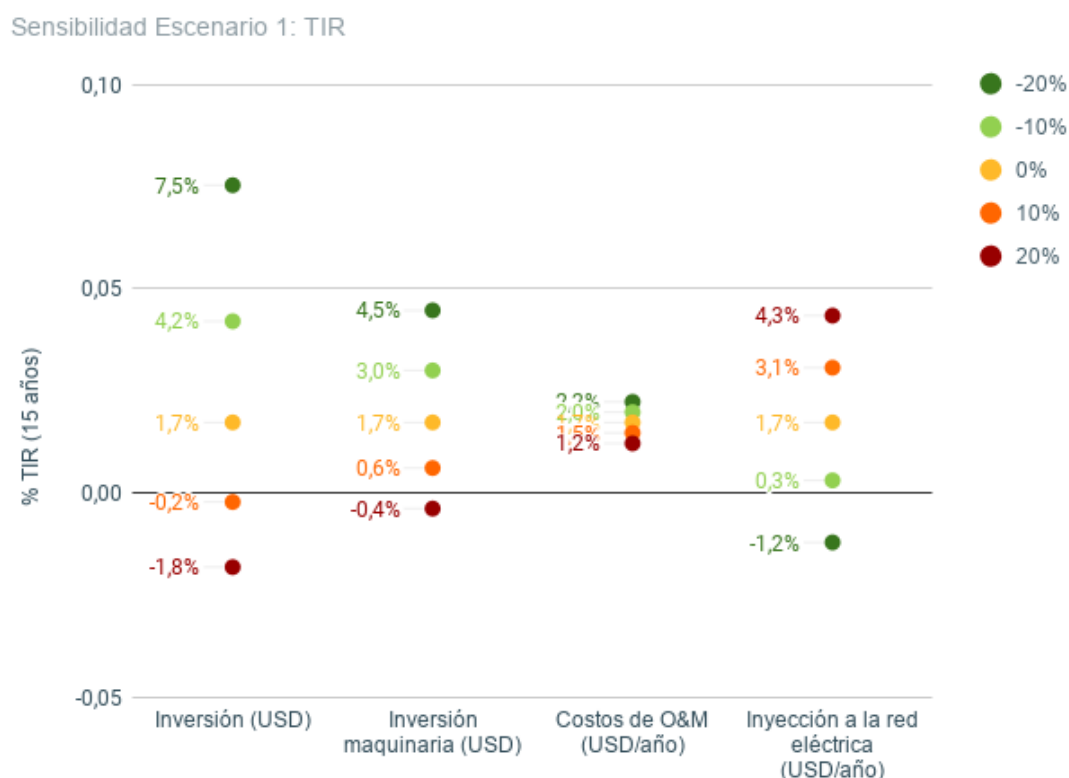
**Tabla 14. Rentabilidad en el caso del beneficiario – Escenarios 1 y 2.**

Ítem	Monto	Monto	Unidad
Período de recuperación simple de la inversión	13,1	11,6	años
TIR- tasa interna de retorno (15 años)	1,73%	3,38%	
VAN - valor actual neto (15 años)	-57.531	-42.288	USD

Desde la perspectiva del beneficiario con el apoyo del proyecto Biovalor, sin utilizar una tasa de descuento de flujos futuros de dinero, la inversión se recupera en 13,1 años en el escenario 1 y en 11,6 años en el escenario 2 de mayor generación eléctrica. La tasa de rentabilidad promedio anual (TIR) que este proyecto pagaría a inversionistas por invertir sus fondos allí, sería de un valor menor al costo oportunidad de capital de 7.5% en ambos casos. El valor actual neto (VAN) es negativo, utilizando la misma tasa de descuento del 7.5% como tasa de descuento social, que sugiere el Sistema Nacional de Inversión Pública de la Oficina de Planeamiento y Presupuesto (OPP). En conclusión, desde el punto de vista del inversor no es rentable en ninguno de los dos escenarios para el beneficiario, aun considerando el apoyo otorgado por Biovalor. Cabe destacar que el tiempo de repago si es menor a la vida útil estimada de 15 años del sistema, pero mayor a la duración del contrato de micro generación con UTE que tiene una duración inicial de 10 años y que se puede extender.

Tomando como base los datos y supuestos del escenario 1, se analiza el impacto que tienen en la TIR variaciones en (i) el monto de inversión, (ii) la inversión en la maquinaria, (iii) los costos de operación y mantenimiento y (iv) la inyección a la red eléctrica. En el modelo, los factores varían de a uno, considerando que no afecta el resto de los factores (*ceterisparibus*).

Gráfico 10. Análisis de sensibilidad - Escenario 1



Fuente: elaboración propia.

Se constata en la ilustración que el factor más sensible a una variación en el monto es la inversión. Para el escenario 1 (que considera el apoyo de Biovalor), si la inversión fuera de 231.168 USD, es decir un 20% menor que actualmente, la inversión sería rentable, de una TIR de 7.5%

### Perspectiva de un tambo tipo

En ambos escenarios de los casos tipo, se modela la inversión en un tambo de 500 vacas en ordeño, pero se parte de líneas de base diferentes para evaluar el proyecto de forma incremental: en el escenario 3, el tambo ya cumple con la normativa ambiental relativa a la gestión de efluentes, mientras que en el escenario 4 no se cumple y el establecimiento debería seleccionar la alternativa de gestión más conveniente para implementar.

En ambos escenarios se exonera IRAE a través de la COMAP, por lo tanto estos modelos son aplicables para un total de 732 tambos en Uruguay que tributan IRAE<sup>9</sup>. Son los tambos de mayor facturación anual y representan el 26% de los tambos totales. A partir de una facturación de 2 millones de unidades indexadas anuales, los tambos tributan IRAE ficto y a partir de 4 millones de UI al año, IRAE real<sup>10</sup>.

<sup>9</sup>Según datos proporcionados por la DGI del ejercicio de julio del 2014 a junio del 2015. El resto tributa IMEBA.

<sup>10</sup> Datos elaborados por INALE en base a la declaración jurada de DICOSE 2019.

El escenario 3, se modela bajo el supuesto que el tambo al inicio del proyecto ya cuenta con un sistema de gestión de efluentes que cumple con la normativa ambiental. Se asume que el tambo tiene el sistema más usual, es decir una separación de sólidos (mecánica o por sedimentación), un acopio en laguna y un sistema de aplicación a campo del efluente. La inversión en el biodigestor y el sistema de generación de energía eléctrica es incremental, ya que el proyecto se incorpora como una unidad adicional en el tratamiento del efluente, y la inversión es elegible para aplicar a los beneficios de la COMAP<sup>11</sup>. En este escenario, el proyecto se presenta a la COMAP y la exoneración del impuesto a la renta (IRAE) constituye una fuente de ahorro que se considera para evaluar la rentabilidad de la inversión.

Para el escenario 3, la inversión detallada en la Tabla 10 de los escenarios 1 y 2 se ajusta, ya que algunos de los gastos incurridos por el beneficiario en el marco del proyecto con Biovalor se reducirían en base a las lecciones aprendidas. En particular el movimiento de tierra, la obra civil y sanitaria, y la inversión en la instalación eléctrica se verían reducidos dado que en el proyecto de Rincón de Albano se realizaron algunas obras e instalaciones que debieron ser modificadas y corregidas en el transcurso de la instalación. Asimismo, se excluye la inversión en el separador de sólidos mecánico (aproximadamente 15.000 USD) porque se asume que el tambo ya tiene un separador de sólidos mecánico o pasivo, dado que cumple con la normativa. Incluso en caso de no contar con un separador de sólidos, el establecimiento podría instalar uno del tipo pasivo por sedimentación, que presenta eficiencias de separación similares a los del tipo mecánico, si se mantiene una frecuencia regular de limpieza (Hernández *et al*, 2020).

La tabla a continuación detalla la inversión considerada en el caso de un tambo tipo para el escenario 3 y compara esta inversión con respecto a la inversión hecha en el proyecto de Rincón de Albano (escenarios 1 y 2).

---

<sup>11</sup> Según los criterios de elegibilidad de los proyectos de inversión (decreto 143/18), p.21: “En el caso de que alguno de los bienes sea obligatorio para el desarrollo del emprendimiento por normativa nacional o municipal, el mismo no se considerará como computable a efectos del indicador de tecnologías limpias. Accesible aquí: [https://www.mef.gub.uy/innovaportal/file/24971/5/criterios-de-elegibilidad-de-los-proyectos-de-inversion\\_decreto-143-018--v3.pdf](https://www.mef.gub.uy/innovaportal/file/24971/5/criterios-de-elegibilidad-de-los-proyectos-de-inversion_decreto-143-018--v3.pdf)

**Tabla 15. Inversión en un tambo tipo – Escenario 3.**

Ítem	Monto	Unidad	Comentarios	% de reducción con respecto a la inversión original
Movimiento de tierra	21.196	USD	Biodigestor	-20%
Obra civil y sanitaria	28.140	USD		-20%
Eléctrica	11.373	USD		-30%
Equipos	84.637	USD		-15%
Repuestos	751	USD		0%
Asesorías	3.071	USD		0%
Trámites aduana equipos	1.525	USD		0%
Trámites aduana repuestos equipos	142	USD		0%
Obra civil y sanitaria	10.826	USD	Motogenerador	-20%
Eléctrica	18.243	USD		-30%
Equipos	57.915	USD		0%
Asesorías	3.541	USD		0%
Trámites UTE	2.219	USD		0%
Trámites aduana - motogenerador	1.486	USD		0%
Otros	799	USD		0%
<b>Inversión total Escenario 3</b>	<b>245.864</b>	<b>USD</b>		

En el monto de inversión no se incluyen los costos de importación de la maquinaria (por ejemplo el recargo, el IMADUNI, el anticipo de IRAE y las tasas consulares), ni tampoco el IVA de los equipos, ya que se asume que el beneficiario las exonera al postular el proyecto a la COMAP. El resto de los ítems listados incluye el IVA (obra civil y sanitaria, eléctrica, asesorías, trámites).

A los ingresos anuales anteriormente descritos por la venta de energía eléctrica a UTE (13.938 USD), los ahorros por autoconsumo (971 USD) y los ahorros por sustitución de fertilizantes químicos (1.071 USD) se le suma una nueva fuente de ingresos: el ahorro en impuestos a la renta (IRAE) que supone la inversión en el biodigestor para un tambo tipo, que otorga la COMAP.

A la fecha del cierre de este informe, a principios de octubre 2020, se publicó el decreto 268/020 que ajusta los beneficios de la COMAP. A efectos de que el modelo tenga actualidad, se simula la exoneración de IRAE según el nuevo decreto, tomando en cuenta la tasa de cambio y el valor de la unidad indexada de finales de setiembre 2020.

No se modelaron otras exoneraciones que se pueden obtener a través de la COMAP, como la exoneración del impuesto al patrimonio (IP)<sup>12</sup> y la devolución del Impuesto al Valor Agregado

<sup>12</sup> Decreto 268/020, art. 19: Exoneración sobre los bienes muebles que no gocen de exoneración al amparo de otros beneficios, por toda su vida útil. En el caso de bienes inmuebles, la exoneración comprenderá las obras civiles realizadas, por el término de 8 años si el proyecto está ubicado en Montevideo, y por el término de 10 años si está radicado en el interior del país.

(IVA) de los bienes adquiridos en plaza<sup>13</sup>. Como se mencionó en el apartado de inversión, si se estimó que se exoneran las tasas y tributos a la importación<sup>14</sup>.

Para estimar este ahorro de IRAE, se modeló un flujo de caja según una segmentación del sector lechero preparada por INALE que refleja los estados financieros y características productivas para diferentes modelos de tambos. El segmento seleccionado<sup>15</sup>abarca los productores que producen más de 1 millón de litros de leche por año y que utilizan más de 3.000 kilos de materia seca de pasto/ha/vaca masa, en el cual está incluido Rincón de Albano.

La tabla a continuación detalla los supuestos utilizados para modelar la renta de un tambo promedio, para poder estimar el impacto de la COMAP en este escenario. Se asume que la inversión se financia de capital propio pero se incluyen costos financieros (intereses pagados) según el promedio del segmento de tambos elegidos.

**Tabla 16. Supuestos ingresos y costos – Escenario 3**

Ítem	Monto	Unidad	Fuente
Relación VO/VM	81%		ML 12-2014 (INALE)
Cantidad de vacas en ordeño	500	vacas en ordeño (VO)	supuesto
Cantidad de vacas masa	617	vacas masa (VM)	fórmula
Litros de leche por vaca masa	20,1	litros/día/VO	ML 12-2014 (INALE)
Ingreso por leche remitida 2019	10,67	UYU/litro	promedio del sector lechero total (INALE)
Tipo de cambio promedio 2019	34,570	UYU/USD	Fuente INE tasa compra
Ingreso por leche remitida	0,31	USD/litro	ML 12-2014 (INALE)
Ingreso anual por leche remitida	37.531.725	UYU/año	fórmula
Ingreso anual por leche remitida	1.085.673	USD/año	ML 12-2014 (INALE)
Costo promedio sobre ingreso percibido (producto bruto)	71%		ML 12-2014 (INALE)
Porcentaje de la inversión financiada	0%		supuesto
Intereses sobre ingreso percibido	1%		ML 12-2014 (INALE)
Ingresos leche antes de impuestos sobre ingreso percibido	28%		ML 12-2014 (INALE)

La siguiente tabla resume la exoneración por la COMAP según el simulador oficial de la UNASEP, considerando que el 100% de la inversión se adjudica al indicador de tecnologías limpias y se obtienen dos puntos para este indicador en el puntaje final. Se le agregan 2,5 puntos a través del indicador sectorial según los criterios del MGAP, ya que se trata de una energía renovable y

<sup>13</sup> Decreto 268/020, art. 19: Devolución de I.V.A por las adquisiciones en plaza de materiales y servicios destinados a la obra civil.

<sup>14</sup> Decreto 268/020, art. 19: Incluido el I.V.A de bienes muebles de activo fijo y materiales destinados a la obra civil, que no gocen de exoneración al amparo de otros beneficios, siempre que sean declarados no competitivos con la industria nacional por la Cámara de Industria en conformidad por la Dirección Nacional de Industria.

<sup>15</sup> En base a la segmentación de INALE del 2014, referido en los datos proporcionados como “Modelo lechero-12”

0,9 puntos adicionales a través del indicador de descentralización, suponiendo que el tambo se encuentra en San José. La COMAP brinda la posibilidad de descontar a través de impuestos un porcentaje de la inversión elegible. Se supone que se presenta el proyecto a mitades de octubre 2020, para modelar el caso según las nuevas disposiciones.<sup>16</sup> A efectos de presentar un modelo conservador, no se consideran los beneficios transitorios<sup>17</sup>.

**Tabla 17. Beneficios Ley de Inversiones (COMAP) Decreto 260/020.**

Ítem	Monto	Unidad	Comentario
Tipo de cambio al 30.9.2020	42,58	UYU/USD	BCU tasa compra
Máximo % de exoneración	90%		sobre IRAE total a pagar
Años para exoneración	11,00	años	1 año extra por ser MYPE
Unidad indexada al 30.6.2020	4,71	UI/UYU	Fuente INE
Total inversión en UI	2.221.821	UI	Se toma tasa de cambio y UI al 30.09.2020, supuesto que presenta la inversión a la COMAP en octubre 2020
IRAE efectivo mínimo con COMAP	3%		
Exoneración en UI	1.649.035	UI	según simulador UNASEP
% de exoneración de IRAE	74,22%		Porcentaje de la inversión exonerada según simulador UNASEP / 10% extra para MyPE con proyectos menores a UI 3.500.000

Considerando el rango de facturación y la cantidad de empleados, el tambo es una microo pequeña empresa. Cabe destacar que se obtendría el puntaje máximo en el indicador de tecnologías limpias si hasta el 50% del proyecto de inversión es adjudicable a este indicador. Se podría, de esta manera, agregar otras inversiones al proyecto de inversión que aumentarían el monto exonerado de IRAE.

Como se ve en resaltado en el siguiente flujo de caja, a través de la COMAP se descuentan impuestos durante los primeros tres años.

---

<sup>17</sup> Según el decreto 268/020, art.17, si la inversión temporal se realiza antes del 31/03/2021, se obtiene un porcentaje de exoneración adicional, incrementando el porcentaje de exoneración por aplicación de indicadores (en este caso 74,22%) en un 20% con los límites dispuestos. Si la inversión la realiza entre el 01/4/2021 y el 31/12/2021, ellas se computarán por el 150%del monto invertido a los efectos del cómputo del monto exonerado del IRAE.



Tabla 18. Flujo de caja con COMAP – Escenario 3.

Unidad USD   Años	0	1	2	3	4	5
<b>Inversión</b>	245.864					
Ahorro por autoconsumo	costo evitado	971	971	971	971	971
Inyección a la red	ingreso	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948
Ahorro de fertilizantes	costo evitado	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071
ingresos leche		1.085.673	1.085.673	1.085.673	1.085.673	1.085.673
<b>Total ingresos (+)</b>		<b>1.101.663</b>	<b>1.101.663</b>	<b>1.101.663</b>	<b>1.101.663</b>	<b>1.101.663</b>
Costo O&M biodigestor		2.574	2.574	2.574	2.574	2.574
Costo de producción leche		770.828	770.828	770.828	770.828	770.828
<b>Total costos Producción (-)</b>		<b>773.402</b>	<b>773.402</b>	<b>773.402</b>	<b>773.402</b>	<b>773.402</b>
Intereses		10.857	10.857	10.857	10.857	10.857
<b>Total Costos Financieros (-)</b>		<b>65.140</b>	<b>65.140</b>	<b>65.140</b>	<b>65.140</b>	<b>65.140</b>
<b>Saldo antes de impuestos (=)</b>		317.404	317.404	317.404	317.404	317.404
Depreciación de activos (biodigestor)		16.391	16.391	16.391	16.391	16.391
Saldo imponible IRAE		301.013	301.013	301.013	301.013	301.013
<b>IRAE 25% - todo el tambo</b>		75.253	75.253	75.253	75.253	75.253
<b>Irae efectivo mínimo a pagar</b>		7.525	7.525	7.525	7.525	7.525
<b>Exoneración IRAE - COMAP</b>		67.728	67.728	47.024	0	0
<b>Saldo exonerable - COMAP</b>		114.752	47.024	0	0	0

El flujo de caja siguiente considera el ahorro de IRAE otorgado por la COMAP como un ingreso directo del sistema. En los tres primeros años, el ahorro de IRAE excede el ingreso total que se obtiene de las otras tres fuentes de ingreso anteriores.

Tabla 19. Flujo de caja escenario 3 con COMAP.

Unidad USD   Años	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>Inversión</b>	245.864															
Ahorro por autoconsumo	costo evitado	971	971	971	971	971	971	971	971	971	971	971	971	971	971	971
Inyección a la red	ingreso	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948
Ahorro de fertilizantes	costo evitado	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071
<b>Ahorro impuestos</b>	costo evitado	<b>67.728</b>	<b>67.728</b>	<b>47.024</b>												
<b>Total ingresos (+)</b>		61.141	61.141,6	45.888,7	15.989,7	15.989,7	15.989,7	15.989,7	15.989,7	15.989,7	15.989,7	15.989,7	15.989,7	15.989,7	15.989,7	15.989,7
Costo O&M		2.574	2.574	2.574	2.574	2.574	2.574	2.574	2.574	2.574	2.574	2.574	2.574	2.574	2.574	2.574
<b>Total costos Producción (-)</b>		<b>2.574</b>	<b>2.574</b>	<b>2.574</b>	<b>2.574</b>	<b>2.574</b>	<b>2.574</b>	<b>2.574</b>	<b>2.574</b>	<b>2.574</b>	<b>2.574</b>	<b>2.574</b>	<b>2.574</b>	<b>2.574</b>	<b>2.574</b>	<b>2.574</b>
Amortización		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Intereses		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Saldo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Total Costos Financieros (-)</b>		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Saldo después de impuestos (=)</b>	-245.864	81.143	81.143	60.440	13.415	13.415	13.415	13.415	13.415	13.415	13.415	13.415	13.415	13.415	13.415	13.415
<b>Flujo de caja acumulado</b>	-245.864	-164.721	-83.577	-23.138	-9.722	3.693	17.109	30.524	43.940	57.355	70.770	84.186	97.601	111.017	124.432	137.847

Los indicadores de rentabilidad se detallan a continuación:

**Tabla 20. Rentabilidad– Escenario 3.**

Caso tipo con COMAP	Monto	Unidad
Período de recuperación simple de la inversión	4,7	años
TIR- tasa interna de retorno (15 años)	11,13%	
VAN - valor actual neto (15 años)	32.018	USD

De esta manera, para el escenario 3, considerando el caso de un tambo tipo que se presenta a la COMAP con esta inversión, la inversión se recupera en 4,7 años. La tasa de rentabilidad promedio anual (TIR) que este proyecto pagaría a inversionistas por invertir sus fondos allí, sería de un valor mayor al costo oportunidad de capital de 7.5%. El valor actual neto (VAN) es positivo, utilizando la misma tasa de descuento del 7.5% que sugiere el Sistema Nacional de Inversión Pública de la OPP como tasa de descuento social.

En conclusión, la inversión es más atractiva que en el caso del beneficiario con el apoyo de Biovalor. El modelo es aplicable a los tambos que tengan rentas para descontar a través del instrumento.

El último escenario se modela bajo el supuesto de que un tambo de 500 vacas en ordeño no cumple con la normativa y se compara la inversión necesaria para dos alternativas de sistemas de gestión de efluentes: (i) un sistema de acopio y aplicación a campo del efluente (alternativa 1) y (ii) un sistema de biodigestión y recirculación del efluente para el lavado de las instalaciones (alternativa 2).

El flujo de caja considera la inversión incremental, bajo el supuesto que el establecimiento debe realizar una inversión en el sistema de gestión de efluentes para cumplir con la normativa. Al ser la aplicación a campo la alternativa de menor inversión y más usual a nivel nacional, es posible considerar esta inversión como un costo hundido en el análisis comparativo.

La inversión incremental es la diferencia entre los costos de inversión de ambas alternativas, la cual alcanza un valor de 170.473USD según el detalle de la tabla siguiente.

**Tabla 21. Inversiones sistemas de gestión de efluentes - Escenario 4.**

Ítem	Monto	Unidad
<b>Alternativa 1: Aplicación a campo</b>		
Separador de sólidos	15.000	USD
Laguna	70.000	USD
Sistema de riego (bombas, caños, aspersores)	30.000	USD
Pozos de agua y bomba	20.000	USD
<b>Total</b>	<b>135.000</b>	<b>USD</b>
<b>Alternativa 2: Biodigestor + recirculación</b>		
Separador de sólidos	15.363	USD
Biodigestor	150.835	USD
Motogenerador	95.029	USD
Costos de importación biodigestor y motogenerador	17.675	USD
Laguna acopio	20.000	USD
Sistema de recirculación (bomba, caños, tanques)	5.000	USD
<b>Total</b>	<b>303.902</b>	<b>USD</b>

En este caso, la única inversión que se presenta a la COMAP es el motogenerador, que no es una inversión necesaria para cumplir con la normativa. Se agregan costos de importación al monto de inversión del biodigestor de un monto equivalente al 23% del equipamiento de lo importado<sup>18</sup>. A su vez, es posible exonerar el IVA (y el anticipo del IVA en el caso de una importación), a través del mecanismo del decreto 58/98 a partir del decreto modificatorio 11/020. Cabe destacar que llegado el caso se podría exonerar la membrana superior del biodigestor también, ya que no es necesaria para cumplir con la normativa.

Los ingresos del sistema están dados por:

1. Ingresos por inyección de energía eléctrica a la red de UTE: 13.938 USD/año
2. Ahorro por autoconsumo de energía eléctrica en las operaciones del tambo: 971 USD/año
3. Ingresos por exoneración de impuestos a través de la COMAP: 69.990 USD el primer año y 540 USD el segundo año.

No se considera el ingreso incremental el ahorro por sustitución de fertilizante químico resultante de la aplicación a campo del compost producido, ya que, si bien este ahorro existe, se genera en las dos alternativas comparadas. No obstante, si se descuenta de los ingresos incrementales el ingreso por ahorro de fertilizantes que se obtiene por la aplicación a campo de los efluentes en la alternativa 1. Cabe recordar que en la alternativa 2 no se aplican los efluentes a campo, dado que se recirculan como agua de lavado.

Para modelar el ingreso por la exoneración de IRAE si se la considera, se utilizan los mismos supuestos que en el escenario 3.

---

<sup>18</sup> No se considera el 10% de la inversión que abarca los costos de instalación y puesta en marcha de la maquinaria. Se asume un 10% de impuestos por concepto de recargo, 8% de IMADUNI y 5% de tasa consular, que son valores de referencia para biodigestores importados (NCM 3925.10) desde el Mercosur.

Tabla 22. Flujo de caja COMAP - Escenario 4.

Unidad USD   Años	0	1	2
<b>Inversión</b>	95.026		
Ahorro por autoconsumo	costo evitado	971	971
Inyección a la red	ingreso	13.948	13.948
Ahorro en fertilizantes	costo evitado	1.071	1.071
Ingresos leche		1.085.673	1.085.673
<b>Total ingresos (+)</b>		<b>1.101.663</b>	<b>1.101.663</b>
Costo O&M biodigestor		2.574	2.574
Costo de producción leche		770.828	770.828
<b>Total costos Producción (-)</b>		<b>773.402</b>	<b>773.402</b>
Intereses leche		10.857	10.857
<b>Total Costos Financieros (-)</b>		<b>10.857</b>	<b>10.857</b>
<b>Saldo antes de impuestos (=)</b>	-95.026	317.404	317.404
Depreciación de activos (biodigestor)		6.335	6.335
Saldo imponible IRAE		311.069	311.069
<b>IRAE 25% - todo el tambo</b>		<b>77.767</b>	<b>77.767</b>
<b>Irae efectivo mínimo a pagar</b>		<b>7.777</b>	<b>7.777</b>
<b>Exoneración IRAE - COMAP</b>		<b>69.990</b>	<b>540</b>
<b>Saldo exonerable - COMAP</b>		<b>540</b>	<b>0</b>

En el caso de los costos de operación y mantenimiento se considera nuevamente el valor incremental, que es la diferencia entre los costos de operación de la alternativa 1 y 2:

Tabla 23. Costos de operación y mantenimiento - Escenario 4.

Ítem	Monto	Unidad
<b>Alternativa 1: Aplicación a campo</b>		
Sistema de riego	1.000	USD/año
Abastecimiento de agua	1.000	USD/año
<b>Total</b>	<b>2.000</b>	<b>USD/año</b>
<b>Alternativa 2: Biodigestor + recirculación</b>		
Sistema biodigestor	2.574	USD/año
Sistema de recirculación	500	USD/año
<b>Total</b>	<b>3.074</b>	<b>USD/año</b>

En base a estos supuestos se presenta el flujo de caja para el escenario 4 a continuación. Al igual que en los otros escenarios, no se modela un costo financiero y se asume que el tambo invierte de capitales propios.

Tabla 24. Flujo de caja - Escenario 4.

Unidad USD   Años	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>Inversión incremental</b>	168.902															
Ahorro por autoconsumo	costo evitado	971	971	971	971	971	971	971	971	971	971	971	971	971	971	971
Inyección a la red	ingreso	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948	13.948
Ingreso no obtenido por ahorro en fertilizantes		-1.266	-1.266	-1.266	-1.266	-1.266	-1.266	-1.266	-1.266	-1.266	-1.266	-1.266	-1.266	-1.266	-1.266	-1.266
Ahorro de impuestos		69.990	540	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Total ingresos (+)</b>		83.643	14.193	13.653	13.653	13.653	13.653	13.653	13.653	13.653	13.653	13.653	13.653	13.653	13.653	13.653
Costo O&M		1.074	1.074	1.074	1.074	1.074	1.074	1.074	1.074	1.074	1.074	1.074	1.074	1.074	1.074	1.074
<b>Total costos Producción (-)</b>		<b>1.074</b>	<b>1.074</b>	<b>1.074</b>	<b>1.074</b>	<b>1.074</b>	<b>1.074</b>	<b>1.074</b>	<b>1.074</b>	<b>1.074</b>	<b>1.074</b>	<b>1.074</b>	<b>1.074</b>	<b>1.074</b>	<b>1.074</b>	<b>1.074</b>
Amortización		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Intereses		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Saldo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Total Costos Financieros (-)</b>		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Saldo después de impuestos (=)</b>	-168.902	82.569	13.119	12.578	12.578	12.578	12.578	12.578	12.578	12.578	12.578	12.578	12.578	12.578	12.578	12.578
<b>Flujo de caja acumulado</b>	-168.902	86.333	73.215	60.636	48.058	35.480	22.901	10.323	2.256	14.834	27.412	39.991	52.569	65.148	77.726	90.305

**Tabla 25. Rentabilidad - escenario 4.**

Caso tipo solo COMAP motogenerador	Monto	Unidad
Período de recuperación simple de la inversión	7,8	años
TIR- tasa interna de retorno (15 años)	8,58%	
VAN - valor actual neto (15 años)	7.704	USD

En este último escenario, que parte del supuesto que el tambo invierte en un sistema de recirculación de efluentes como una alternativa para cumplir con la normativa y solo presenta el motogenerador a la COMAP, la inversión es rentable con una TIR mayor a 7.5% y un VAN positivo.

En este mismo escenario, si el productor decide no presentarse a la COMAP con el proyecto de inversión del motogenerador, el proyecto deja de ser rentable, ya que aumenta la inversión (se incluyen 17.675 USD de impuestos de importación para el motogenerador que no se exoneran) y bajan los ingresos al no tener la exoneración de IRAE. El período de recuperación aumenta a 15 años con un VAN negativo y un TIR de 0%.

### Resumen de resultados

A modo de resumen, se presentan a continuación los resultados de cada escenario en forma comparativa:

**Tabla 26. Resumen de los resultados de la evaluación económica.**

Escenarios modelados		Período de recuperación simple de la inversión	TIR (15 años)	VAN (15 años)
Perspectiva del beneficiario	Escenario 1: con los datos de proyección de generación (según Tabla 5).	13,1 años	1,73%	-57.531 USD
	Escenario 2: con los datos de proyección incluyendo medidas de mejora del desempeño (según Tabla 6)	11,6 años	3,38%	-42.288 USD
Perspectiva de un tambo tipo	Escenario 3: El tambo ya cumple con la normativa ambiental y presenta toda la inversión en el sistema en la COMAP.	4,7 años	11,13%	32.018 USD
	Escenario 4: El tambo no cumple aún con la normativa ambiental y evalúa esta opción frente a una inversión en sistema de aplicación a campo. Presenta el motogenerador a la COMAP.	7,8 años	8,58%	7.704 USD

Se concluye que el proyecto, sin tomar en cuenta el subsidio de Biovalor, tiene una rentabilidad atractiva si se consideran los ingresos por exoneración de IRAE en la ecuación, ya sea incluyendo la inversión entera o incluyendo solamente el motogenerador.

## Conclusiones

El primer aspecto a resaltar es el hecho que mediante la implementación de este proyecto, el establecimiento Rincón de Albano se convierte en un tambo de modelo “circular”, en el que todos los residuos generados son aprovechados para el beneficio del propio establecimiento. Además, representa el primer proyecto de microgeneración a partir de biomasa, generando energía eléctrica a partir de los residuos que se generan.

En cuanto a la tecnología empleada, de acuerdo a la evaluación realizada y a los resultados obtenidos, se concluye que el biodigestor del tipo laguna cubierta con agitación por recirculación se adecúa correctamente a las posibilidades de los sectores agropecuarios, debido a su relativamente menor inversión y a la disponibilidad del espacio necesario para su construcción. Además, al ser sistemas sencillos, los requerimientos de personal para su operación y control son mínimos, con posibilidad de incluir automatismos en prácticamente todos sus componentes.

El desempeño del sistema ha sido satisfactorio y todos los parámetros se encuentran dentro del rango de los valores de diseño esperados. Desde la degradación de materia orgánica, hasta la cantidad de biogás y energía eléctrica generada. De hecho, si se realiza el mantenimiento adecuado, es esperable que con el tiempo el sistema adquiriera mayor estabilidad y mejore el desempeño, producto de una mayor adaptación de los microorganismos y optimización de los procesos microbiológicos.

Un aspecto a destacar de la tecnología implementada, corresponde al diseño particular de este sistema. La empresa proveedora debió realizar un diseño específico para este proyecto, debido a la necesidad de incluir un sistema de calefacción interna del biodigestor de forma de contrarrestar las bajas temperaturas durante el invierno. Como se vio en los resultados presentados, durante los meses más fríos, si bien no logró encontrarse en el rango óptimo de operación, pudo mantenerse cierto nivel de temperatura dentro del biodigestor por encima de la temperatura ambiente y evitar descensos bruscos que comprometieran la actividad microbiológica. Se demuestra así la importancia de contar con un diseño a medida del sistema y la adaptación de la tecnología a las condiciones y necesidades particulares.

No obstante, para compensar el efecto de las bajas temperaturas durante el invierno, sería de gran interés evaluar la adopción de posibles medidas para aumentar el tiempo de retención hidráulico del biodigestor, logrando así un mayor aprovechamiento del potencial de metanización. Para esto se requiere evaluar la posibilidad de reducir el consumo de agua en el lavado de las instalaciones y desviar los pluviales que se generan principalmente en el patio de alimentación.

Por otro lado, la inclusión de un separador de sólidos previo al ingreso del efluente al biodigestor, si bien retira materia orgánica que podría potencialmente generar mayor cantidad de biogás, sus características de baja degradabilidad y el relativamente bajo tiempo de retención hidráulico del sistema, causarían acumulación de sólidos en el biodigestor y pérdida de volumen útil. Como ya fue mencionado, de acuerdo a la caracterización de efluente de entrada y salida, existe cierta evidencia de la ocurrencia de acumulación de sólidos en el biodigestor. Aunque esta acumulación no parece ser significativa, es necesario planificar la



realización de purgas del sistema y evaluar el contenido de sólidos. Operacionalmente, el sistema cuenta con la cañería prevista para purgar el fondo en distintas zonas del biodigestor, para lo cual se pueden utilizar las bombas de recirculación y el desarenador para su descarga.

En cuanto a la generación de biogás, esta puede incrementarse en los períodos de bajas temperaturas mediante la incorporación de mayor cantidad de estiércol, que puede traerse de otros establecimientos cercanos. Sin embargo, aumentar la carga del biodigestor debe realizarse progresivamente y manteniendo el control del sistema, ya que si se sobrecarga el sistema, puede ocurrir el descenso del valor del pH, por acumulación de ácidos grasos volátiles de las primeras etapas de la digestión, lo que podría inhibir la acción de los microorganismos metanogénicos lo que causaría el descenso parcial o total de la generación de biogás.

Otro aspecto que debe ser cuidado, es la eventual acumulación de nitrógeno y el efecto inhibitorio que este puede causar en el proceso. Si bien hasta el momento no se ha evidenciado este efecto, es necesario realizar análisis frecuente de los efluentes de entrada y salida, así como de la generación de biogás.

Sería bueno poder contar con la caracterización de todas las corrientes de efluente, especialmente del agua utilizada en el lavado, de manera de poder cerrar el balance de masa. Esto permitiría tener un mayor control del sistema, pudiendo evaluar los mecanismos involucrados e identificar posibles pérdidas e ineficiencias en el manejo.

Respecto a la generación de energía, cabe destacar la posibilidad que brinda el biogás como energía que puede ser almacenada y utilizada cuando su aprovechamiento produce el mayor beneficio económico. Este modelo de generación, establecido por la normativa referida a la microgeneración, a través del cual es posible comercializar energía a un precio mayor a la energía consumida en las operaciones del tambo, permite mejorar la rentabilidad del proyecto a la vez que se da solución a un problema ambiental de importancia para el sector. Además, desde el punto de vista de UTE, el proyecto también es beneficioso, ya que inyecta a la red energía renovable en un horario en que es más probable la generación a partir de fuentes fósiles.

En este sentido, es posible concluir que esta tecnología es una alternativa con un gran efecto en la reducción de los impactos ambientales asociados a los establecimientos lecheros. Una mejor gestión de los efluentes generados permite, en el caso de Rincón de Albano, contar con una mejor calidad del agua recirculada para el lavado de las instalaciones, y en los establecimientos que aplican el efluente a campo, poder hacerlo a una tasa mayor de aplicación por presentar una mayor estabilidad y biodisponibilidad de los nutrientes.

En cuanto a la viabilidad del proyecto, para el tambo beneficiario, considerando el apoyo de Biovalor, el tiempo de repago de la inversión (11,3 años si se considera la adopción de medidas para mejorar aún más el desempeño del sistema), es menor que los 15 años de vida útil de los equipos instalados, pero mayor que la duración del contrato de microgeneración con UTE de una duración inicial de 10 años. No obstante, el proyecto genera otras varias externalidades positivas que no pueden ser tenidas en cuenta en la evaluación económica, como por ejemplo, la reducción de olores, la proliferación de insectos, la mejora en la calidad del agua de lavado de las instalaciones, etc., que a su vez, redundan en una mejora en las condiciones laborales de los

trabajadores y de la calidad de vida del propietario del establecimiento que reside en el propio predio.

Con respecto a la viabilidad económica de la inversión para un tambo de similar cantidad de vacas en ordeño que quisiera invertir en un sistema como el descrito, se concluye que es atractivo sujeto (i) a que se presente a la COMAP el total de la inversión (si ya cumple con la normativa; período de repago de 4,7 años) o (ii) una fracción de la inversión (si aún no cumplía con la normativa ambiental, período de repago 7,2 años).

Para presentar un escenario conservador, no se sumaron inversiones adicionales que no puntúan como tecnologías limpias pero aumentarían el monto de IRAE exonerado al proyecto de inversión presentado a la COMAP. La normativa actual que regula la COMAP (decreto 268/020), en los casos modelados, permite exonerar el IRAE en un plazo de 11 años, por lo que la exoneración puede ser atractiva también para tambos, un saldo imponible de IRAE anual menor.

La implementación de este proyecto, convierte al establecimiento Rincón de Albano, en no sólo un productor de leche, sino también en un generador de energía eléctrica. La diversificación de los modelos de negocios fortalece al sector y mejora su resiliencia. Al mismo tiempo, se aumenta la sostenibilidad de la leche producida por este establecimiento, lo cual debería ser considerada un producto de mayor valor, que podría ser reconocida por el mercado.

A nivel de política pública, fomentar la inversión en biodigestores es de interés, primordialmente porque constituye una de las únicas opciones para reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero en los tambos de sistemas pastoriles. Además, representa una opción con menor riesgo respecto a los impactos ambientales vinculados a la contaminación de cuerpos de agua, ya que la reducción de la carga orgánica y la posibilidad de recirculación para el lavado de las instalaciones evita el vertido de efluentes y minimiza el uso innecesario de agua fresca.

El interés a nivel de política pública no viene dado por ser el biogás una fuente de energía renovable, debido a que la matriz eléctrica nacional ya es renovable en prácticamente su totalidad. Sin embargo, comparado con otras fuentes de energías renovables como la solar, la eólica y la hidroeléctrica, el biogás no depende de factores climáticos inciertos y se puede almacenar e inyectar a la red fácilmente en los momentos que sean más convenientes para el sistema y de forma descentralizada.

Es por esto, que es necesario el diseño de instrumentos que promuevan la diferenciación de los productos provenientes de sistemas de mejor desempeño ambiental, de forma de fomentar la adopción de tecnologías de menor impacto. Por ejemplo, a través de una certificación ambiental, o desarrollando un instrumento específico que no dependa de la renta generada en el establecimiento (como en el caso de la COMAP) sino directamente del aporte a la mitigación al cambio climático y al mejor manejo de efluentes que evite la contaminación del agua.

Cabe aclarar que la producción de biogás no es necesariamente la mejor de las alternativas disponibles, siendo necesario evaluar los sistemas de forma integral, considerando las posibilidades particulares en cada caso.

El nivel de replicabilidad de este tipo de proyecto, depende básicamente de la escala del emprendimiento, ya que para establecimientos pequeños, esta alternativa, no resulta tan atractiva desde el punto de vista financiero, aunque podría serlo desde el punto de vista ambiental.

Se concluye que para los casos analizados, el factor más sensible a la rentabilidad del proyecto corresponde a la inversión inicial. Es por esto que se genera el desafío de evaluar el diseño e implementación de sistemas con menor nivel de sofisticación, buscando el equilibrio entre la pérdida de desempeño y el menor costo de inversión. Además, se sugiere evaluar la viabilidad del biogás térmico para escalas de tambos similares, ya que es de suponer que la inversión sería significativamente menor, aunque para estos escenarios es necesario contar con un requerimiento de calor importante asociado al establecimiento que pueda absorber el biogás generado.

Por último, cabe resaltar que la posibilidad de contar con la experiencia del proyecto demostrativo de Rincón de Albano, con todo el conocimiento adquirido y las lecciones aprendidas, permite estar en un punto de partida en las mejores condiciones posibles para la búsqueda y el desarrollo de sistemas que se adapten a las posibilidades del sector lechero, e incluso a otros sectores productivos, de forma de contar con una alternativa atractiva para la mejora de los procesos, la valorización de los residuos y la circularidad de los productos elaborados.

## Referencias

**Becoña, G., Oyhantcabal, W. (2013).** Primer estudio de la huella de carbono de tres cadenas agroexportadoras del Uruguay: carne vacuna, láctea y arroceras. Informe final. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.

**Biotecnología de Procesos para el Ambiente (BIOPROA), (2015).** Identificación de residuos en el Uruguay pasibles de ser valorizados por digestión anaerobia y estimación de su potencial de metanización. Instituto de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República – Proyecto Biovalor. Accesible en: <http://biovalor.gub.uy/descarga/informe-tecnico-identificacion-residuos-uruguay/> (Enero 2020).

**Becoña, G., Oyhantcabal, W. (2013).** Primer estudio de la huella de carbono de tres cadenas agroexportadoras del Uruguay: carne vacuna, láctea y arroceras. Informe final. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.

**Correa, C., Rezzano, N., García, F., (2016).** Manual para la gestión ambiental de tambos. Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA) – Oficina de Planeamiento y Presupuesto (OPP) – Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU), Uruguay.

**Dirección de Estadísticas Agropecuarias, (2018).** Estadísticas del sector lechero 2017. Serie Trabajos Especiales Nº 354. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Uruguay.

**Dirección de Estadísticas Agropecuarias (DIEA), (2019).** Anuario Estadístico Agropecuario 2019. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Uruguay.

**Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe.V. (FNR), (2010).** Guía sobre el Biogás - Desde la producción hasta el uso. Ministerio Federal de Alimentación, Agricultura y Protección al Consumidor (BMELV), Alemania.

**Gutiérrez, S., Cabrera, N., (2006).** Estimación de los parámetros nacionales y básicos para el procesamiento y utilización de los residuos sólidos y líquidos de tambos. Proyecto INIA\_FPTA nº 138, Uruguay.

**Hernández, A., Benítez, A., Portillo, I., Verdier, L., (2020).** Evaluación operativa de separadores de sólidos para efluentes de tambo. Informe final. Praxis Lab. Proyecto Biovalor.

**Hill, D.T., Taylor, S.E., Grift, T.E., (2001).** Simulation of low temperature anaerobic digestion of dairy and swine manure. Bioresource Technology, Vol. 78, pp. 127-131.

**Instituto Nacional de la Leche (INALE), s.f.** Sitio web oficial: <https://www.inale.org/>

**Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET), s.f.** Estadísticas climatológicas – Tablas estadísticas: <https://www.inumet.gub.uy/clima/estadisticas-climatologicas/tablas-estadisticas> (Enero 2020).

**Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) 2017, (2019).** Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente - Sistema Nacional de Respuesta al Cambio Climático, Uruguay.

**Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA), (2015).** Estado de situación Cuenca del río Santa Lucía.

**Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) (2006).** Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 4: Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. Capítulo 10: Emisiones resultantes de la gestión del ganado y del estiércol.

**Pedemonte, A., (2019).** Informes INALE: Situación y perspectivas de la lechería uruguaya. Período enero – diciembre 2018. Instituto Nacional de la Leche (INALE). Uruguay. Accesible en: <https://www.inale.org/wp-content/uploads/2019/06/Situaci%C3%B3n-y-perspectivas-lecher%C3%ADa-uruguaya-2018.pdf>

**Pham, C.H., Triolo, J.M., Sommer, S.G., (2014).** Predicting methane production in simple and unheated biogas digesters at low temperatures. Applied Energy, Vol. 136, pp. 1-6.

**Proyecto Biovalor, s.f.** Sitio web oficial: <http://biovalor.gub.uy/>

**Safley, L.M., Westerman, Jr&P.W., (1990).** Psychrophilic anaerobic digestion of animal manure: proposed design methodology. Biological Wastes, Vol. 34, pp. 133-148.

**Safley, L.M., Westerman, Jr&P.W., (1992).** Performance of a low temperature lagoon digester. Bioresource Technology, Vol. 41, pp. 167-175.

**Safley, L.M., Westerman, Jr&P.W., (1994).** Low-temperature digestion of dairy and swine manure. Bioresource Technology, Vol. 47, pp. 165-171.

**Schievano, A., D'Imporzano, G., Salati, S., Adani, F., (2011).** On-field study of anaerobic digestion full-scale plants (Part I): An on-field methodology to determine mass, carbon and nutrients balance. BioresourceTechnology, Vol. 102, pp. 7737-7744.

**Sganga, F., Cabrera, C. Gonzalez, M. Rodriguez, S. (2012).** Producción familiar agropecuaria uruguaya y sus productores familiares a partir de los datos del Censo General Agropecuario y el Registro de Productores Familiares. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Uruguay. <http://www2.mgap.gub.uy/portal/afiledownload.aspx?2,10,821,O,S,0,10981%3BS%3B1%3B76>

**Skowrońska,M.,Filipek, T. (2014).** Life Cycle assessment of fertilizers: a review. International Agrophysics. Vol. 28, pp. 101-110.

**Unidad de Gestión de Proyecto (UGP) Biovalor, (2016).** Cuantificación de residuos generados en sectores agroindustriales uruguayos. Proyecto Biovalor, MIEM-MGAP-MVOTMA, Uruguay. Accesible en: <http://biovalor.gub.uy/descarga/informe-tecnico-cuantificacion-residuos-generados-sectores-agropecuarios-agroindustriales-uruguayos/> (Enero 2020).

**Varnero Moreno, M.T., (2011).** Manual de biogás. “Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables”. MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF. Chile.