



FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA "FRAY ROGELIO BACON"

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA ARGENTINA

SEDE ROSARIO

TRABAJO FINAL DE CARRERA DE GRADO: INGENIERÍA AMBIENTAL

***"Valoración de AVUs para la producción de
biogás con purines de cerdo"***

Presentado por:

Valentino Lazzaroni



TRABAJO FINAL DE CARRERA DE GRADO: INGENIERÍA AMBIENTAL

***“Valoración de AVUs para la producción de
biogás con purines de cerdo”***

PRESENTADO POR:

Valentino Lazzaroni

DIRECTOR DE INVESTIGACIÓN:

Ing. Ambiental Msc. Ignacio Roberto Huerga

DIRECTOR ACADÉMICO DE LA CARRERA DE ING. AMBIENTAL:

Lic. en Cs. del Ambiente Javier Gómez Insausti

AÑO 2022

Agradecimientos

A mi familia, por ser un soporte indispensable y de amor incondicional a lo largo de todos estos años de carrera y en mi vida en general, sin ellos, nada de esto hubiese sido posible desde un principio. A mis padres, por su apoyo y entrega.

A todas esas tantas personas que me han acompañado, apoyado y animado a lo largo de todos estos años. A aquellos que están y a aquellos que no, sin importar dónde, por todo lo que me brindaron.

A todos aquellos profesores de la Universidad Católica Argentina del Gran Rosario, por todos los conocimientos transmitidos a lo largo de mi carrera.

A mi director de investigación Ignacio R. Huerga, por la ayuda desinteresada, el apoyo, la paciencia, su predisposición y compromiso desde el primer día.

Dedicatoria

A Juana

Por ser parte de lo que soy y de lo que quiero ser.

Por ser el faro que ilumina mi camino.

RESUMEN

La presente investigación titulada "Valoración de AVUs para la producción de biogás con purines de cerdo", se ha desarrollado como alternativa de investigación considerando la problemática actual de los pequeños y medianos productores que poseen un sistema de generación de biogás y pretenden aumentar el rendimiento en la producción energética. En este trabajo en particular, nos enfocamos en los productores porcinos, si bien los resultados que se obtengan pueden ser considerados para otro tipo de efluentes y residuos de la producción animal.

El presente documento se encuentra enfocado principalmente en el uso de otro sustrato como solución o alternativa a la problemática descrita, más específicamente, se ensayaron los AVUs. Si bien, generalmente la mayor parte de los investigadores centran su foco principalmente en la generación de biodiesel a partir de AVUs; debemos tener en cuenta que existen otras alternativas importantes de aprovechamiento como lo es su utilización en la producción de biogás.

El objetivo principal es estudiar y evaluar la codigestión de purines y AVUs aplicando diferentes tratamientos y ensayos utilizando diferentes metodologías, como por ejemplo, reactores "batch" o en "continuo". También, evaluar diferentes alternativas y posibilidades de producción o aprovechamiento que brinda el sistema actual de producción porcina en el establecimiento en cuál se basa la investigación (Chañar Ladeado, Santa Fe).

Se lleva a cabo una descripción en detalle de la problemática principal a abordar, así como el contexto dentro del cual se engloba la misma. A partir de ésta se plantean interrogantes y se propone una hipótesis y metodología de trabajo que se debe respetar durante el desarrollo de la investigación.

Dentro del cuerpo de la investigación se desarrolla el marco teórico que gira en torno a la problemática y situación principal. También se detallan los resultados y registros realizados durante los diferentes ensayos. A partir de cada ensayo se realizan reflexiones y análisis de resultados con el motivo de evaluar las posibilidades que presenta el sistema actual de tratamiento.

Con el motivo de cierre de investigación, se realiza una puesta en común evaluando el alcance o no de los objetivos y resultados esperados. Por último, se desarrollan las conclusiones, propuestas y alternativas en conjunto con el director de investigación haciendo énfasis en las cuestiones principales sobre las que es posible seguir trabajando e indagando.



Palabras clave: Aceites Vegetales Usados, Biogás, Biodigestión, Producción porcina

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción a la Producción Porcina	3
1.1.1. Contexto mundial de la producción porcina	3
1.1.2. Producción porcina en Argentina	3
1.1.3. Producción porcina en Santa Fe	4
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1. ¿Por qué la biodigestión anaeróbica puede ser una solución para los productores?	6
2.2. Biogás	8
2.3. El Biodigestor	11
2.3.1. ¿Qué es un biodigestor?	11
2.3.2. Funcionamiento del biodigestor	11
2.4. Aspectos generales a considerar en proyectos de generación de biogás	14
2.5. ¿Qué hacen hoy los productores con estos residuos/efluentes?	15
3. MARCO LEGAL	17
3.1. Antecedentes internacionales	18
3.2. Normativa Nacional	19
3.3. Normativa Provincial	21
4. FORMULACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	24
4.1. Planteo de la problemática general	24
4.1.1. Problemática energética en la producción porcina	24
4.1.2. Gestión inadecuada de residuos	24
4.2. Interrogantes	24
4.3. Hipótesis	25
4.3.1. Problemáticas específicas	25
4.3.2. Hipótesis	25
4.4. Objetivos	25
4.4.1. Objetivos generales	25

4.4.2. Objetivos específicos	25
4.5. Plan de trabajo	26
4.5.1. Cronograma de trabajo	26
4.6. Elección de un productor para el desarrollo de la investigación	27
4.6.1. Trabajo con el INTA	27
4.6.2. Actividad principal del productor	27
4.6.3. Participación del INTA en el proyecto de generación de biogás	28
4.6.4. Estado de situación del proyecto de generación de biogás	29
4.6.5. Descripción del establecimiento y caracterización del sistema	29
4.6.6. Diagnóstico	31
5. JUSTIFICACIÓN DE INVESTIGACIÓN	32
5.1. ¿Cómo se puede hacer más eficiente el biodigestor?	32
5.1.1. Calefaccionando el efluente con el biogás generado	32
5.1.2. Mejorando el sistema de agitación	33
5.1.3. Agregando otro sustrato	33
5.2. Justificación de la investigación - Uso de AVUs para biogás	35
5.3. Factibilidad de obtención	36
5.4. Antecedentes y proyectos similares	37
6. MATERIALES Y MÉTODOS	40
6.1. TOMA DE MUESTRAS	40
6.1.1. Recolección y conservación de muestras	40
6.1.2. Elección de sitios de muestreo	40
6.2. ANÁLISIS BÁSICOS	42
6.2.1. Potencial de Hidrógeno (pH)	42
6.3. ANÁLISIS GRAVIMÉTRICOS	44
6.3.1. Sólidos Totales	44
6.3.2 Sólidos fijos y volátiles	47
6.4. ANÁLISIS DE PROCESO	49

6.4.1. FOS/TAC	49
6.5. ENSAYOS DE POTENCIAL DE BIOGÁS	51
6.5.1. Sistema de medición de biogás mediante probeta y aguja	52
6.6. ENSAYOS DE ALIMENTACIÓN EN CONTINUO	53
6.6.1. Sistema de medición de biogás por desplazamiento volumétrico basado en el protocolo VDI 4630 (2006).	55
6.6.2. Sistema de medición de CH ₄ por burbujeo en solución alcalina	56
7. RESULTADOS	58
7.1. Ensayos de producción de biogás	58
7.1.1. Ensayos previos e intraoperatorios de análisis de estado del biodigestor	58
7.1.2. Ensayo de potencial de producción de biogás	59
7.1.3. Ensayo de producción de biogás de co-digestión de AVUs en reactores batch	62
7.1.4. Ensayo de producción de biogás de la co-digestión de AVUs en continuo	67
8. CONCLUSIONES	71
9. RECOMENDACIONES	73
ANEXOS	74
Anexo 1: Cronograma de trabajo	74
Anexo 2: Diagrama de flujo del procesos	75
Anexo 3: Tabla de resultados del abastecimiento energético	76
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Procesos químicos y productos en la producción de biogás.	9
Figura 2 - Marco legal sobre residuos de producción agropecuaria de la provincia de Santa Fe.	22
Figura 3 - Fosa de descarga del efluente crudo del lavado de galpones.	41
Figuras 4 y 5 - Estación elevada y sistema de recirculación del biodigestor.	41
Figura 6 - Recolección de muestras en la descarga del líquido digerido en bidones de 5 litros.	42
Figura 7 - Medición de pH de la muestra mediante pHmetro (INTA - Venado Tuerto, 2022).	44
Figura 8 - Fórmula de cálculo de la relación FOS/TAC.	50
Figura 9 - Frascos de vidrio color caramelo de 250ml con muestras de efluente del biodigestor (INTA - Venado Tuerto, 2022).	52
Figura 10 - Estufa regulada a 35 °C, donde se alojan los frascos durante el ensayo (INTA - Venado Tuerto, 2022).	52
Figura 11 - Sistema de medición de producción de biogás mediante probeta y aguja (INTA - Venado Tuerto, 2022).	53
Figura 12 - Sistema de producción de biogás/metano en baño termostático (INTA - Venado Tuerto, 2022).	55
Figura 13 - Temperatura de funcionamiento del ensayo de producción de metano/biogás (INTA - Venado Tuerto, 2022).	55
Figura 14 - Figura ilustrativa del método volumétrico por desplazamiento de medición de biogás.	56
Figura 15 - Esquema general de la medición del volumen de metano en el biogás.	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Grupo de bacterias en las distintas fases del proceso de digestión anaeróbica.	10
Tabla 2 - Reglas empíricas para la evaluación de relaciones FOS/TAC (Valores empíricos proporcionados por DEULA - Nienburg).	51
Tabla 3 - Valores de Sólidos Totales (ST), Sólidos Volátiles (SV), pH y FOS/TAC.	58
Tabla 4 - Ensayo de potencial de producción de biogás con celulosa monocristalina.	59
Tabla 5 - Ensayo de potencial de producción de biogás con agregado de AVUs.	62
Tabla 6 - Parámetros de rendimiento obtenidos del ensayo de producción de biogás con AVUs.	62

Tabla 7 - Valores de ST/SV durante el ensayo en continuo.	67
Tabla 8 - Resultados del ensayo de producción de biogás en continuo.	69

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Ensayo del potencial de producción de biogás.	60
Gráfico 2 - Ensayo del potencial de producción de biogás con celulosa monocristalina.	61
Gráfico 3 - Ensayo de generación de biogás del efluente de carga.	63
Gráfico 4 - Ensayos comparativos de la generación de biogás mediante codigestión de purines de cerdo y AVUs.	64
Gráfico 5 - Ensayos comparativos de la producción de biogás de la codigestión de AVUs y digeridos.	65
Gráfico 6 - Ensayos comparativos de la producción de biogás mediante codigestión de AVUs y purines de cerdo.	66
Gráfico 7 - Valores del pH según fecha del ensayo.	68
Gráfico 8 - Comparativa en la producción de biogás por volumen de efluente.	70

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático global es uno de los problemas medioambientales más graves del siglo, durante este periodo se ha producido un aumento de unos 10 °C en la temperatura media de la Tierra según los registros realizados durante este período. Este problema es causado por el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), esto, a su vez, se relaciona con el aumento de la concentración de ciertos gases en la atmósfera, principalmente dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O).

El gas metano es mucho más eficaz que el CO₂ para absorber la radiación solar en la superficie de la tierra. La concentración mundial de este gas ha aumentado a un ritmo de 1% al año, y el 80% es de origen biogénico, Producido por bacterias metanogénicas en condiciones anaeróbicas (*Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2006*).

La contribución de los gases al efecto invernadero depende principalmente de dos factores: su concentración en la atmósfera y su poder molecular de calentamiento. El poder de calentamiento de las moléculas de estos gases varía y se puede medir según una referencia. El elemento utilizado de referencia es el CO₂, ya que es el gas de efecto invernadero más abundante en la atmósfera y el que contribuye en mayor medida al calentamiento global (*GASA-FCT, 2000; Lima, et al., 2001; Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático, 2006*).

El CO₂ tiene una contribución relativa del 55%, el CH₄ del 15% y el N₂O del 4%, sin embargo, está claro que la emisión de estos gases debe reducirse considerablemente (*Guyot, 1997; Instituto Técnico Porcino, 2000; Oliveira & Otsubo, 2002*).

La restricción de espacio y la necesidad de satisfacer cada vez una mayor demanda de energía (térmica/eléctrica), agua de buena calidad y alimentos, han puesto algunos paradigmas a superar, que están relacionados, principalmente, con el ambiente, la generación y uso de energía en las propiedades.

Las instalaciones rurales y los residuos dispersos son fuentes de emisión de una importante cantidad de gases, especialmente cantidad significativa de gases, especialmente CO₂, CH₄ y N₂O (*Kermarrec et. al. 1998; Lima et. al., 2001; Oliveira et. al., 2003; Paillat et. al., 2005*). Estos tres gases se forman normalmente por la descomposición de los componentes del estiércol, sin embargo, las proporciones cambian según la gestión aplicada (*Zahn y otros, 2001*).

Según la Agencia Americana de Protección del Medio Ambiente (USEPA), se estima que cerca del 14% de la emisión mundial de gas metano se origina en actividades relacionados con la producción animal (*USEPA, 1994*) y estimaciones más recientes indican que el CH₄ generado por el estiércol corresponde a entre el 5 y el 10% del total de CH₄ generada a nivel mundial (*Martínez y otros, 2003 y el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático, 2006*).

La recuperación de el biogás permite generar energía en sustitución de las fuentes fósiles, por lo tanto, con el uso de biodigestores, además de reducir las emisiones de CO₂ al sustituir otras fuentes de energía de origen fósil (madera, carbón), también disminuye la emisión de gases producidos en la fermentación y estabilización de los residuos que normalmente serían emitidos a la atmósfera por los estanques y lagunas de esterilización y estabilización utilizadas para el tratamiento de los purines (CH₄, el principal gas generado) (Oliveira, 2002; Oliveira et. al., 2003; Oliveira, 2004a).

Analizando de forma breve el contexto de latinoamérica en el pasado, el interés por el biogás en Brasil alcanzó su punto álgido en las décadas de 1970 y 1980, especialmente entre los criadores de cerdos. Varios factores fueron los responsables por el fracaso de los programas de biodigestión durante este periodo. La falta de conocimientos técnicos sobre la construcción y el funcionamiento de los biodigestores, el coste de aplicación y mantenimiento era elevado; el uso de biofertilizantes sigue requiriendo equipos de distribución en forma líquida con alto coste de adquisición, transporte y distribución; falta de equipamiento desarrollado exclusivamente para el uso del biogás y la escasa durabilidad de los equipos adaptados para la conversión de biogás en energía; ausencia de condensadores para el agua y filtros para los gases corrosivos generados en el proceso de biodigestión; la disponibilidad y el bajo coste de la electricidad y el GLP y la no cuestión medioambiental, porque los reactores utilizados en la biodigestión, por sí mismos, no se consideran como un sistema de tratamiento completo (Kunz, et al., 2004; Oliveira, 2003a; Oliveira, 2004a).

Después de 30 años, los biodigestores han resurgido como alternativa para los criadores de cerdos, gracias a la disponibilidad de nuevos materiales para la construcción de biodigestores y, evidentemente, de la mayor dependencia energética de las propiedades en función del aumento de la escala de producción, la matriz energética (automatización) y el aumento de los costes de la energía tradicional.

El uso de láminas de plástico en la construcción de biodigestores, la versatilidad y bajo coste, es el factor responsable del abaratamiento de inversiones de aplicación y su difusión.

El cambio que se ha producido en el clima durante las últimas décadas, hizo que un gran número de países europeos, en 1997, firmaran el Protocolo de Kyoto en 1997 en un intento de mitigar el efecto invernadero. Aunque la medida pareció ser muy atractiva, no hay que olvidar que el problema medioambiental causado por los efluentes de porcinos y/o avícolas no se resuelven sólo con el comercio de créditos de carbono.

Es necesario promover acciones que sean sostenibles, y que el productor tenga la posibilidad de utilizar la energía que se está desperdiciando (Lima et. al., 2001; Cruz & Sousa, 2004).

Los programas oficiales, lanzados en 2005, estimularon la implementación de biodigestores centrados principalmente en la generación de energía y en la posibilidad de

participar en el mercado del carbono, lo que se traduce en la reducción del impacto ambiental y el agregado de valor. El objetivo de estos programas es reducir la dependencia de los pequeños productores rurales en la adquisición de fertilizantes químicos y energía térmica para diferentes usos (calefacción, iluminación, refrigeración), así como para reducir la contaminación y la emisión de gases de efecto invernadero causados por el almacenamiento/tratamiento del estiércol porcino en fosas y lagunas de estiércol y aumentar los ingresos de los agricultores.

Los biodigestores forman parte de un proceso de tratamiento de residuos y no deben considerarse una solución definitiva, ya que tienen limitaciones en cuanto a la eficacia de la eliminación de la materia orgánica y los nutrientes. La posibilidad de utilizar biogás para generar energía térmica y eléctrica añade valor a los residuos al reducir sus costes de tratamiento (*Oliveira et. al., 2006*).

1.1. Introducción a la Producción Porcina

1.1.1. Contexto mundial de la producción porcina

En el contexto actual de toma de conciencia acerca de la degradación de los recursos ambientales y crisis energética, emerge la necesidad de repensar las relaciones entre las actividades productivas y el medio ambiente. Es así como el tratamiento de los desechos porcinos reviste cada día de una mayor importancia debido a la dimensión del problema que representa, no sólo por el aumento de los volúmenes producidos, generados por una mayor intensificación de las producciones, sino también por la degradación de los recursos agua, suelo y aire, la proliferación de plagas sinantrópicas (moscas, roedores, entre otras) y la generación de olores indeseables producidos cuando no poseen una correcta disposición. Es por este motivo que el manejo de las excretas es un aspecto fundamental en la sustentabilidad ambiental de los sistemas de producción animal intensivos (*FAO e INTA, 2012*).

El aspecto energético es cada vez más destacado por su injerencia en el coste final de la producción y, en el caso de la ganadería porcina y avícola, el factor de costos debe reducirse, ya que las subidas de precios pueden reducir la competitividad del sector. Debemos destacar que la crisis energética, el calentamiento global y los altos precios del petróleo, determinan la búsqueda de energías alternativas en las zonas rurales.

1.1.2. Producción porcina en Argentina

Hasta la década del 90 los efluentes generados en producciones porcinas no constituían un factor preocupante ya que la naturaleza de las explotaciones a campo y la reducida concentración de animales permitían absorberlos o utilizarlos como abono orgánico sin que constituyan un problema (*Grupo de Intercambio Tecnológico de Empresas Porcinas, 2006*).

En la actualidad la actividad atraviesa una de las etapas más favorables por lo que continúa consolidando su crecimiento. La producción porcina nacional ha comenzado a tener un vuelco cualitativo donde no se observa un aumento sustancial del número de productores, pero

sí modificaciones en la forma de producir carne. Esto significa que las producciones de pequeña escala comienzan a incorporar mayor tecnología y a aumentar el número de madres productivas alentando esto el paso de sistemas al aire libre a sistemas mixtos (AEGA, INTA, 2011). Si bien los sistemas de producción de pequeña y mediana escala productiva (10 a 200 madres) son los que prevalecen en el país, se ha producido un importante aumento en el número de productores que a partir de estratos de 100 madres han confinado parte o totalmente sus animales convirtiéndose en empresas tecnificadas de mayor eficiencia productiva. También se ha observado en estos últimos años la instalación de mega empresas altamente tecnificadas y con índices de eficiencia productiva equiparable a los sistemas más eficientes a nivel mundial.

Este cambio cualitativo generado, pone en manos de los productores un cambio tecnológico muy importante que incluye aprender a manejar y a reutilizar los efluentes que generan este tipo de tecnologías abocadas a la producción, los cuales sin un tratamiento adecuado, pueden resultar en una potencial fuente de polución, con el consecuente deterioro de la salud del medio ambiente (AEGA, INTA, 2011).

Los modelos adoptados generalmente entre los criadores de cerdos en Argentina a menudo no son más que "simples pozos de estiércol cubiertos", no siempre diseñados para optimizar la generación de biogás y biofertilizante. Además, una gran parte de los residuos son extremadamente licuados, con una baja concentración de sólidos volátiles resultante de un gran aporte de agua debido al desperdicio en los bebederos, el agua de lluvia y el lavado excesivo de los puestos.

La producción de cerdos en Argentina comienza a transitar un camino de oportunidades que la llevarán al desarrollo y a la consolidación, pero esto implica indefectiblemente enfrentar desafíos y amenazas. En este sentido, es fundamental modificar la manera en que se lleva adelante la producción, migrando hacia modelos productivos que no comprometan la sustentabilidad del medio ambiente. La intensificación que sufre la producción porcina en nuestro país, con la consecuente generación de efluentes debe ir acompañada necesariamente de un plan de gestión y biotransformación de los residuos de la producción. Las soluciones ambientales no deberán ser de carácter general, sino que, por el contrario, han de ser estudiadas y elaboradas específicamente para cada zona de acuerdo con sus condiciones ambientales y de producción, lo que implica un desafío para los productores y para esto es imprescindible la comunicación y la generación de información al respecto.

1.1.3. Producción porcina en Santa Fe

Es de conocimiento que son pocos los productores de cerdos que realizan una gestión apropiada de los residuos y efluentes que generan. Un estudio realizado por el INTA en el año 2014 sobre 3 grupos de productores porcinos de la región pampeana observó que sólo el 12,5% de los productores visitados realizaban algún tipo de tratamiento.

La localidad de Chañar Ladeado no cuenta con una red troncal de gas. El gasoducto regional llega a Corral de Bustos, Provincia de Córdoba, a unos 15 km de Chañar Ladeado; y la red de Gas de la Provincia de Santa Fe a Firmat, a unos 55 km de distancia. Este insumo es indispensable para el desarrollo agroindustrial y de la cadena de valor agregado local.

Los digestores que se han instalado en el Sur de Santa Fe para la generación de energía eléctrica responden principalmente a tecnología del tipo “llave en mano”; donde generalmente se importan casi todos sus componentes de países Europeos. Este tipo de digestores suelen demandar una inversión del orden de los 5 a 8 millones de dólares; y responden la demanda de productores que concentran una elevada cantidad de animales. Ejemplo de ello son los construidos por las empresas ADECO AGRO (Christopersen) y SEEDS ENERGY (Venado Tuerto).

En cuanto a los digestores destinados a pequeños y medianos productores (criaderos de cerdos de 100 - 400 madres; tambos de 150 a 300 vacas en ordeño), existe una importante vacancia en el desarrollo de tecnología apropiada para generar energía a través del biogás que se puede producir; especialmente en el tipo de digestor a implementar, los equipos necesarios para generar energía eléctrica, los procesos de purificación de biogás, la evaluación técnica/económica del digestor y su optimización.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. ¿Por qué la biodigestión anaeróbica puede ser una solución para los productores?

Según Al Seadi & Møller (2003), el renovado interés por la anaerobiosis y la tecnología de digestión anaeróbica se explica por su potencial para estabilizar la materia orgánica, reducir los olores y los agentes patógenos, controlar los contaminantes físicos y químicos y; promover un producto final aprovechable: biogás y abono.

El tratamiento de residuos por digestión anaerobia según Sánchez y otros (2005), tiene varias ventajas, como: destruir los organismos patógenos y parásitos, el metano puede utilizarse como fuente de energía, la producción de biomasa determina un menor volumen de residuos y un menor coste, capacidad de estabilizar grandes volúmenes de residuos orgánicos diluidos a bajo coste operativos.

La digestión anaeróbica es un proceso relativamente eficaz para las camas de las aves de corral produciendo una mezcla de biogás recolectable que contiene una media del 60% de CH₄. El metano producido por este proceso puede utilizarse como combustible para la calefacción de espacios en la producción de pollos de engorde, como sustituto del gas natural o del fuel-oil y también puede quemarse en generadores de energía que producen electricidad para su uso en la propia explotación o para su venta a empresas de electricidad y/o combustible. El residuo de lodo es estable y puede ser utilizado como abono para el suelo. En las grandes producciones es necesario tratar los gases para eliminar las impurezas, y puede ser prensado y vendido comercialmente (Oliveira, 2001; Kelleher et. al., 2002).

Para reducir las emisiones de CH₄, es esencial comprender las diferentes prácticas de gestión del estiércol en la explotación. Los mismos autores establecieron un sistema de reactor de laboratorio que permite la medición directa de emisiones de CH₄ y CO₂ en diferentes estiércoles durante un período de almacenamiento de 50 días. Los resultados ilustraron una rápida aparición de la generación y liberación y confirma que la tasa de emisión diaria en el estiércol de los cerdos varía de unos pocos a unos 100 gramos. Concluyeron que todas las técnicas de tratamiento del estiércol con separación mecánica, aditivos y aireación, demostraron efectivamente una reducción del 20-100% de la emisión de CH₄ durante el almacenamiento posterior. Este estudio también ha demostrado la importancia de las estrategias de gestión de los efluentes en la granja para controlar los contaminantes liberados durante el almacenamiento.

En la producción de pollos, la digestión anaeróbica y la producción de biogás están indicadas y son adecuadas, debido a la gran cantidad de residuos que se producen con el uso de diferentes materiales de la camada y también debido al alto consumo de energía para la producción de calor dentro de los gallineros. Por lo tanto, la digestión anaeróbica puede ser una

alternativa viable para el tratamiento de residuos avícolas, (*Demircl & Demirel, 2004*). Los autores citados anteriormente estudiaron y concluyeron que el rendimiento de biogás producido a partir del estiércol de las aves de corral puede aumentar si se mezcla con estiércol de otros animales como los cerdos y el ganado.

Magbanua Junior y otros (2001), ensayaron la digestión anaeróbica utilizando residuos de cerdos y aves de corral en varios y residuos avícolas en varias proporciones y concluyeron que los tratamientos del estiércol de cerdo y de las aves de corral produjeron conjuntamente un mayor rendimiento de biogás y metano en comparación con los mismos residuos por separado. Dicho esto, la digestión anaeróbica mediante permite diferentes posibilidades que se adaptan a las situaciones particulares de los productores, lo cuál es una ventaja.

Møller y otros (2004), determinaron en términos de sólidos volátiles, volumen y producción de la granja, la productividad de metano a partir del estiércol. Descubrieron que la productividad de metano es mayor en los cerdos que en el ganado bovino, y el rendimiento de metano en términos de sólidos volátiles es mayor también en los cerdos. El rendimiento volumétrico de metano de los residuos de los cultivos fue mayor que el encontrado en el rendimiento del estiércol total y de las fracciones sólidas del estiércol, debido a la gran cantidad de sólidos volátiles y, por consiguiente, el uso de residuos de cultivos como material de cama en el lecho aumentará el rendimiento volumétrico de metano, así como la base. La cogeneración se define como la producción combinada de calor y electricidad, independientemente del proceso de equipamiento utilizado (caldera con generador de vapor generador, grupo motor-generador, turbina) (*Balestieri, 2002*). A través de este proceso la energía renovable, procedente de la producción de biogás, puede convertirse en energía eléctrica y térmica. La energía eléctrica puede utilizarse en instalaciones ganaderas, en sistemas de iluminación o de aire acondicionado, preferentemente en refrigeración y ventilación, ya que la energía necesaria para la calefacción puede ser obtenida del biogás en su forma térmica (calor). La energía eléctrica sobrante puede, en algunos casos, exportarse a la red nacional o utilizarse para fines domésticos. El resto del contenido energético del biogás se convierte en calor mediante equipo de combustión. Este calor proviene de los gases de escape, el agua de refrigeración del motor y del aceite lubricante. Esta energía se recupera mediante intercambiadores, que recuperan, en forma de H₂O caliente, la energía térmica del circuito de refrigeración, el aceite lubricante y los gases de escape. La energía térmica tiene dos niveles: los gases de escape del motor a alta temperatura (hasta unos 500 °C) y el H₂O caliente de los sistemas de refrigeración del motor que pueden ser subdivididos en H₂O caliente de alta temperatura (Que puede alcanzar los 120 °C) y H₂O caliente de baja temperatura (hasta 50 °C), (*Cruz & Sousa, 2004*).

Por lo tanto, la energía térmica resultante además de satisfacer las necesidades energéticas del digestor, si es que lo necesita, puede ser reutilizada a través de otra aplicación, concretamente en sistemas de acondicionamiento ambiental para la producción vegetal/animal (*Oliveira & Mendes, 2006*).

En una revisión realizada por *Yadvika et. al. (2004)*, se reveló que existe una gran posibilidad de aumentar la producción de biogás en condiciones de campo. El uso de ciertos aditivos inorgánicos y orgánicos son prometedores para el aumento de la producción de biogás. Entre los diferentes tipos de biomasa utilizados como aditivos, se ha descubierto que algunos aumentan la producción de muchos tipos de gas. Sin embargo, su utilidad es limitada debido a la variabilidad estacional de las diferentes regiones. Otro problema observado en condiciones de campo es el taponamiento del reactor durante carreras largas. El aspecto práctico de la utilización de cultivos microbianos puros como aditivos debe ser analizado, en vista de ciertos problemas relacionados con la salud humana y problemas ecodinámicos.

La recirculación de los lodos de los efluentes a diario y la agitación del contenido del digestor, utilizando técnicas sencillas para aumentar la producción de biogás es factible en condiciones rurales (*La Farge, 1995*).

Los estudios de *Batzias et. al. (2005)*, en Grecia, utilizaron el método SIG para evaluar los residuos animales para la producción de biogás. Según investigadores, este método de aplicación puede utilizarse para acceder al potencial de biogás de la producción de estiércol a nivel nacional y regional, proyectando este potencial al modelo de mejor ajuste.

Los estudios desarrollados en Dinamarca por los investigadores *Haven y otros (2005)*, al evaluar el éxito y los desafíos de los proyectos de biogás, sostienen que tres factores han sido importantes para el funcionamiento de los proyectos de biogás en Dinamarca. En primer lugar, el gobierno danés ha aplicado una estrategia para estimular la interacción y el aprendizaje entre diversos grupos sociales. En segundo lugar, el trabajo social dedicado y el estímulo han permitido un desarrollo continuo de los proyectos de biogás sin interrupción desde la década de 1990. En tercer lugar, las circunstancias en Dinamarca han sido beneficiosas, como la política de cogeneración descentralizada, la existencia de sistemas de calefacción regionales, la aplicación de impuestos sobre la energía en la década de 1980 y la preferencia de los productores daneses por las cooperativas en pequeñas comunidades. El actual fracaso de los proyectos de biogás se debe principalmente a las políticas energéticas y medioambientales.

2.2. Biogás

El biogás es una mezcla de gases obtenida por degradación microbiana de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Está formado por metano (CH_4) en una proporción, que oscila entre un 50% a un 70% y dióxido de carbono (CO_2), conteniendo pequeñas proporciones de otros gases como: hidrógeno (H_2), nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S).

El metano (CH_4), principal componente del biogás, no tiene olor, color ni sabor, pero otros gases presentes le dan un ligero olor a vinagre o a huevo podrido. Para su uso como combustible, hay que establecer una relación adecuada entre el biogás y el aire, para permitir una combustión eficiente. El biogás, al ser extremadamente inflamable, puede ser quemado para reducir su efecto invernadero (El CH_4 tiene un poder de invernadero unas 21 veces mayor

que el CO₂) o se utiliza para fines domésticos, motores de combustión interna, sistemas de generación de energía eléctrica o térmica (Guyot, 1997; Oliveira, et al., 2003).

La presencia de vapor de agua, CO₂ y gases corrosivos (H₂S) en el biogás, constituye el principal problema para la viabilidad de su almacenamiento y en la producción de energía. Equipos más sofisticados, como los motores de combustión, los generadores, las bombas y los compresores, tienen una vida útil extremadamente corta. La eliminación de agua, H₂S y otros elementos mediante filtros y dispositivos para los dispositivos de refrigeración, condensación y lavado son esenciales para la viabilidad a largo plazo.

La digestión anaeróbica es una opción energética con reconocidas ventajas medioambientales. Uno de los beneficios del proceso, que ha contribuido al creciente interés en esta tecnología, radica en la conversión de la mayor parte de la carga contaminante del efluente en una fuente de energía renovable: el biogás.

La digestión anaeróbica es un proceso en el que los microorganismos que actúan en ausencia de oxígeno, atacan la estructura de los materiales orgánicos complejos para producir compuestos simples como el metano (CH₄) y el dióxido de carbono (CO₂) (Sánchez et al., 2005). Los microorganismos proporcionan la energía y los nutrientes necesarios para su propio crecimiento y reproducción. En la figura 1, se describen las fases, microorganismos y productos convenientes en el proceso de descomposición anaeróbica de los compuestos orgánicos.

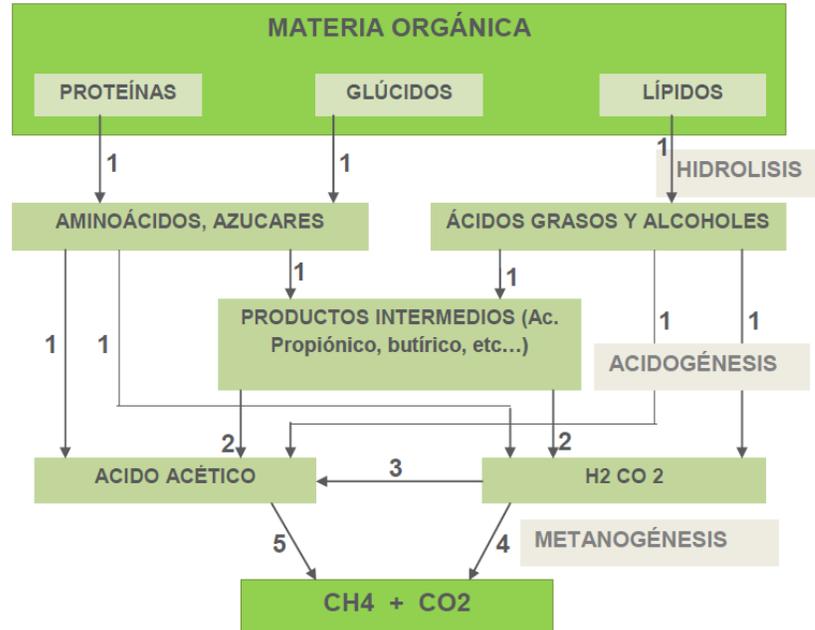


Figura 1 - Procesos químicos y productos en la producción de biogás. ¹

¹Los números indican la población bacteriana responsable del proceso: 1: Bacterias fermentativas; 2: Bacterias acetogénicas que producen hidrógeno; 3: Bacterias homoacetogénicas; 4: Bacterias metanogénicas hidrogenotróficas; 5: Bacterias metanogénicas acetoclásticas.

Las principales etapas del proceso de digestión anaeróbica son: hidrólisis de proteínas, lípidos e hidratos de carbono; fermentación de aminoácidos y azúcares; oxidación anaeróbica de ácidos grasos de cadena larga y alcoholes; oxidación anaeróbica de ácidos grasos volátiles (excepto el ácido acético); conversión de CO_2 y H_2 en ácido acético, conversión de ácido acético en CH_4 ; conversión de H_2 en CH_4 . Como se puede ver en la tabla 1 hay tres fases distintas en el proceso de digestión anaeróbica, que se llevan a cabo por tres grupos principales de microorganismos.

Tabla 1 - Grupo de bacterias en las distintas fases del proceso de digestión anaeróbica.

Grupo de bacterias	Fase	Paso
Hidrolíticas y fermentativas	Hidrólisis - Fermentación	1
Acetogénicas	Acidogénesis, acetogénesis y deshidrogenación	2 y 3
Metanogénicas	Metanogénesis	4 y 5

A continuación se realiza una breve explicación de las fases mencionadas anteriormente²:

1. **Hidrólisis y fermentación:** La materia orgánica es descompuesta por la acción de enzimas extracelulares (celulasa, amilasa, proteasa y lipasa) de un grupo de bacterias hidrolíticas anaerobias que hidrolizan las largas cadenas de moléculas solubles en agua, como las grasas, proteínas y carbohidratos, transformándolos en monómeros y compuestos simples solubles. Las bacterias involucradas en esta etapa son bacterias hidrolíticas y fermentadoras.
2. **Acidogénica, acetogénica y deshidrogenación:** Los alcoholes, ácidos grasos y compuestos aromáticos (compuestos intermedios) se degradan produciendo ácido acético, CO_2 e hidrógeno que son los sustratos de las bacterias metanogénicas. Las bacterias productoras de ácidos, involucradas en este paso, convierten los productos intermedios de las bacterias de fermentación en ácido acético, hidrógeno y CO_2 . Estas bacterias son facultativamente anaerobias y pueden crecer en condiciones ácidas.

Para producir ácido acético necesitan O_2 y carbono, para esto utilizan el oxígeno disuelto en la solución. Debido a ésto, las bacterias productoras de ácido crean una condición anaeróbica que es fundamental para los microorganismos productores de metano. Además, reducen los compuestos de bajo peso molecular a alcoholes, ácidos orgánicos, aminoácidos, CO_2 , H_2S y trazas de CH_4 . Las bacterias involucradas en esta etapa son: Bacterias acetogénicas obligadas reductoras de protones de hidrógeno (sintróficas), Bacterias homoacetogénicas.

²Virginia García Páez. Dirección de Sustentabilidad, Medio Ambiente y Cambio Climático de la provincia de Buenos Aires. Manual de Biogás: Conceptos básicos. Página 27. Visto en línea en: [\[https://www.gba.gob.ar/sites/default/files/agroindustria/docs/Manual_de_Biogas01.pdf\]](https://www.gba.gob.ar/sites/default/files/agroindustria/docs/Manual_de_Biogas01.pdf)

3. **Metanogénica:** En esta etapa, gracias a la actividad de bacterias metanogénicas, se produce metano a partir de compuestos de bajo peso molecular, como el CO₂, el hidrógeno y el ácido acético obtenidos de la etapa anterior. La concentración de hidrógeno juega un papel fundamental en la regulación del flujo del carbono en la biodigestión.

En condiciones naturales, las bacterias que producen metano, ocurren en la medida que se proporcionen condiciones anaeróbicas. Son obligatoriamente anaerobias y muy sensibles a cambios ambientales. Las bacterias involucradas en esta etapa son bacterias metanogénicas anaeróbicas obligadas.

2.3. El Biodigestor

2.3.1. ¿Qué es un biodigestor?

Un biodigestor es un recinto cerrado herméticamente, donde crecen en anaerobiosis (sin oxígeno), microorganismos; protozoarios, hongos y bacterias, que degradan la materia orgánica disuelta en un medio acuoso; dando como resultado biogás; componente energético empleado para la generación de electricidad, calefacción, etc. y un subproducto formado por una suspensión acuosa (Lodo), que puede ser usada como fertilizante orgánico – bioabono. Este lodo, rico en nitrógeno, fósforo y potasio; entre otros minerales, presenta una alta calidad agronómica, ya que mejora la absorción de nutrientes y promueve el crecimiento de tallos, frutos y raíces, gracias a las hormonas vegetales de crecimiento que forman parte de su composición.³

2.3.2. Funcionamiento del biodigestor

El funcionamiento de un biodigestor se encuentra ligado a la secuencia bioquímica de las transformaciones metabólicas del proceso, así como a una serie de factores que interfieren en el proceso, entre los principales, podemos mencionar a la temperatura, el pH, las concentraciones de sólidos y la composición del sustrato.

Según *Kunz, et al., (2004)* la biodigestión anaeróbica es un proceso conocido desde hace mucho tiempo y su uso en la producción de biogás para la conversión de energía es muy popular en países asiáticos como China e India.

El éxito de la digestión, es decir, su funcionamiento depende del equilibrio entre las bacterias de gas metano y de los ácidos orgánicos y esto viene dado por la carga diaria (sólidos volátiles), alcalinidad, pH, temperatura y calidad de la materia orgánico (*Oliveira & Otsubo, 2002; Oliveira, 2005*).

³Virginia García Páez. Dirección de Sustentabilidad, Medio Ambiente y Cambio Climático de la provincia de Buenos Aires. Manual de Biogás: Conceptos básicos. Página 10. Visto en línea en: [https://www.gba.gob.ar/sites/default/files/agroindustria/docs/Manual_de_Biogas01.pdf]

La entrada de antibióticos, insecticidas y desinfectantes en el biodigestor puede inhibir la actividad biológica al disminuir la capacidad del sistema para producir biogás (*Oliveira, 1983*). La formación de zonas de cortocircuito dentro del biodigestor y aislamiento de las bacterias del contacto con la mezcla en la biodigestión, también son factores que reducen la eficiencia del sistema y contribuyen a la sedimentación temprana del biodigestor y a la reducción de su vida útil. La agitación de la biomasa en el biodigestor puede aliviar estos problemas (*La Farge, 1995*).

Dependiendo de la temperatura a la que se realice el proceso, el tratamiento de los residuos orgánicos es básicamente de tres tipos: biometanización con temperatura entre 45-60 °C se considera termófilo, el que se produce entre las temperaturas de 20-45 °C es mesófilo y la digestión anaeróbica de la materia orgánica a baja temperaturas (<20 °C) se denomina digestión psicrófila.

La mayoría de los digestores anaeróbicos han sido diseñados en el rango mesófilo, aunque también es posible que funcionen en el rango termófilo. Sin embargo, la experiencia de operar digestores anaeróbicos en este rango no ha sido totalmente eficiente.

La puesta en marcha de un biodigestor es una tarea fundamental, dado que, si este proceso está mal conducido, el éxito de la operación del reactor será deteriorado o incluso frustrado (*Nascimento, 1995; Sánchez et al., 2005*).

El inicio del funcionamiento de un biodigestor está íntimamente ligado a la secuencia de las transformaciones metabólicas del proceso de digestión anaeróbica, que es una fermentación lenta, lo que implica un intervalo de tiempo, a veces muy largo, hasta que alcanza la estabilidad en el funcionamiento, es decir, el equilibrio armónico entre sus diferentes etapas (*Lucas Junior, 1994; La Farge, 1995*).

Souza, et al. (2002), evaluando la puesta en marcha de biodigestores de sobremesa alimentados con purines de cerdo, con 6 g/litro de sólidos totales, sometidos a tres diferentes temperaturas (25, 35 y 40°C) y la agitación del sustrato, concluyeron que las temperaturas de 35 y 40°C favorecieron la puesta en marcha de los biodigestores, ya que resultaron en una mayor producción acumulada de biogás. Según un estudio realizado sobre el efecto de la temperatura, en temperaturas de 20°C, 25°C y 30°C en el tratamiento de aguas residuales de biodigestores anaerobios secuenciales, la producción de metano disminuye cuando el digestor funciona a una temperatura de 20°C (*Massé & Masse, 2001*).

La generación de biogás dentro de un biodigestor es un proceso termodinámico, en el que se debe considerar el balance energético (*Souza, 2001*). Los cambios bruscos de temperatura pueden afectar negativamente al rendimiento de la digestión (*Parkin & Owen, 1986*).

Los microorganismos productores de metano son sensibles a las variaciones de temperatura, por lo que se recomienda asegurar su estabilidad, ya sea mediante calefacción

interna o un mejor aislamiento térmico de la cámara de digestión durante los meses de invierno. Este punto es muy crítico porque en los meses de invierno es cuando se presenta una mayor demanda de energía térmica y una tendencia de los biodigestores a producir menores volúmenes de biogás debido a las bajas temperaturas.

La pérdida total de calor desde la superficie de la interfaz del estiércol hasta las envolturas del biodigestor, en el espacio donde se acumula el biogás producido, se produce por procesos de conducción, convección y radiación (*Axaopoulos, et al., 2001*). Otra causa de cambios bruscos de temperatura es el aumento simultáneo de la concentración de todos los ácidos grasos volátiles, especialmente acético y propiónico (*Dohanyos, et al., 1985*).

El alcance del impacto depende de factores como la magnitud del cambio de la temperatura aplicado, el tiempo de exposición y la composición bacteriana del sustrato (*Van Lier, et al., 1996* y *Visser, et al., 1993*).

Según *Massé, et al. (2003)*, el rendimiento del biodigestor anaeróbico disminuye significativamente cuando la temperatura de funcionamiento desciende de 20°C a 10°C. En granjas, los biorreactores pueden estar sujetos a fluctuaciones de temperatura debido a grandes variaciones en la temperatura del aire ambiente (*Massé, et al., 2003; Oliveira, 2005*).

Por lo tanto, el calentamiento del sustrato en la digestión es necesario para una uniformidad en la temperatura del sustrato y, en consecuencia, una mayor eficiencia del biodigestor.

El calentamiento interno puede realizarse mediante la circulación de agua en un intercambiador de calor. Se debe controlar la temperatura para que el agua no supere los 54,4 °C, ya que se prevé la formación de incrustaciones del contenido del digestor en las tuberías (*Benincasa, et al., 1991*).

Cuando se utilizan sistemas de calefacción en un biodigestor, se debe analizar la cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura del sustrato y la cantidad de gas producido como resultado de este aumento de la temperatura. Si el aumento de la producción de biogás es inferior, igual o ligeramente inferior a la energía, el sistema de calefacción se vuelve inviable (*Axaopoulos & Panagakis, 2003; Energiahp, 2003*).

La percepción de que los biodigestores con grandes volúmenes (biomasa) producen grandes cantidades de biogás, no siempre es cierta. Sin embargo, el dimensionamiento del biodigestor debe ser compatible con la hidráulica, el tiempo de residencia, la temperatura de la biomasa, la carga de sólidos volátiles y las demandas de biogás en la propiedad (*Oliveira, 2005; La Farge, 1995*).

Los biodigestores con grandes gasómetros representan un riesgo de seguridad para los productores, debido a la acción mecánica de los vientos, aumentando el riesgo de fuga de gas y la posibilidad de una combustión incontrolable.

Al pasar por el biodigestor, el efluente pierde carbono en forma de CH₄ y CO₂ (Disminución de la relación C/N de la materia orgánica, lo que mejora las condiciones del material para fines agrícolas debido a la mayor solubilidad de algunos nutrientes).

Sin embargo, la aplicación del efluente debe tener en cuenta criterios agronómicos para evitar el impacto medioambiental. Costes de transporte, topografía ondulada, pequeñas explotaciones y la escasez de zonas agrícolas aptas para mecanización, constituyen un obstáculo para la optimización del uso de los residuos animales en forma de biofertilizantes (*Embrapa Cerdos y Aves, 2003; Oliveira, 2004b*).

2.4. Aspectos generales a considerar en proyectos de generación de biogás

Al iniciar un proyecto de digestión anaeróbica debemos considerar dos principios fundamentales: El tratamiento de desechos y la generación de energía consecuente. Si priorizamos una de estas ventajas sobre la otra implicará un sesgo importante al momento de diseñar un biodigestor. Si el objetivo está fijado sobre la generación de energía (térmica o eléctrica), lo que se buscará en el biodigestor es tener una eficiencia alta en relación con la cantidad de biogás producido por unidad de volumen de biodigestor.

Si se prioriza el tratamiento de un residuo, el foco estará fijado en la capacidad de degradación y en la obtención de un material tratado apropiado para la disposición final. De este modo el digestor podría ser considerado de baja eficiencia en cuanto a la producción de biogás.

Para llevar a cabo un proyecto de generación de energía renovable y/o tratamiento de efluentes a partir de los residuos, subproductos agrícolas o cualquier otro tipo de fuente de biomasa aprovechable, es necesario conocer diversos aspectos relevantes. A partir de las experiencias en campo, a continuación, se mencionan los diferentes ítems que deben ser considerados:

- Acceso a las fuentes tradicionales de energía: A qué distancia se encuentran y cuál es su costo.
- Disponibilidad de materias primas para la generación de energía: Conocer si estas se encuentran concentradas en un único espacio (por ejemplo, confinamiento de animales, como un corral de engorde de cerdos) o distribuidas en una superficie mayor (por ejemplo, cultivos agrícolas).
- Si existe o no un impacto ambiental adverso de los residuos en el entorno del establecimiento agropecuario: Esto implica conocer si hay un tratamiento de las corrientes de desecho y si este es apropiado logrando cumplir con los parámetros de calidad propuestos por el organismo de control pertinente.
- Disponibilidad de mano de obra: Para el manejo de las instalaciones.
- Propiedad del terreno: Conocer si el productor cuenta con terreno propio o bien arrienda el establecimiento agropecuario, y cuál es la superficie total del predio.

- Si es productor primario o realiza procesos de transformación de la materia prima (producción de quesos con la leche, chacinados en cerdos, procesamiento de frutas en la industria citrícola, entre otros).
- Conocimiento del productor: Sobre la tecnología a desarrollar, a fin de saber en qué medida necesitará de agentes externos (públicos o privados) que lo asistan técnicamente durante el proceso de diseño, instalación y puesta a punto.

Por ejemplo, en el caso de que el establecimiento se encuentre alejado de los centros poblacionales, la probabilidad de contar con energías convencionales (electricidad, gas) será menor. De este modo, contar con residuos confinados en una zona determinada del establecimiento, nos permitiría pensar en la posibilidad de tratar estos residuos minimizando el impacto ambiental y obteniendo, a su vez, el beneficio de generar energía renovable.

En el caso en que los residuos se encuentren dispersos en el predio, se deberá realizar una evaluación energética/económica para determinar cuál es el rédito obtenido al juntar los residuos para generar energía, relacionándolo con la cantidad de trabajo diario que implica dicha acción.

En caso de no satisfacer la demanda, se podría considerar el uso de otro tipo de materiales (cultivos agrícolas, residuos agroindustriales, etc.) con el objetivo de aumentar el rendimiento del digestor.

En este tipo de proyectos, debemos tener en cuenta también las características del entorno, como el clima (precipitaciones, temperaturas mínimas) y la topografía (pendiente del terreno, profundidad de las napas), porque influyen considerablemente en el desarrollo del proyecto.

2.5. ¿Qué hacen hoy los productores con estos residuos/efluentes?

En la actualidad, los técnicos y profesionales realizan un esfuerzo para establecer estrategias sobre el manejo de los residuos que mitiguen los impactos ambientales de las producciones animales intensivas. Los productores se esfuerzan por llevar a cabo una producción sustentable.

El Estado a través de sus organismos acredita la habilitación y el funcionamiento de los establecimientos esforzándose para que realmente se comporten como producciones sustentables. Pero lo cierto es que, por falta de datos y de desarrollos técnicos, en algunas jurisdicciones no existen normas claras que potencien el esfuerzo de todos los actores del sistema en disminuir los impactos ambientales y aumentar la eficiencia productiva.

Esta situación ha tomado mayor relevancia en los últimos años, dada las tendencias crecientes en las prácticas productivas de engorde de animales a corral (tambo, cerdo, feedlot y aves) y, en consecuencia, la generación y acumulación de grandes cantidades de residuos

(estiércol sólido o líquido) que es necesario retener, tratar, reutilizar o disponer de una manera adecuada.

En términos generales, el estiércol animal presenta elevados porcentajes de materia orgánica, nutrientes (como N y P) y sales; así como también en menor cantidad, metales pesados (Cu, Zn y Fe), restos de productos veterinarios (antibióticos) y patógenos (*Giardia*, *Escherichia coli*) (*García et al., 2013*). Cuando el estiércol acumulado en las diferentes producciones es movilizado por la dinámica hídrica puede alcanzar los cuerpos de agua y degradar su calidad (*García et. al., 2013 y 2015*) restringiendo su uso.

3. MARCO LEGAL

En la producción animal se encuentran restos de animales que no son utilizados para consumo, como por ejemplo: Sangre, grasas y purines como los principales componentes. Estos últimos pueden ser nocivos al ambiente por la materia orgánica, nutrientes y componentes químicos que contienen; y especialmente cuando su disposición final no es la apropiada.

Existe una gran heterogeneidad en la generación y composición de estos materiales. Especialistas de la temática realizan una diferenciación entre los términos purín y efluentes en virtud al contenido de materia seca⁴. En cuanto a su generación por número de animales, se acepta que estas deyecciones corresponden diariamente al 7% del peso vivo del animal, valor puede oscilar en función de dos factores principales: el manejo de la granja y la alimentación.

En virtud a las producciones pecuarias de la región pampeana, podemos destacar las siguientes corrientes de residuos:

- Las camas de aves, que se encuentran compuestas por: heces, orina, material absorbente, resto de alimento y plumas. El animal solo aporta entre 60 gramos (pollo parrillero) o 100 gramos (gallina ponedora) diarios. La tasa de generación está asociada a la limpieza del galpón, que se caracteriza por tener altos volúmenes y poca frecuencia.
- Excretas de cerdo: Oscilan entre 1 kg/d (lechón de 15 kg) a 4 kg/d (cerda de 125 kg o padrillo de 160 kg). Se encuentran constituidos por heces, orina y agua. Este último componente se incrementa cuando los animales se encuentran sobre piso de cemento o rejillas.
- Estiércol bovino: Es el mayor en volumen por número de animales con respecto a cerdos y pollos. Varían entre los 7 kg/d (ternero de 3-6 meses de edad) y 45 kg/d (vaca lechera de más de 2 años).

Los purines o efluentes pueden tener un alto contenido de materia inorgánica cuando los animales se encuentran encerrados sobre tierra, como en el caso del engorde a corral.

Al día de hoy, muchos establecimientos agropecuarios, que combinan agricultura con cría intensiva de animales, se encuentran utilizando este tipo de residuos como insumo, visto que una buena gestión de estos permite aumentar el contenido de materia orgánica y aportar estructura al suelo, incrementar el contenido de nitrógeno de la capa superficial y aportar micronutrientes que otros fertilizantes químicos no lo poseen. No obstante, si su implementación no es adecuada, pueden existir efectos adversos como la heterogeneidad en la respuesta del cultivo, el incremento de sales y microorganismos que compitan con aquellos que son benéficos y viven en el suelo.

⁴Salazar, 2011. "Los purines tienen entre 1 y 10% de materia seca y los efluentes menos del 1%"

Existiendo esta dualidad, es necesario contemplar planes de acción a nivel territorial que tiendan a ser una guía para los productores, o establecer parámetros para un adecuado uso de los residuos pecuarios en cultivos. Es aquí donde surge la siguiente pregunta ¿Existe alguna reglamentación que lo contemple?

3.1. Antecedentes internacionales

Nos podemos remontar al año 1997, en el que la **Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura** (FAO por sus siglas en inglés) publicó un documento en el que se establecen controles de calidad para el riego de cultivos con aguas servidas. Centra su atención en efluentes del tipo cloacales. La discusión en la cual se enfoca era en el gran número de patógenos (bacterias, virus, protozoos, helmintos, entre otros) que presentan, y el tiempo de vida media de estos organismos en el suelo. Establece la necesidad de analizar la interacción microorganismo-vegetal-ambiente para aprobar o desaprobar su uso. También recomienda analizar factores⁵ como temperatura, tipo de suelo y ausencia/presencia de otros microorganismos para saber si el impacto será negativo o positivo (*Shuval et al. 1986; Feachem et al. 1983 y Strauss 1985*). En relación a lo expresado anteriormente, el documento establece una escala de riesgo en función de las prácticas agronómicas y el tipo de cultivo a ser aplicado.

La **Comunidad Europea** posee una normativa extensa en materia de residuos provenientes de la producción animal (Reglamento 142/2011 y otras normativas vinculadas a ella), y dentro de ello las distintas pautas a tener en cuenta para la utilización de enmiendas orgánicas.

España es uno de los países que contempla aspectos legales para el uso de purines en la producción agropecuaria. Se establecen diversas alternativas de gestión de acuerdo a su composición, entre ellas el uso como fertilizante sin tratamiento previo, según lo determinado por el Decreto Real 261/1991.

Otra normativa del año 1996, que trata sobre fertilización y contaminación de las aguas por nitratos, dice que se puede aplicar la cantidad de estiércol proporcional a 170 kg/ha.año de nitrógeno. El Real Decreto 324/2000 es específico en porcinos, y en el mismo se recomienda al productor disponer de una balsa cerrada e impermeabilizada para el almacenamiento de purines, y que los mismos puedan ser aplicados a distancias mayores de los 200 metros de centros urbanos.

Alemania también generó normativas haciendo especial énfasis en el nitrógeno, estableciendo límites iguales a los establecidos por España (170 kg N/ha.año). Expresa, además,

⁵Factores que se tienen en cuenta:

- *Temperatura: a bajas temperaturas, mayor supervivencia. En el rango de los 20-30º C un virus puede sobrevivir entre 50 y 120 días; la bacteria salmonella 30-60 días.*
- *Tipo de suelo: suelos alcalinos, buena retención de humedad, alto contenido de materia orgánica y cobertura favorecen la supervivencia de virus y bacterias.*

que estas aplicaciones deben hacerse en virtud a las buenas prácticas agrícolas, a las necesidades de la planta y de los nutrientes que deben reponerse en el suelo.

Australia y Nueva Zelanda trabajan fuertemente con esta temática, con lineamientos similares a los anteriores.

En los **EEUU**, la ley del Agua Limpia, administrada por la **Agencia de Protección Ambiental** (EPA por sus siglas en inglés), regula la aplicación de residuos animales a cultivos y pasturas. Exige al productor desarrollar e implementar un plan para el manejo de nutrientes (nitrógeno, fósforo o potasio). Además, establece la obligación de solicitar un permiso de aplicación que incluya, como mínimo, las siguientes prácticas⁶:

- Almacenaje adecuado del estiércol tanto sólido como líquido.
- Manejo de los animales muertos.
- Evitar que químicos usados in-situ no sean desechados con los residuos.
- Usar protocolos apropiados para el examen de muestras.
- Establecer parámetros que aseguren la utilización agronómica de los nutrientes.

En Latinoamérica, **Brasil, Chile y Colombia** se destacan por fomentar el uso de enmiendas orgánicas en suelo. Existe diversidad en sus normativas, visto que generalmente se legisla sobre digeridos, compostaje y en algunos casos sobre los residuos almacenados. En los tres países estas pautas son de carácter estatal/provincial, existiendo a nivel nacional una referencia categorizada como ley de presupuestos mínimos.

3.2. Normativa Nacional

En Argentina existen normativas de presupuestos mínimos a nivel nacional para los Residuos Peligrosos (Ley 24.051), Residuos Industriales (Ley 25.612) y Residuos Sólidos Urbanos (Ley 25.916), no es así para los residuos de la producción agropecuaria, aunque muchos de los generados por la actividad pueden estar incluidos dentro de las dos primeras leyes. Los residuos pecuarios son una temática que se encuentra en tratamiento a nivel nacional.

Algunas normativas mencionan aspectos del uso agronómico, como la ley 20.466 (Elaboración, fraccionamiento, distribución, importación y exportación de fertilizantes y enmiendas; Artículo 15 del decreto reglamentario) y la Resolución 410/18, que es para el manejo de barros de plantas de tratamiento de efluentes cloacales y mixtos cloacales-industriales.

En lo particular, **Córdoba** fue la provincia pionera en regular el uso de los residuos pecuarios. En el Decreto 847/2016 (capítulo VI) se establecen una serie de estándares para el reúso de efluentes líquidos. El artículo 28 expresa la aplicación controlada de los efluentes provenientes de actividades agropecuarias en suelo (riego o uso agronómico). Lo novedoso de

⁶Szögi, A. A., & Vanotti, 2003. Utilization of nutrients from animal manure: legislation and technology solutions. *Journal of Soils and Sediments*, 3(4), 260-262.

esta normativa radica en el ANEXO III “Reúso de efluentes tratados”, donde se especifica una estabilización previa a ser utilizado. Existe, además, una escala descendente de riesgo para la salud de las personas, que van desde reúso urbano (riego de zonas verdes) a reúso en la construcción⁷.

Sin embargo, esta normativa no es exclusiva de enmiendas orgánicas, y orienta el uso de los efluentes para riego (no para fertilización) ya que los volúmenes a disponer en un determinado establecimiento serían elevados para cubrir las dosis nutricionales. Debido a esto se crea una nueva resolución orientada específicamente a las enmiendas orgánicas, la Resolución 029/2017. Se establece al recurso suelo como cuerpo receptor, y las enmiendas pueden ser aplicadas:

- En suelos destinados a cultivos hortícolas que no se encuentren en pie.
- En producciones destinadas a consumo humano directo, se debe evitar el contacto con el órgano comercial.
- Cuando es aplicado en cultivos que no son destinados a consumo humano directo, se puede aplicar en cualquier estado fenológico.

Se mencionan 4 actores principales: el generador, el efluente, el destino y su utilización. El tiempo de estabilización para un efluente líquido propuesto es de 120 días en lagunas impermeabilizadas, y en cuanto al residuo sólido, debe asegurarse la estabilización térmica. Para el uso agronómico, se deben especificar la zona de aplicación (mapa del suelo, textura, pendientes), cultivos a los cuales se aplicará y la forma en hacerlo. Por otro lado, se exige realizar un balance de nitrógeno, un balance hídrico y dos tipos de riesgo respecto a las sales: riesgo de salinización y sodificación. Se prohíbe o restringe el uso agronómico en las siguientes situaciones:

- Cuando la permeabilidad del suelo es mayor a 10-3 cm/s.
- Cuando existe afloramiento freático.
- A menos de 30 metros de la ribera de los ríos y cursos de agua superficiales.
- Áreas con pendientes superiores al 15%.
- Áreas vecinas a centros poblados.
- Áreas con riesgo de salinización.

⁷Tipo 1: Reúso urbano: riego de zonas verdes, lavado de autos, combate de incendios; Tipo 2: Reúso para riego con acceso restringido: Cultivo de césped, silvicultura, y áreas donde el acceso del público es prohibido, restringido o poco frecuente; Tipo 3: Reúso agrícola en cultivos de alimentos que no se procesan comercialmente (verduras y frutas frescas); Tipo 4: Reúso agrícola en cultivos de alimentos que se procesan comercialmente: previo a su venta al público, han recibido el procesamiento físico o químico que destruyen los organismos patógenos; Tipo 5: Reúso agrícola en cultivos no alimenticios: Riego de pastos para ganado lechero, forrajes, cultivos de fibras y semillas y otros cultivos no alimenticios; Tipo 6: Reúso recreativo: Contacto incidental (pesca, canotaje, etc.), y contacto primario con aguas regeneradas; Tipo 7: Reúso paisajístico: El contacto con el público no es permitido, y dicha prohibición esté claramente rotulada; Tipo 8: Reúso en la construcción: Compactación de suelos, control del polvo, lavado de materiales, producción de concreto.

En la provincia de **Buenos Aires**, el estiércol (tanto líquido como sólido) no está definido como residuo especial (Ley 11.720), ni como residuo patogénico (Ley 11.347), tampoco como residuo industrial (Ley 11.459) y menos aún como residuo sólido urbano (Leyes 13.592 y 14.273), con lo cual a las producciones de animales en confinamiento no se le aplican los requisitos de otras actividades económicas en lo referido a sus aspectos ambientales (García et al. 2016). Existen guías de buenas prácticas para los purines generados en los tambos, donde se establecen requerimientos en la aplicación de los mismos como fertilizante, o bien pautas para su tratamiento.

Entre Ríos se caracteriza por concentrar un alto núcleo productivo de pollos parrilleros de la Argentina. Si bien no posee legislación referida a la producción porcina la Secretaría de Ambiente de esta provincia solicita detalles de los tratamientos y disposición final de la cama de pollo y guano de gallina para otorgar el Certificado de Aptitud Ambiental a las granjas (Decreto 4977/09) y su correspondiente habilitación. Para ello, solicita que el manejo y disposición final de estos residuos estén bajo los criterios expuestos por SENASA, a través de las resoluciones 542/2010 y 106/20134.

3.3. Normativa Provincial

En la provincia de **Santa Fe** se cuenta con la ley marco N° 11.717 de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable. En materia de residuos, la Resolución 0069/98 regula los residuos patológicos, el Decreto 1844/02 lo referido a Residuos Peligrosos, el Decreto 2151/14 los Residuos Industriales no Peligrosos y de Actividades de Servicios.

Ninguna de estas normativas incorpora de manera específica y central a los residuos pecuarios. A partir del año 2016, el **Ministerio de Medio Ambiente de la provincia de Santa Fe** junto con otros organismos públicos (Universidades, INTA, CONICET) y privados (empresas Agroalimentarias de la región), conformaron un equipo de trabajo para investigar e indagar sobre aspectos vinculados a esta temática. Se realizaron distintas reuniones, en las que se revisaron las normativas ambientales provinciales anteriormente mencionadas y otras que pueden verse comprometidas, como la Resolución 1089/82 de efluentes líquidos. En la Figura 2 se puede observar un resumen de las normativas provinciales vinculadas a los residuos.

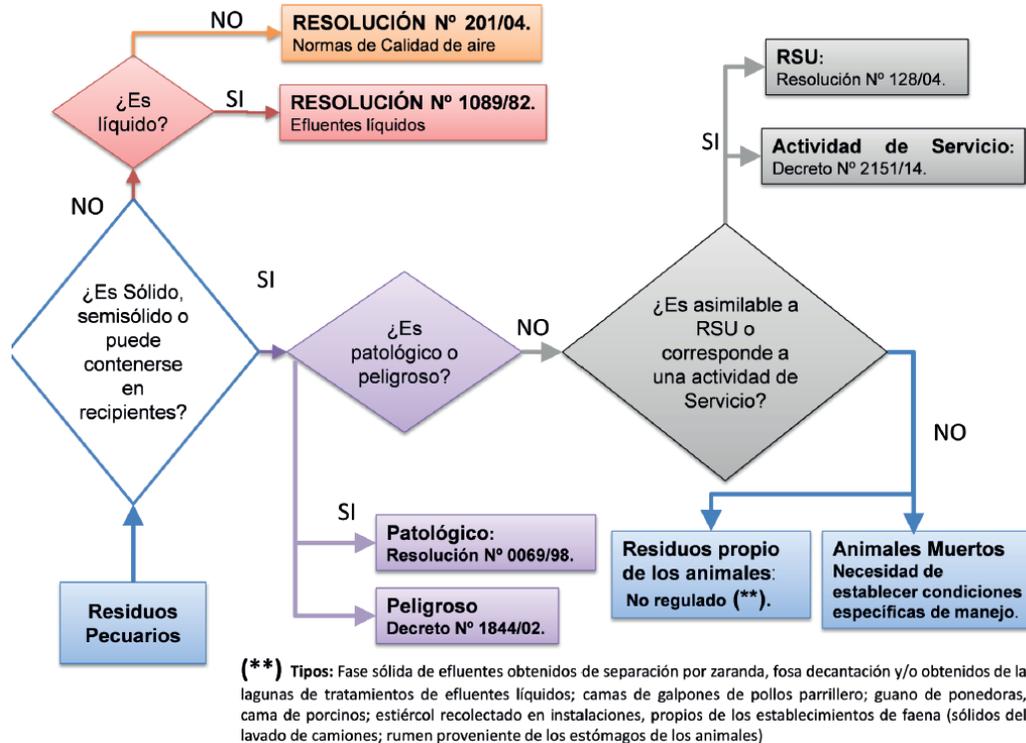


Figura 2 - Marco legal sobre residuos de producción agropecuaria de la provincia de Santa Fe.

Se determinó que el objetivo principal de la nueva normativa a desarrollar deberá ser el principio de protección y preservación de los recursos naturales, y el aprovechamiento sustentable de los residuos pecuarios como recurso agronómico. También se elaboró una primera definición de residuos pecuarios:

“Aquellos generados por las actividades de la ganadería, que incluye al engorde, cría intensiva y sectores de faena de bovinos, porcinos y aves para la producción de carnes, huevos y leche; los animales muertos que se generan en la misma y otras externalidades que puedan surgir en estos procesos” (La legislación de Córdoba excluye los animales muertos de los residuos pecuarios).

Se clasificaron las corrientes de residuos pecuarios que deberán ser reguladas específicamente desde lo ambiental, como: la fase sólida de los efluentes pre - tratados y tratados (ej: separación por zaranda, cámara o fosa de separación de sólidos y barros o lodos obtenidos de lagunas de tratamientos de efluentes líquidos), camas de galpones de pollos parrillero, guano de ponedoras, cama de porcinos, estiércol recolectado en instalaciones de faena como ser los sólidos del lavado de camiones, zaranda, rumen proveniente de los estómagos de los animales y otros a estudiar.

La realidad es que muchos establecimientos están comenzando a combinar la producción animal con la de granos e implementando distintas tecnologías para su dosificación en el suelo, tanto dentro del establecimiento como por fuera de los límites del mismo. Se deben

evaluar estas prácticas en el tiempo, monitorear las características de los residuos y realizar un cronograma de dosificación agronómica acorde a las exigencias del suelo y del cultivo. Son cuestiones que todas las jurisdicciones deben contemplar en sus normativas para evitar un impacto medioambiental.

4. FORMULACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Planteo de la problemática general

En este trabajo, nos enfocaremos principalmente en dos problemáticas diferentes pero que se encuentran relacionadas con el fundamento de la investigación; el aumento creciente de la demanda energética debido a la exigencia de mejorar las instalaciones en la producción porcina confinada y; por otro lado, la inexistente gestión de los residuos que deriva en una afección del medio ambiente.

4.1.1. Problemática energética en la producción porcina

El gran reto de las regiones con una alta concentración de animales es la sostenibilidad medioambiental y energética. Por un lado, sabemos que en la actualidad existe una cierta presión para el productor en concentrar la mayor cantidad posible de animales en pequeñas zonas de producción y en el aumento de la productividad y, por otro, que este aumento no afecte al medio ambiente. La restricción de espacio, la necesidad de satisfacer una demanda energética que se encuentra en aumento, agua de buena calidad y alimentos, han planteado algunos paradigmas a superar que están relacionados principalmente con la cuestión medioambiental y la disponibilidad de energía.

4.1.2. Gestión inadecuada de residuos

El desarrollo de las sociedades industrializadas ha traído aparejado ventajas indiscutibles y de forma paralela desventajas ineludibles. Entre las primeras, el nivel y calidad de vida ha aumentado en forma considerable para un gran porcentaje de individuos de la población mundial, lo que ha implicado a su vez el desarrollo y oferta de nuevos productos manufacturados y servicios de diferente índole, siendo la causa de la aparición de todo tipo de residuos, los cuales deben ser reutilizados, reciclados o en el peor de los casos eliminados.

Sabiendo que cada habitante genera casi un kilo de residuo sólido urbano por día, es indispensable generar un cambio conceptual, incorporando la perspectiva de que los residuos no son siempre un desecho a destruir sino también un posible recurso o materia prima que se puede valorizar, en este caso energéticamente.

4.2. Interrogantes

En este contexto los interrogantes principales que guían la investigación son:

¿Es posible aumentar el rendimiento en la producción de biogás mediante la codigestión de purines y materias primas residuales? ¿En caso de serlo, los rendimientos obtenidos son los adecuados para llevar adelante su implementación? ¿En qué parte del proceso se podrían incluir? ¿Es rentable añadir un tratamiento posterior con los efluentes de descarga actuales del biodigestor?

4.3. Hipótesis

4.3.1. Problemáticas específicas

Las problemáticas específicas sobre las cuáles se planteó el desarrollo de la investigación son, en primer lugar, la necesidad del productor por satisfacer una demanda energética creciente debido a las exigencias en la producción animal, considerando factores como la restricción de espacio.

A su vez, la gestión escasa o inexistente de residuos, derivando en el desperdicio absoluto de materia prima valiosa como así también en daños al medio ambiente debido a la contaminación de cursos de agua superficiales o subterráneas, suelos y emisión de gases GEI.

4.3.2. Hipótesis

Se plantea como hipótesis central de la investigación:

“Obtención de un aumento significativo en la producción de biogás co-digiriendo materias primas residuales con purines de cerdo.”

4.4. Objetivos

4.4.1. Objetivos generales

El objetivo general de la investigación es lograr un aumento en la producción de biogás.

Mediante la confección de un documento técnico se analizará la viabilidad técnica del añadido de materias primas residuales en un biodigestor que funciona a base de purines de cerdo mediante el estudio del biodigestor tipo “Laguna cubierta” que se encuentra en el establecimiento de un productor porcino de Chañar Ladeado, Santa Fe.

Por otro lado, en el caso de obtener buenos resultados en el rendimiento de la codigestión de la materia prima residual elegida y los purines de cerdo, se realizará un análisis comparativo con la producción de biogás generada aplicando otros tipos de tratamientos realizados con los purines o efluentes actuales.

Así mismo, se analizarán los resultados obtenidos en los distintos ensayos con el fin de evaluar alternativas y posibilidades de mejora en el tratamiento actual de los efluentes porcinos.

4.4.2. Objetivos específicos

- Estudiar la generación actual de los efluentes porcinos en las etapas representativas del proceso mediante ensayos de potencial de producción de biogás.

- Evaluar la codigestión de purines y materia prima residual evaluando diferentes tratamientos en reactores del tipo “batch” utilizando el sistema de medición por desplazamiento volumétrico.
- Cuantificar la composición del biogás producido en función del % CH_4/CO_2 , mediante ensayo en continuo utilizando un baño termostático. Se utilizará el sistema de medición por desplazamiento volumétrico para medición de biogás total y CH_4 . En el sistema de medición de CH_4 se adicionará un tratamiento intermedio de captura de CO_2 por burbujeo en solución alcalina.
- Realizar una comparativa de la codigestión de la materia prima residual y purines porcinos con distintos tratamientos variando el TRH de los reactores.
- En caso de ser rentable la codigestión, se analizará en planta cuál es la viabilidad técnica de incorporar la materia prima residual en el proceso existente.

4.5. Plan de trabajo

4.5.1. Cronograma de trabajo

En el [Anexo 1: Cronograma de trabajo](#) se encuentra el cronograma que muestra el desarrollo de las diferentes etapas abordadas antes y durante la investigación a lo largo del tiempo.

Durante las semanas iniciales se realizará la elección de la temática a investigar, la búsqueda y lectura de diferentes bibliografías realizando un relevamiento inicial de datos evaluando antecedentes relacionados al proyecto de generación de biogás implementado en el productor porcino de Chañar Ladeado, Santa Fe; como así también, de otro proyectos vinculados a la generación de biogás a partir de desechos de la producción animal y/o codigestión de desechos de producción animal y otros sustratos.

A partir de la información recolectada y tomando contexto de la situación del productor se procederá al planteamiento de la problemática, interrogantes, hipótesis y objetivos.

Continuando con el desarrollo de la investigación se realizará el trabajo de campo correspondiente al relevamiento visual, fotográfico e interiorización de conceptos correspondientes al sistema de producción de biogás implementado en el establecimiento del productor. Dentro de esta etapa, se encasillan el muestreo, los ensayos realizados, y la recolección y registro de datos obtenidos durante el desarrollo de los mismos.

Durante las últimas etapas de la investigación y posterior a la finalización de ensayos se realizará un análisis de resultados para cada ensayo. A modo de conclusión o reflexiones finales, se exponen los factores o condicionantes que se han encontrado a lo largo de la investigación en los diferentes niveles de análisis, dando respuesta a los objetivos planteados.

Posterior a las conclusiones se realizará pre-entrega del documento de investigación al director de carrera o tutor académico correspondiente con la finalidad de su evaluación y determinación de correcciones de ser necesario.

4.6. Elección de un productor para el desarrollo de la investigación

4.6.1. Trabajo con el INTA

La elección del productor se realizó mediante la propuesta al productor por parte del profesional del área de energías renovables del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) de Venado Tuerto. Previa a la realización de la propuesta, el profesional ya se encontraba colaborando y llevando a cabo el proyecto implementado años anteriores acerca de la generación de biogás a partir de purines de cerdo.

4.6.2. Actividad principal del productor

“NICOLINO ENRRE LUIS E HIJO” es una empresa familiar de la Localidad de Chañar Ladeado, Santa Fe que genera valor agregado en origen, transformando los granos en carne de cerdo. Cuenta con un campo propio de 32 Ha ubicado en la zona rural de Chañar Ladeado; a unos 5 km del éjido urbano hacia el norte de esta localidad, donde 8 Ha son destinadas a la cría intensiva de cerdos.

Sus orígenes se inician en la década del 70, con la producción porcina a campo o en corrales de tierra; llegando al lechón como producto final y venta a comercios locales. Con el correr de los años el sistema productivo se fue intensificando y hoy el establecimiento cuenta con 15 galpones donde se desarrollan las distintas etapas del ciclo productivo: gestación, maternidad, recría y engorde. El criadero cuenta con un total de 450 madres, realizando el ciclo completo y comercializando carne en el mercado interno nacional. En los últimos años se incorpora la actividad agrícola en cultivos de soja, maíz y trigo que se utilizan como insumo para el criadero y venta; como así también la prestación de servicios agrícolas (siembra y cosecha de cultivos extensivos) a productores locales.

Hoy es la tercera generación familiar la que se encarga de gestionar la empresa, incorporando mano de obra para el manejo del establecimiento; vinculándose fuertemente con PYMES locales para la mejora de la infraestructura del criadero. Esto permite aportar al desarrollo local de Chañar Ladeado y poblaciones vecinas.

La Empresa pretende acompañar el crecimiento nacional de consumo de carne porcina mediante una producción eficiente, en la cual la tecnificación del sistema, la automatización de los procesos y la capacitación del personal son los pilares para lograr este objetivo. A través de la visión y los valores infundidos en sus orígenes, Nicolino ENRRE Luis e Hijo SRL busca ser un actor principal en la producción de carne porcina santafesina, como así también un modelo a

seguir en la gestión de los efluentes generados y la generación de fuentes renovables de energía a través del aprovechamiento de los residuos.

Este proyecto tuvo una alta implicancia local, ya que Chañar Ladeado fue en sus orígenes Capital Nacional de la producción porcina, y es una de las zonas de la Provincia de Santa Fe que concentra un elevado número de cabezas de cerdos. La existencia de un proyecto local exitoso permite la replicación de la tecnología en otros productores; la generación de mano de obra calificada para el manejo de efluentes; generación de capacidades locales en otras Pymes que respondan a requerimientos operativos del digestor, la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero y el menor uso de fuentes convencionales de energía.

4.6.3. Participación del INTA en el proyecto de generación de biogás

Si bien la digestión anaeróbica es una tecnología que se encuentra difundida en diversos ámbitos, existen ciertos detalles que para la pequeña y mediana escala no se encuentran resueltos.

Uno de ellos es la purificación del biogás, es decir, obtener un producto que pueda ser transformado en energía sin que dañe el generador. Para ello es necesario diseñar un sistema que permita extraer el ácido sulfhídrico y el vapor de agua, a fin de aumentar su vida útil. En la pequeña escala estos sistemas son muy sencillos y de bajo costo, visto que generalmente el uso del biogás es para calefacción o cocción de alimentos. En gran escala, se utiliza la tecnología "llave en mano", en la cual se utilizan materiales costosos (carbón activado, lavadores a presión, enfriadores). En la escala del proyecto en cuestión, fue necesario desarrollar tecnologías apropiadas que permitieran realizar esta purificación.

A través de las distintas participaciones en las ferias agropecuarias como EXPOAGRO y AGROACTIVA, el INTA se contactó con profesionales que tienen conocimientos en la temática de biogás. Esto permitió realizar los primeros cálculos de dimensionamiento de la obra y el inicio de la solicitud de presupuestos para el movimiento de suelo y cobertura del digestor.

Los monitoreos y controles básicos del digestor (pH, FOS-TAC, Sólidos Sedimentables) pudieron ser realizados in situ por el productor. Para análisis específicos del inóculo (Potencial de producción de biogás, materia orgánica, nutrientes), del biogás (composición porcentual de gases) y del digerido (nitrógeno, fósforo, potasio y otros micro elementos) fue necesario contar con laboratorios de INTA que realizaran estos análisis.

Estudiar la eficiencia del digestor a fin de verificar cuánta materia orgánica se transforma en energía es de suma importancia ya que de esta manera se valida una tecnología que puede estar al alcance del productor. Para ello fue necesario realizar un análisis de factibilidad técnica, económica y financiera. Se contó con profesionales del área de las Ciencias Económicas lo que facilitó este tipo de estudios.

Como la localidad de Chañar Ladeado cuenta con talleres metalmecánicos que provisionan de equipamiento al sector agropecuario en general y al porcino en particular, se previó que estas mismas empresas podrían fabricar los accesorios necesarios para el digestor; realizar el movimiento de suelos, el tendido de energía eléctrica y parte de la obra civil.

Fue necesario además, contar con un vínculo fluido con el Ministerio de Ambiente y Cambio Climático de la Provincia de Santa Fe, a fin de conocer cuáles eran los requisitos legales del emprendimiento; y evaluar de manera conjunta la factibilidad ambiental de que esta tecnología pudiera ser replicada en otros ambientes de la Provincia.

Un profesional del área de las Ciencias Agrarias permitió establecer un plan de gestión adecuado para el uso del digerido en los lotes de producción agrícola, con la finalidad de poder utilizar de manera correcta los nutrientes que en el mismo se encuentran.

El área de comunicaciones del INTA y los medios locales posibilitaron realizar la difusión del proyecto a otros actores del territorio, a fin de que el mismo llegue a esos canales. Este aspecto es de vital importancia para que el proyecto pueda ser replicado por otros productores de características similares.

4.6.4. Estado de situación del proyecto de generación de biogás

El proyecto implementado y llevado a cabo en conjunto con profesionales del INTA permitió realizar una mejora en la calidad del efluente, reducir los costos asociados al consumo de energía eléctrica, y dar respuesta a una vacancia tecnológica a través de un biodigestor diseñado para el mediano productor si bien aún existen ciertas ineficiencias en la purificación del biogás y en la producción de energía eléctrica.

El criadero de cerdos se encuentra en funcionamiento, con todas las habilitaciones necesarias desde el punto de vista de sanidad, comercialización y gestión económica. Si bien la implementación del digestor permitió mejorar este sistema y utilizar la corriente de efluentes para fines energéticos; el manejo actual de efluentes es poco eficiente, ya que se han detectado parámetros de vuelco o fertilización que continúan estando fuera de los especificados. Ello da cuenta de la necesidad de mejorar el sistema.

4.6.5. Descripción del establecimiento y caracterización del sistema

El establecimiento agropecuario se encuentra ubicado en la zona rural de Chañar Ladeado, Santa Fe. Posee una superficie total de 32 hectáreas, de las cuales 8 hectáreas están destinadas a la cría de cerdos, almacenamiento de alimento y servicios generales. En cuanto a la producción agrícola, la misma es la tradicional de la zona, con rotación de trigo/maíz/soja.

La intensificación de la producción de cerdos en el establecimiento agropecuario de NICOLINO ENRRE LUIS e HIJO trajo como consecuencia la generación de efluentes líquidos, que

actualmente alcanzan un promedio de generación de 90 metros cúbicos diarios, y tienen una concentración de DQO que oscila entre los 12.000 y 20.000 mg/l. El efluente digerido del biodigestor se descarga en un sistema de lagunas de tratamiento y posee un valor de DQO de 3400 mg/l.

El criadero cuenta con 450 madres, siendo la producción por bandas de cerdas inseminadas artificialmente. Todo el sistema de producción es confinado, contando con pisos del tipo "full slats". La limpieza en los galpones consiste en vaciar la fosa que se encuentra debajo del piso de rejilla. La frecuencia de limpieza es mensual en maternidad y gestación; cada 45 días en recría y cada 20 en engorde.

Esta operación se realiza quitando los tapones que se encuentran por fuera de las instalaciones. La misma, en condiciones normales, es discontinua ya que solo se producen corrientes líquidas cuando se vacían las fosas de los galpones. Por gravedad, el líquido (mezcla de agua, orina y estiércol de cerdo) se dirige por medio de cañería de 160 mm de diámetro hacia una fosa. En una primera etapa los efluentes se derivarán a una laguna de recepción de 200 m³, que funciona como ecualizador y permite dosificar mediante una bomba sumergible un caudal constante hacia el digestor. En la misma se realizará la separación de los materiales que no sean apropiados para el proceso.

El biodigestor instalado consiste en un digestor del tipo "laguna cubierta" y tiene una capacidad de 2.500 m³. En el mismo se derivan los efluentes para realizar una depuración de la materia orgánica y aprovechar el biogás generado para su transformación en energía eléctrica.

Para evitar zonas "muertas" se realiza una recirculación del efluente a través de la captación del mismo por una bomba exterior y se lo impulsa hacia un distribuidor elevado, que "inyecta" el líquido en múltiples puntos de la laguna distribuyendolo por mangueras.

Transcurrido el tiempo de retención, por medio de una bomba se envía la descarga del biodigestor hacia un sistema de lagunas; el cual consiste en 4 lagunas conectadas en serie de 40mx20mx3m de profundidad, y no se encuentran impermeabilizadas ni cubiertas. Por diferencia de nivel los efluentes líquidos pasan de una laguna a otra. El digerido se deposita en las lagunas de tratamiento, a fin de tener la posibilidad de almacenarlo para luego poder ser aplicado en el campo como insumo de nutrientes para los cultivos actuales.

El biogás se transforma en energía eléctrica a través de un generador, utilizada para consumo en el mismo establecimiento agropecuario; especialmente en los procesos de refrigeración de los galpones y molienda de granos para alimentos. Para ello es necesario realizar una purificación previa y quitar el ácido sulfhídrico y el vapor de agua que pueda generarse. Este proceso se realiza filtrando previamente los gases mediante un filtro biológico, un secador y una columna de carbón activado. Una vez realizado este proceso se alimenta un generador adaptado para recibir biogás.

El proceso descrito anteriormente se puede observar en el [Anexo 2: Diagrama de flujo de procesos](#).

4.6.6. Diagnóstico

La empresa, a través de convenios de asistencia técnica con el INTA, realizó un estudio de generación de volumen de efluentes y su potencial producción de biogás. Se detectó que diariamente el criadero genera 90 metros cúbicos de efluentes líquidos, dentro de los cuales entre el 10 y 20% son sólidos sedimentables. A través del ensayo del máximo potencial de producción de biogás (BMP) se pudo determinar que se generan 3,8 litros de biogás por litro de efluente, lo que indica que se pueden obtener entre 300 y 350 metros cúbicos diarios de biogás, que transformado a energía; representa el 80% del consumo del criadero.

El establecimiento de NICOLINO ENRRE e HIJOS posee actualmente 4 lagunas conectadas en serie para el manejo de los efluentes. El sistema de tratamiento no cuenta con un sistema para la separación de sólidos (Decantador; centrifugador o tamiz) por lo que las lagunas tienden a colapsar. Se realizaron algunos monitoreos de efluentes y se detectó que previo al vuelco, la concentración de DBO y DQO se encuentran por encima de los parámetros establecidos por la Resolución 1089/82. Esto hace pensar que es necesario rediseñar el manejo actual de efluentes.

Por último, el consumo mensual de energía eléctrica del establecimiento agropecuario es de 30.000 KWh/mes. Esto impacta en los costos operativos del criadero de cerdos.

5. JUSTIFICACIÓN DE INVESTIGACIÓN

5.1. ¿Cómo se puede hacer más eficiente el biodigestor?

Tal y como se desarrolla el tema central de la investigación, en éste apartado se analizan las diferentes opciones que pueden llegar a ser implementadas por el productor en cuestión para aumentar la producción de energía eléctrica. Luego de desarrollar las alternativas, se especifican y determinan las cuestiones por las cuales serían o no viables y el por qué de la elección.

Se mencionan diferentes alternativas a considerar:

5.1.1. Calefaccionando el efluente con el biogás generado

Una opción consiste en calefaccionar previamente los $90m^3$ de efluente diario generado en los galpones. Se debe proveer energía en forma de calor para cubrir dos aspectos: la energía necesaria para calentar mezcla de estiércol-agua y, también, la energía necesaria para cubrir las pérdidas de calor de la mezcla por las superficies del biodigestor (fondo, paredes y techo). Considerando una temperatura de salida de los galpones de $20^{\circ}C$ debemos elevar el efluente a $35^{\circ}C$ para que el efluente se encuentre dentro de los rangos óptimos de operación y aumentar la producción, debido a la disminución del TRH.

Por otro lado, según las leyes termodinámicas sabemos que; en condiciones normales 1 kilogramo de agua necesita 1 kilocaloría para que su temperatura aumente $1^{\circ}C$, es decir, su calor específico es de $1 \text{ kcal}/^{\circ}C \cdot \text{kg}$. Al tratarse de un efluente con una composición de sólidos aproximada del 1%, podemos considerar que el efluente posee la misma densidad que el agua, siendo esta, ligeramente superior. Según varias fuentes la densidad de los purines porcinos es de $1.014 - 1.040 \text{ kg}/m^3$. Es decir, $90 m^3$ es igual a 93.600 kg diarios de purines.

A continuación se realiza un cálculo de las kilocalorías necesarias para elevar la temperatura de $20^{\circ}C$ a $35^{\circ}C$ ($\Delta T=15^{\circ}C$):

$$Q = m \cdot cp \cdot \Delta T = 93.600 \text{ kg} \times 1 \frac{\text{kcal}}{^{\circ}C \cdot \text{kg}} \times 15^{\circ}C = 1.404.000 \text{ kcal}$$

Dónde:

- m = masa (kg)
- cp : calor específico ($\text{kcal}/^{\circ}C \cdot \text{kg}$)
- ΔT = Variación de la temperatura ($^{\circ}C$)

Entonces, en una situación ideal sabemos que necesitamos una energía calórica de 1.404.000 kcal diarias para elevar la temperatura del efluente. A este valor se le suman las pérdidas de calor. A partir del dato de la energía calórica mínima necesaria, procedemos a calcular el calor que puede ser obtenido del biogás generado diariamente. Basándonos en los

ensayos realizados, se obtuvo una relación de $1,26 \frac{m^3 \text{ biogás}}{m^3 \text{ de purines}}$ para el efluente actual, lo que equivale a $113,4 \frac{m^3 \text{ biogás}}{\text{día}}$. Considerando una composición del 60% de metano en el biogás obtendremos $68 \frac{m^3 \text{ CH}_4}{\text{día}}$. Conociendo este valor y sabiendo que la densidad del metano es de $0,657 \text{ kg/m}^3$ y su poder calorífico de 11.973 kcal/kg procedemos a calcular el calor (Q) obtenido de la producción diaria de metano, siendo la producción de calor 535.220 kcal/día .

En una situación ideal y considerando una composición de metano/biogás del 75% obtendríamos 669.025 kcal/día , siendo este valor equivalente a un aumento de temperatura de $7,5 \text{ °C}$ (Sin considerar las pérdidas de calor), lo cuál no sería suficiente.

A partir de todo lo descrito, nos quiere decir que implementar un sistema de calefacción del efluente para aumentar la producción de biogás no sería factible ya que no sería posible elevar la temperatura del efluente a 15°C aún utilizando todo el biogás generado. Esto se debe a que el volumen de efluente generado es muy grande y se necesita mucho calor.

5.1.2. Mejorando el sistema de agitación

Implementar un sistema de agitación en el biodigestor podría ser una alternativa, ya que estos sistemas ayudan a distribuir el sustrato por todo el sistema ayudando a que las bacterias entren en contacto con el mismo debido a que induce la mezcla completa y la homogeneización del sustrato. Esto favorece una mayor y más rápida digestión de la biomasa, acortando los tiempos de retención hidráulica, e incrementando en consecuencia la producción de biogás.

Los sistemas de agitación que pueden ser considerados para este tipo de sistemas incluyen, la instalación de una bomba de mayor potencia, agregar varias bombas de potencia menor en diferentes puntos del biodigestor o añadir agitadores mecánicos dentro del biodigestor para homogeneizar la mezcla.

Implementar cualquiera de estos sistemas de agitación puede complejizar el sistema e implica rediseñar el sistema instalado actualmente, debiendo realizar diferentes obras sobre el digestor (Rotura, apertura y modificaciones de la membrana, instalación de agitadores, etc).

Lo descrito anteriormente, no es muy viable, ya que todas estas obras; al igual que los nuevos equipos implican una inversión elevada. Adicionalmente el funcionamiento de estos sistemas de agitación conlleva un gasto energético asociado que disminuye el rendimiento energético neto del biodigestor; lo cuál se contradice con los fines de esta investigación.

5.1.3. Agregando otro sustrato

En caso de no satisfacer la demanda, se podría considerar el uso de otro tipo de materiales (cultivos agrícolas, residuos agroindustriales, R.S.U. etc.) con el objetivo de aumentar el rendimiento del digestor sin modificar los parámetros de funcionamiento. El enfoque de esta

práctica debe estar centrado en utilizar materias primas residuales de otros procesos que sean asequibles, que se obtengan a bajo costo y que contengan una relación de carbono en peso elevada.

A continuación, realizamos un breve análisis de las diferentes opciones:

Una buena opción desde el punto de vista de la disponibilidad en la zona podría ser el estiércol generado por el ganado vacuno en los feedlots de engorde. Sabemos que en la zona en la que se encuentra Chañar Ladeado se concentran entre 0,5-1% de los establecimientos bovinos del país según datos del MAGyP⁸. A pesar de todo esto, este tipo de sustratos no sería apto para el biodigestor ya que poseen un contenido alto contenido de sólidos y varía dependiendo de la dieta del bovino. Esta opción no sería viable ya que este tipo de biodigestores se encuentra diseñado para tratar grandes volúmenes de efluentes netamente líquidos, con porcentajes de sólidos que rara vez superan el 1%. El añadido de un sustrato con alto porcentaje de sólidos demandaría la necesidad de incorporar agua -o efluente líquido ya almacenado- para lograr una estructura adecuada a los requerimientos del biodigestor lo que aumentaría el costo operativo. Si se optara por incorporar el sustrato de manera directa, sería necesario incorporar un sistema de agitación bien diseñado para evitar zonas de estancamiento de materia inerte digerida y bombas de mayor potencia, como así también cañerías y tuberías de mayor tamaño. El costo de rediseñar un equipo para digerir un sustrato para el que no fue diseñado no se justifica.

Otro problema se encuentra en que a la hora de realizar el barrido de las excretas bovinas generalmente se incorpora mucha tierra en el estiércol, esto implica luego tener materia inerte dentro del biodigestor, perdiendo contacto con la materia orgánica, lo que genera problemas operativos y bajas en el rendimiento.

Otra alternativa que genera buenos rendimientos en la producción de biogás es la fracción orgánica de los RSU (FORSU). Ésta se genera en grandes cantidades en las zonas urbanas, sin embargo, presenta una gestión generalmente inexistente, por lo cuál se dificulta su acceso. Por otro lado, al igual que el sustrato anterior presentan un alto contenido de sólidos y se necesitaría mucha agua para diluirlos, por lo que tampoco son adecuados para el diseño implementado.

Otro sustrato que funciona y que ya fue probado es la glicerina cruda residual de las plantas de biodiesel. Sin embargo, como desventaja, la inexistencia de plantas de biodiesel en la zona, siendo que se encuentran en el cordón industrial del Paraná, por lo cuál, el costo de transporte resultaría elevado.

⁸MAGyP. Senasa. Mapas de distribución de existencias bovinas. Mapas de distribución de existencias bovinas. Existencias bovinas - Participación en total de establecimientos. Visto en línea en: [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2_densidad_bovinos_km2_31122021.png]

Se verificó también que el suero de leche de los tambos puede ser utilizado como sustrato para la producción de biogás en codigestión con un sustrato activado. El más probado y utilizado es la codigestión con barro activado de estiércol vacuno. Dentro de la zona, se encuentran dos tambos ubicados a 30 kilómetros en la localidad de Los Quirquinchos. Según calculadoras de producción de biogás por sustrato de la FAO este tipo de sustrato tiene un rendimiento menor a los purines de porcinos para un peso similar, por lo tanto, no sería del todo rentable comprar este sustrato. A esto se le suma el costo del flete.

La alternativa que se consideró viable para llevar a cabo la investigación son los aceites vegetales usados (AVUs), principalmente aquellos utilizados para fritura en rotiserías o cocinas. Corresponden a materias primas residuales (de bajo costo) que cumplen con diferentes condiciones. Como alternativa, es una materia prima residual que se consigue en la zona y hoy no se trata localmente. Actualmente se recolecta en puntos verdes en 15 localidades de la provincia de Santa Fe (Incluyendo Chañar Ladeado) y se envía para transformación en biodiesel o combustible en plantas ubicadas sobre el cordón industrial del gran Rosario.

A continuación, se hace una breve descripción de estos materiales y de diferentes experiencias que se hayan desarrollado con los mismos:

5.2. Justificación de la investigación - Uso de AVUs para biogás

El aceite vegetal es un compuesto orgánico obtenido a partir de semillas u otras partes de las plantas en cuyos tejidos se acumula como fuente de energía. Puede obtenerse del girasol, soja, maíz, lino, sésamo, entre otros. Como todas las grasas está constituido por glicerina y tres ácidos grasos por lo cuál es un compuesto apto químicamente para la producción de biogás utilizando, lógicamente, un sustrato activado que lo digiera (En este caso purines de porcinos).

Cabe señalar que los AVUs constituyen residuos con características de nocividad o toxicidad y, por ello, requieren de un control y gestión integral que contemple la regulación de su generación, manipulación, recolección, almacenamiento, transporte, tratamiento y valorización para la producción de biocombustibles o biogás y, eventualmente, su disposición final, pues una gestión inadecuada de los mismos impacta negativamente en el ambiente y puede producir daños a la salud de las personas.

Se encuentran categorizados como “Residuos No Peligrosos Industriales o de Actividades de Servicios” según el Anexo B del Decreto provincial N° 2151/14⁹. La Ley provincial N° 13.808/18 establece la regulación, control y gestión integral de estos residuos y los define en su artículo N° 2: “*Se entiende por AVUs, al aceite vegetal y grasas de fritura usados que provengan*

⁹Decreto Provincial N° 2151/14: Residuos No Peligrosos Industriales o de Actividades de Servicios. ANEXO B. Visto en línea en: [\[https://www.santafe.gov.ar/index.php/web/content/view/full/185309#:~:text=T%C3%ADtulo,-Aprueba%20la%20reglamentaci%C3%B3n%20tendiente%20a%20regular%20la%20gesti%C3%B3n%20de%20los,o%20de%20actividades%20de%20servicios\]](https://www.santafe.gov.ar/index.php/web/content/view/full/185309#:~:text=T%C3%ADtulo,-Aprueba%20la%20reglamentaci%C3%B3n%20tendiente%20a%20regular%20la%20gesti%C3%B3n%20de%20los,o%20de%20actividades%20de%20servicios)

o se produzcan en forma continua o discontinua en la provincia de Santa Fe, a partir de su utilización en las actividades de cocción o preparación mediante fritura total o parcial de alimentos, cuando presente cambios en la composición físico-química y en las características del producto de origen de manera que no resulten aptos para su utilización para consumo humano conforme a lo estipulado en el Código Alimentario Argentino y en condiciones de ser desechado por el Generador y cuyo destino final sea la producción de biocombustibles y/o su incorporación a otros aceites vegetales destinados a la producción de biocombustibles y/o a otro proceso productivo por el cual se valoricen a los AVUs y/o a la disposición final del mismo en caso de no ser posible su reciclado. Se incluyen los aceites hidrogenados, las grasas animales puras no mezcladas utilizadas para fritura y los residuos que éstos generan.”¹⁰ Los generadores se encuentran enumerados en el ANEXO I y II de la presente ley.

Es por ello que su valorización para la producción de biogás sería una alternativa viable, ya que un mal manejo del AVUs puede provocar la muerte y eventualmente desaparición de otros organismos. Representa un riesgo para la salud humana y para el ambiente. El aceite es más ligero que el agua, con una densidad de 0,92 g/ml y tiende a esparcirse en grandes membranas finas que dificultan la oxigenación del agua. Debido a ello, según el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) de Argentina, un litro de aceite de cocina contamina 1.000 litros de agua, y en el suelo, destruye el humus vegetal y disminuye la fertilidad.

5.3. Factibilidad de obtención

A partir de la investigación realizada por la empresa de logística y saneamiento de la industria aceitera, DH-SH y la Facultad de Agronomía de la UBA (FAUBA), se sabe que entre pequeños y grandes generadores, se desechan al año poco más de 100 millones de litros de aceite vegetal usado. De los 20 litros que se consumen en los hogares para alimentación, se genera un residuo de 2.6 litros de aceite vegetal usado, por persona, por año. Son 122 millones de litros por año que se generan en el ámbito de los hogares, de los cuales 95 millones no se gestionan correctamente y 27 millones se recuperan. A esos 95 millones que terminan en basurales, en la tierra y, sobre todo, contaminando nuestros recursos hídricos, se le suman unos 8 millones que descartan los grandes generadores, es decir locales gastronómicos, deliverys, comedores, que no gestionan correctamente este residuo.

DH-SH, es una empresa familiar con sede en Capitán Bermúdez dedicada desde hace 20 años al saneamiento y logística de la industria aceitera. La firma regional desarrolla desde hace cuatro años la campaña “Recicla tu Aceite”, en más de 150 localidades de todo el país, y más de 15 en Santa Fe. En Santa Fe, tiene convenios con Aldao, Gálvez, Santa Teresa, Alcorta, Roldán, Villa Gobernador Gálvez, Cañada de Gómez, Funes, Coronda, Salto Grande, San Genaro Norte, Firmat, Franck, Chañar Ladeado, Los Quirquinchos y Armstrong.

¹⁰LEGISLATURA DE LA PROVINCIA DE SANTA FE. Ley N° 13808/18: REGULACIÓN, CONTROL Y GESTIÓN INTEGRAL DE ACEITES VEGETALES Y GRASAS DE FRITURAS USADOS PARA PRODUCCIÓN DE BIOCMBUSTIBLES. Visto en línea en: [<http://www.santafe.gob.ar/index.php/web/content/download/252275/1326740/file/Lev%2013808.pdf>]

En Chañar Ladeado existen actualmente tres puntos verdes para disposición de AVUs, con un promedio de cuatro puntos verdes por localidad. La empresa DH-SH se encarga de la recolección de los AVUs de grandes generadores (bares, rotiserías, restaurantes, etc.) y de los correspondientes a pequeños generadores o domiciliarios en los puntos verdes instalados. Durante el año 2021 la empresa DH-SH ha logrado recolectar 5028 toneladas de AVUs y esta cifra va en ascenso cada año. En Chañar Ladeado específicamente, durante los meses de abril, mayo y junio se han recolectado 715 litros de Aceite a partir de la campaña “Reciclá tu aceite” y de la disposición en puntos verdes.

Considerando la predisposición por realizar la recuperación de AVUs en la comuna, se podría gestionar un convenio con el productor en el cuál se podría estipular un canon según la cantidad de litros de aceite retirados. Sin embargo, deberían considerarse otras opciones ya que los litros mensuales recolectados no representan una cifra acorde a la demanda hipotética del biodigestor y no sería rentable a largo plazo.

Por otro lado, Santa Fe concentra más del 80% de la capacidad instalada nacional para la producción de biodiesel, dentro de las empresas con mayor capacidad de producción en la provincia podemos mencionar a LDC Argentina (Gral. Lagos), Patagonia Bioenergía y Renova (San Lorenzo), Terminal 6 Industrial (Pto. Gral. San Martín), Cargill (Villa Gob. Gálvez), entre otras. Es por esto que, otra opción podría ser realizar un convenio directamente con la empresa DH-SH encargada de llevar adelante la campaña “Recicla tu Aceite”. La misma actualmente realiza un acondicionamiento previo y los comercializa para la producción de biodiesel de segunda generación. Si bien es el principal mercado al cual se encuentran destinados estos residuos, en caso de que las cifras de la recolección superen la demanda, como otra alternativa una parte de los mismos podría destinarse a la producción de biogás en el biodigestor instalado en Chañar Ladeado sin la necesidad de realizar un acondicionamiento previo.

5.4. Antecedentes y proyectos similares

5.4.1. Valorización integral de los residuos procedentes del procesado de aceites vegetales usados (AVUs), España

El proyecto tuvo como objetivo principal revalorizar los residuos de los aceites vegetales usados mediante la tecnología de digestión anaerobia de los residuos y subproductos generados durante el refinado de aceites vegetales usados (AVUs) con la finalidad de cerrar el ciclo y obtener cero residuos en el proceso global de reciclado de estos aceites. El proceso se llevó a cabo en un digestor anaerobio automatizado de escala semi industrial de 1.2 m³ de capacidad, se empleó como sustrato purín de cerdo con la adición de los residuos de los AVUs, en una proporción de 5:1 (purín/mezcla de residuos AVUs). El reactor utilizado fue discontinuo calefaccionado a 35°C, el proceso se dio en dos fases, una primera fase para reacciones acidogénicas y la segunda para las reacciones metanogénicas. En un primer arranque, la fase acidogénica con un tiempo de retención de 4.5 a 3 días con pH entre 5 a 6, y la fase

metanogénica con un tiempo de retención de 25 a 17 días y pH en el rango de 7 a 7,5. Un segundo arranque se realizó a las mismas condiciones; como resultado final se obtuvo para el primer arranque, la eliminación de sólidos volátiles de 55%, eliminación de DQOs del 75% y la obtención de metano (CH₄) en biogás del 65%. Y los resultados del segundo arranque fueron: eliminación de sólidos volátiles de 60% de, eliminación DQOs del 80%, y la obtención de metano (CH₄) en biogás del 65% (Ordax de Castro, 2013).¹¹

5.4.2. Evaluación de la productividad y del efluente de biodigestores suplementados con grasas residuales, en la Universidad EARTH, Costa Rica

El estudio planteó desarrollar un sistema que permita el aprovechamiento de las grasas residuales en biodigestores para aumentar la producción y calidad del biogás. El experimento se realizó en biodigestores tipo Taiwán, de flujo continuo, construidos con polietileno tubular transparente de 250 litros de capacidad cada uno, siendo el 80% fase líquida y el 20% fase gaseosa, fueron instalados en fosas de tierra sobre el nivel del suelo. Se emplearon tres tratamientos por cuadruplicado, el tratamiento testigo (To) que solamente consistía en mezcla de boñiga y agua; T2 y T5 con mezcla de boñiga y agua suplementado con un 2.5 % y 5 % v/v de aceite residual desechado del proceso de fritura del comedor de la Universidad EARTH. El período de adaptación fue de 50 días y un tiempo de retención de 20 días, diariamente se alimentaba con 10 L de la mezcla (relación 3 a 1) de agua con heces frescas de bovino (que contenía 20% de materia seca) y con la adición de aceite residual de fritura. Finalizada el proceso de transformación de la materia en los biodigestores, 56 días luego de estabilización, como resultado se obtuvo que To presentó 69% de metano (CH₄), el T2 74% de CH₄ y el T5 un 77% de CH₄. Al adicionar 5% de aceite residual se logró aumentar la producción de biogás en 95.5% con relación al To. También, se determinó que la materia orgánica se redujo significativamente. Así demostrándose que la biodigestión anaerobia es una alternativa muy buena para el tratamiento de las grasas residuales (Días et. al., 2007).¹²

5.4.3 Eficiencia de la producción de biogás a partir de residuos aceitosos de fritura y estiércol vacuno, Perú, 2018

El objetivo de este estudio fue analizar el uso de los residuos aceitosos de fritura en la producción de biogás. Los experimentos se llevaron a cabo usando biodigestores tipo batch de 3 litros con 2.4 litros de volumen de operación, con tres tratamientos (A, B y C) cada uno cargado con mezcla de estiércol de vaca y agua en una proporción 1:2. Semanalmente se añadieron

¹¹Carlos Ordax de Castro - 2013. Valorización integral de los residuos procedentes del procesado de aceites vegetales usados. Proyecto VALUVOIL. Área de Biocombustibles del Centro Tecnológico CARTIF. Conferencias de Bioenergía y tratamientos energéticos de residuos.

¹²E.D. Dias, J.C. Kreling, R. Botero, J.V. Murillo - Año 2007. EVALUACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD Y DEL EFLUENTE DE BIODIGESTORES SUPLEMENTADOS CON GRASAS RESIDUALES. Universidad EARTH (Las Mercedes de Guácimo, Limón, Costa Rica).

residuos aceitosos de fritura al 2.5% y 5% a los tratamientos A y C, respectivamente; mientras que B fue el tratamiento control. La producción del biogás se evaluó durante 30 días a temperatura ambiental que osciló entre 25 a 30°C, el volumen del biogás producido se midió por el método del desplazamiento de volumen y el contenido de metano se cuantificó mediante la técnica de cromatografía de gases. Se encontró que el tratamiento C que trabajó con la inoculación de un 5% de residuos aceitosos de fritura, generó mayor producción de biogás acumulado, alcanzando 16.97 L y en cuanto al contenido de metano alcanzó un 52.9%; mientras que A y B alcanzaron 10.65 L y 10.28 L de biogás acumulado y 50.55% y 44.9% en cuanto al contenido de metano, respectivamente. Esta investigación demostró que la adición de los residuos aceitosos de fritura sí aumenta la producción de biogás (*H. Villanueva Fernández y J. M. Hinga Blas, 2018*).¹³

¹³H. Villanueva Fernández y J. M. Hinga Blas - Perú, 2018. *Eficiencia de la producción de biogás a partir de residuos aceitosos de fritura. Facultad de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales: Universidad Nacional del Callao. Visto en* *línea* *en:* [http://209.45.55.171/bitstream/handle/20.500.12952/2969/Villanueva%20Fernandez%20y%20Hingla%20Blas_T1_TULO%20AMBIENTAL_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y]

6. MATERIALES Y MÉTODOS

Para llevar a cabo los diferentes ensayos que se detallan en el próximo capítulo, se describen a continuación los diferentes métodos que se aplicaron durante los ensayos, así como también los materiales para llevar a cabo los mismos.

6.1. TOMA DE MUESTRAS

6.1.1. Recolección y conservación de muestras

Como paso previo a los ensayos correspondientes se realizó un muestreo in situ en el campo del productor en puntos representativos del proceso. Se realizó empleando la metodología utilizada por el INTA¹⁴. Ésta consiste en realizar un llenado parcial previo en bidones de PEAD de 5 litros realizando un enjuague o lavado con el efluente. Posteriormente se deben llenar los bidones casi hasta su máxima capacidad dejando aproximadamente 200 mililitros libres dentro del recipiente. Los mismos se deben almacenar de forma inmediata en heladera portátil para luego almacenarse en heladera a temperaturas entre 0°C y 6°C para evitar la descomposición del efluente. Las muestras se deberán mantener en todo momento a bajas temperaturas evitando llegar al punto de congelamiento. En momentos en los que se deban retirar los bidones para utilizar el efluente se deberá considerar que los períodos sean lo más cortos posibles debiendo evitar su cercanía a fuentes de calor para evitar la descomposición de la muestra.

6.1.2. Elección de sitios de muestreo

Para la toma de muestras se debe considerar que los puntos sean representativos de la etapa del proceso de la cual se desean obtener datos. Para el caso en cuestión se consideraron 3 puntos representativos del proceso, siendo los mismos:

- **Sitio N° 1:** Efluente de carga o entrada en el biodigestor, siendo este el efluente crudo del lavado de camas. El punto de muestreo considerado para el mismo se encuentra en la fosa de descarga del efluente crudo (Véase la Fig. 3)
- **Sitio N° 2:** Inóculo o efluente interno del biodigestor, siendo este denominado efluente de reciclo. El punto de muestreo considerado para la obtención del mismo se encuentra en el recipiente o contenedor elevado mediante el cuál circula el efluente de recirculación que vuelve a ingresar al biodigestor (Véase la Fig. 4 y 5)
- **Sitio N° 3:** Efluente de descarga o de salida del biodigestor, siendo este el digerido que se envía a las lagunas de estabilización. El punto de muestreo considerado para el mismo se

¹⁴Dra. (Ing. Agr.) Vanesa Pegoraro Responsable de los Análisis de Residuos Pecuarios del Laboratorio de Gestión Ambiental de la EEA INTA Marcos Juárez. Muestreo de efluente porcino para uso agronómico. Año 2020. Visto en línea en: [https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_mj_muestreo_efluentes_2020.pdf].

encuentra en el caño elevado mediante el cuál se descarga por bombeo el digerido en la primera laguna de estabilización. (Véase la Fig. 6)



Figura 3 - Fosa de descarga del efluente crudo del lavado de galpones.



Figuras 4 y 5 - Estación elevada y sistema de recirculación del biodigestor.



Figura 6 - Recolección de muestras en la descarga del líquido digerido en bidones de 5 litros.

6.2. ANÁLISIS BÁSICOS

6.2.1. Potencial de Hidrógeno (pH)¹⁵

El objetivo que se busca es determinar el pH de una muestra de agua.

Fundamento

El pH es un parámetro que mide la concentración de iones hidronio presentes en el agua. El Medidor de pH consta de un electrodo de vidrio que genera una corriente eléctrica proporcional a la concentración de protones de la solución y que se mide en un galvanómetro. La corriente puede transformarse fácilmente en unidades de pH o mV por diferentes procedimientos de calibrado. El valor del pH depende de la temperatura. El pHmetro se calibra potenciométricamente, con un electrodo indicador de vidrio y uno de referencia, (que pueden presentarse combinados en uno solo), utilizando patrones trazables.

Ámbito de Aplicación

El método es aplicable a todo tipo de aguas: Crudas, de proceso y tratadas, aguas residuales y naturales, incluidas las marinas. Entre sus objetivos está verificar el cumplimiento de la legislación vigente para aguas destinadas a diferentes propósitos (potable, consumo humano y doméstico previo tratamiento, recreativo) o para vertimientos a cuerpos de agua o alcantarillados.

¹⁵APHA-AWWA-WEF (2005) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21th Edition. New York, 4-90 a 4-94, método 4500-H+ .

Interferencias

El electrodo de vidrio está prácticamente libre de interferencias debido a turbiedad, color, material coloidal, salinidad (excepto a pH > 10), materiales oxidantes o reductores. El pH se ve afectado por la temperatura por efectos mecánicos y químicos, por lo que se debe indicar siempre a qué temperatura se realizó su medición. Los electrodos son muy sensibles y deben mantenerse sumergidos en agua potable o preferiblemente KCl 3M para electrodos combinados. Pueden fallar por arañazos, deterioro, o acumulación de restos sobre la superficie, que se puede mejorar por inmersión en HCl 0.1 N y NaOH 0.1N y posteriormente dejar sumergidos una noche en tampón pH = 7.0. Lavar con agua destilada antes de volver a utilizar.

Descripción de la metodología analítica

Colección, preservación y almacenaje de muestras:

El pH preferiblemente debe determinarse in situ.

- No obstante, por cuestiones prácticas, en ocasiones se reciben muestras para realizar su determinación. En este grupo se incluyen aquellas que son recolectadas por el Laboratorio en la red de agua potable y otros muestreos. Una vez recibidas, debe dejarse que adquieran la temperatura ambiental del Laboratorio y determinar el pH con la mayor brevedad posible.
- Las muestras pueden colectarse en los frascos plásticos o de vidrio utilizados para otros parámetros.
- En caso alguno, las muestras deben almacenarse para el día siguiente.

Equipos y materiales:

Sondas multiparamétricas o pHmetros

Reactivos:

Soluciones buffer o tampón de diferentes pH, preferiblemente 4.00, 7.00 y 10.00. Estas pueden estar ya listas o deben ser convenientemente diluidas según instrucciones del fabricante. En todo caso, deben ser trazables.

Procedimiento:

Las condiciones ambientales no son críticas para la realización de este ensayo.

- Para mediciones in situ, el pH debe medirse directamente en el cuerpo de agua. En los casos que esta operación se dificulte y se obtenga una muestra con algún dispositivo de muestreo (como frasco, botella muestreadora o balde), debe medirse a la mayor prontitud posible directamente en dicho dispositivo para así minimizar cualquier variación.

- Operar el equipo que resumidamente consiste en: conectar el aparato, verificar o realizar su ajuste, introducir el electrodo en la muestra de agua, agitar ésta suavemente para garantizar su homogeneidad y facilitar el equilibrio entre electrodo y muestra, presionar el botón de medida, esperar que se establezca el valor y leerlo. La agitación debe ser suave para minimizar la entrada de dióxido de carbono que pudiera alterar el resultado.

Presentación de resultados

El resultado se obtendrá directamente de la pantalla del equipo y se expresará con dos cifras decimales.

A continuación se muestra una imagen del proceso:



Figura 7 - Medición de pH de la muestra mediante pHmetro (INTA - Venado Tuerto, 2022).

6.3. ANÁLISIS GRAVIMÉTRICOS

6.3.1. Sólidos Totales¹⁶

Determinar el contenido de sólidos totales en una muestra de efluente.

Fundamento

La determinación de los sólidos totales permite estimar los contenidos de materias disueltas y suspendidas presentes en un agua, pero el resultado está condicionado por la temperatura y la duración de la desecación. Su determinación se basa en una medición

¹⁶ APHA-AWWA-WEF (2005) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21th Edition. New York, 2-55 y 2-56, método 2540 B.*

cuantitativa del incremento de peso que experimenta una cápsula previamente tarada tras la evaporación de una muestra y secado a peso constante a 103-105 °C.

Ámbito de aplicación

El método es aplicable a todo tipo de aguas.

Interferencias

- El agua fuertemente mineralizada con concentración significativa de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- y/o H_2SO_4 , puede ser higroscópica y requerir secado prolongado, desecación adecuada y pesado rápido.
- Los resultados de muestras ricas en grasas y aceites flotantes pueden ser cuestionables debido a la dificultad de secarlas a peso constante en un tiempo prudencial.
- Un residuo excesivo en la cápsula puede formar una corteza hidrófila, por lo que debe limitarse el tamaño de la muestra para tratar de obtener un residuo no mayor de 200 mg.
- La temperatura a la cuál el residuo se seca, tiene un efecto muy importante sobre los resultados, ya que pueden ocurrir pérdidas de la materia orgánica.

Descripción de la metodología analítica

Recolección, preservación y almacenaje de muestras:

Las muestras se deben recolectar en frascos plásticos o de vidrio y refrigerar inmediatamente. Realizar el análisis lo antes posible, y en caso de requerirse almacenamiento, hacerlo a temperatura $\leq 6^\circ\text{C}$ por un tiempo máximo de 7 días.

Equipos y materiales:

- Cápsulas de evaporación adecuadas al volumen de la muestra
- Estufa
- Desecador con sílica azul como indicador colorimétrico de humedad
- Balanza analítica
- Agitador magnético
- Placa calefactora
- Probetas de diferentes volúmenes

Procedimiento:

Las condiciones ambientales no son críticas para la realización de este ensayo.

Preparación de la cápsula de evaporación:

- Encender la estufa a 103-105 °C.
- Introducir una cápsula limpia durante una hora.
- Llevar la cápsula al desecador hasta que se vaya a emplear.

- Pesarla inmediatamente antes de usar y registrar el dato (Peso A).

Determinación de sólidos totales:

- Esperar que la muestra se encuentre a temperatura ambiente.
- Seleccionar el volumen de muestra de acuerdo al aspecto de la misma; habitualmente éste estará entre 25 y 100 mL.
- Mezclar bien la muestra y depositar el volumen seleccionado en la cápsula de evaporación previamente tarada.
- Colocar la cápsula en una placa calefactora y evaporar la muestra hasta casi sequedad pero evitando ebullición y salpicaduras.
- Llevar la muestra evaporada a la estufa a 103-105 °C por 1 hora. A criterio del analista, el secado puede extenderse hasta el día siguiente, cuando el tipo de muestra, haga suponer alto contenido de sales y se considere ausencia de compuestos orgánicos que puedan perderse con un calentamiento prolongado.
- Enfriar la cápsula en el desecador.
- Pesar rápidamente para evitar cambios en el peso por exposición al aire y/o degradación del residuo y registrar los datos.
- Repetir el calentamiento sólo por 1 hora, hasta que la diferencia con la pesada previa sea < 4% ó < 0.5 mg (seleccionar el valor que resulte menor), con lo cual se considera se obtuvo peso constante.
- El peso finalmente obtenido será Peso B.

Cálculos y presentación de resultados

mg sólidos totales/L = (B - A) x 1000 / volumen de muestra (en mL)

Donde:

A: peso de la cápsula de evaporación vacía (en mg)

B: peso de la cápsula de evaporación + residuo seco (en mg)

Para el peso B, se empleará el promedio de los dos valores que cumplan el requisito de peso constante antes enunciado. Resultados inferiores a 10 mg/L se reportarán con una cifra decimal, los restantes se redondearán a la unidad. Para aquellas muestras que excepcionalmente presenten resultados inferiores a 5 mg/L, informe “< 5 mg/L”.

Control de calidad del método

Se realizará con base a los criterios de precisión y exactitud:

Precisión: realizar una muestra por duplicado por cada lote de diez o menos muestras. Se considerará satisfactoria siempre que no exceda 10 % expresada como coeficiente de variación.

Exactitud: analizar una muestra de control sintética. Se considerará satisfactoria siempre que el error no exceda 10 %.

6.3.2 Sólidos fijos y volátiles¹⁷

Determinar el contenido de sólidos fijos y volátiles en una muestra de agua.

Fundamento

Los sólidos fijos son el residuo de los sólidos totales, disueltos o suspendidos, después de llevar una muestra a sequedad durante un tiempo determinado a 550 °C. La pérdida de peso por ignición son los sólidos volátiles. No es posible distinguir totalmente entre la materia orgánica y la inorgánica debido a que algunas sales minerales se descomponen o se volatilizan.

Ámbito de aplicación

El método es aplicable a cualquier tipo de agua, aunque es realmente útil para los procesos de tratamiento de aguas residuales, ya que ofrece una estimación de la cantidad de materia orgánica presente en la fracción sólida del agua residual y los lodos activados.

Interferencias

Pueden producirse errores negativos en los sólidos volátiles por pérdida de materia volátil durante el proceso de secado. La determinación de bajas concentraciones de sólidos volátiles en presencia de altos niveles de sólidos fijos, puede estar sujeta a errores importantes. En estos casos se recomienda su cuantificación por otro método como el de carbono orgánico total.

Descripción de la metodología analítica

Recolección, preservación y almacenaje de muestras:

Las muestras deben recolectarse en frascos plásticos o de vidrio y refrigerar inmediatamente. Realizar el análisis lo antes posible, y en caso de requerirse almacenamiento, hacerlo a temperatura $\leq 6^{\circ}\text{C}$ por un tiempo máximo de 7 días.

Equipos y materiales:

- Los utilizados en las determinaciones de sólidos totales, suspendidos y disueltos
- Mufla

Procedimiento:

Las condiciones ambientales no son críticas para la realización de este ensayo.

- Selección de la metodología: definir la fracción (totales, disueltos o suspendidos) sobre la cual quieren determinarse los sólidos volátiles.

¹⁷APHA-AWWA-WEF (2005) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21th Edition. New York, 2-59 y 2-60, método 2540 F.*

- Proceder según la IE correspondiente para la preparación del filtro o la cápsula de evaporación, pero cambiando el calentamiento a 103 o 180 °C, por incineración en mufla a 550 °C durante una hora. Guardar la cápsula o el filtro en el desecador y pesar inmediatamente antes de utilizarlo (peso A).
- Determinar la fracción deseada según la IE correspondiente. Registrar el peso de la cápsula o filtro más el residuo, una vez secado a 103 o 180 °C (peso B).
- Incinerar el residuo obtenido a 550 °C durante 15 minutos.
- Dejar la cápsula o el filtro, según sea el caso, al aire hasta que disminuya algo su temperatura y luego depositarlo dentro del desecador hasta que alcance la temperatura ambiente.
- Pesar el filtro o la cápsula y registrar los datos.
- Repetir las etapas hasta que la diferencia con la pesada previa sea < 4% ó < 0.5 mg (seleccionar el valor que resulte menor). Anotar el peso del filtro o la cápsula (peso C).

Cálculos y presentación de resultados

mg sólidos volátiles/L = [(B - C) X 1000] / volumen muestra (mL)

mg sólidos fijos/L = [(C - A) X 1000] / volumen muestra (mL)

Donde:

A: Peso del filtro o la cápsula vacía (en mg)

B: Peso del filtro o la cápsula + residuo seco, antes de ignición (en mg)

C: Peso del filtro o la cápsula + residuo seco, después de ignición (en g)

Resultados inferiores a 10 mg/L se reportarán con una cifra decimal, los restantes se redondearán a la unidad. Los resultados inferiores a 1 mg/L deben informarse como “< 1 mg/L”.

Control de calidad del método

Realizar una muestra por duplicado por cada lote de diez o menos muestras. La precisión (expresada como coeficiente de variación), no debe exceder 5%.

6.4. ANÁLISIS DE PROCESO

6.4.1. FOS/TAC¹⁸

Fundamento:

Una planta de biogás funciona de forma más eficaz cuando se agregan sustratos en cantidades totalmente adaptadas al proceso de fermentación. Para tal fin, se debe conocer con exactitud, y documentar durante un periodo de tiempo prolongado, el estado exacto de la fermentación en el digestor.

Esto se consigue mediante análisis de laboratorio internos periódicos, fáciles de realizar, de la relación FOS/TAC. El usuario obtiene información exacta de las características de biodegradación del digestor y, por lo tanto, de la producción de biogás. Toda interferencia en el proceso se puede detectar rápidamente y eliminar de forma específica. La planta se gestiona de modo más eficaz y con una mejor relación calidad-precio.

El Centro Federal Alemán de Investigación Agrícola (Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft/FAL) desarrolló el análisis de FOS/TAC a partir de un test de valoración (Método Nordmann) con el fin de determinar el cociente de la concentración ácida y la capacidad compensadora del sustrato de fermentación. FOS significa Flüchtige Organische Säuren, es decir, ácidos orgánicos volátiles y se mide en mg Ac. Acético/L. TAC significa Total Anorganisches Carbonat, esto es, carbonato inorgánico total (capacidad de compensación alcalina), y se mide en mg CaCO₃/L.

La relación FOS/TAC está reconocida como valor-guía para evaluar los procesos de fermentación. Permite detectar a tiempo los problemas del proceso, hasta el inminente vuelco de la fase biológica del digestor, con lo que se pueden tomar contramedidas inmediatamente.

¿Cómo se determina la relación FOS/TAC?

Bien mediante una valoración manual o, más fácil y rápidamente, con un valorador como, por ejemplo, el TIM 840; comparado con la valoración manual, este es más preciso y ahorra varios minutos por muestra.

Pasos para la realización de una medida de FOS/TAC

1. Tomar una muestra representativa del sustrato de fermentación.

¹⁸Ulrich Lossie, Petra Pütz. Informe práctico: Analítica de laboratorio. Valoración FOS/TAC. Control orientado de plantas de biogás con la ayuda de FOS/TAC. Fuente: EnerCess. Disponible en: [\[https://es.scribd.com/document/455419060/Control-Orientado-de-Plantas-de-Biogas-con-ayuda-de-FOS-TAC\]](https://es.scribd.com/document/455419060/Control-Orientado-de-Plantas-de-Biogas-con-ayuda-de-FOS-TAC)

El punto en el que la planta opera más eficientemente, es decir, en el que la producción de gas es máxima y no existe peligro de que el proceso se colapse, solamente puede determinarse probando diversas posibilidades. Un fallo de este tipo es muy costoso; varias semanas sin producción de gas y la enorme cantidad de trabajo (trasiegos por bombeo, vaciado del digestor, etc.) necesario para que la planta vuelva a estar operativa pueden poner en peligro la rentabilidad de todo un año.

Tabla 2 - Reglas empíricas para la evaluación de relaciones FOS/TAC (Valores empíricos proporcionados por DEULA - Nienburg).

Valor de la relación FOS/TAC	Antecedentes	Medida
>0,6	Excesiva sobrealimentación de biomasa	Interrumpir la adición de biomasa
0,5-0,6	Excesiva entrada de biomasa	Agregar menos biomasa
0,4-0,5	La planta está muy cargada	Vigilar la planta más estrechamente
0,3-0,4	La producción de biogás es máxima	Mantener constante la entrada de biomasa
0,2-0,3	La entrada de biomasa es muy baja	Aumentar lentamente la entrada de biomasa
<0,2	La entrada de biomasa es bajísima	Aumentar rápidamente la entrada de biomasa

6.5. ENSAYOS DE POTENCIAL DE BIOGÁS

Se trata de un procedimiento para determinar la producción de biogás de un sustrato en un ambiente definido y controlado. De este modo, se obtiene una medida de la degradabilidad del sustrato en cuestión, la cantidad máxima de biogás que es capaz de generar en determinadas condiciones y el tiempo que tarda en alcanzar ese máximo (tiempo de degradación biológica).¹⁹

Para el ensayo de producción de biogás, se debe colocar 100 g de muestra en frascos color caramelo de 250 mL de capacidad. Cada tratamiento se debe realizar mínimamente por triplicado. Para establecer una línea de base se dejan 3 frascos cargados sólo con inóculo (Obtenido de biodigestores en funcionamiento). A dicho tratamiento se lo denomina “Blanco”. En el resto de los frascos, se pesa una cantidad de 100 g de inóculo y el sustrato en cuestión a analizar y se los agrega a los frascos. A su vez, se realiza un “frasco control” con celulosa, cuya producción de biogás es conocida y permite verificar el buen funcionamiento del ensayo.

Luego se coloca el tapón y el precinto para cerrarlos herméticamente. Se colocan los frascos en una estufa a una temperatura de 35º C (Temperatura de trabajo del biodigestor); controlada por una termocupla.

¹⁹Huerga I. R., Mariano Butti, Daniel Intaschi, José Masigogge, Leandro Pusineri y Sergio Justianovich, 2016. Generación de biogás: Experiencia del Tambo La Natividad, Coronel Dorrego, Buenos Aires. INTA. Visto en línea en: [\[https://www.produccion-animal.com.ar/Biodigestores/85-biogas-inta_ipaf_pampeana.pdf\]](https://www.produccion-animal.com.ar/Biodigestores/85-biogas-inta_ipaf_pampeana.pdf)

Para realizar la medición de la producción de biogás se utilizó el método de aguja y probeta detallado en 6.5.1.

Al graficar la producción acumulada de biogás del sustrato en función del tiempo, se puede observar cómo esta crece hasta llegar a un punto máximo, luego del cual no aumenta más o lo hace muy levemente (alcanza una meseta). Este punto es el que indica la cantidad máxima de biogás que ese sustrato puede generar en las condiciones dadas. Este valor es útil para comparar distintos sustratos y para tener una idea de la producción de biogás a esperar en un biodigestor alimentado con un determinado material.

A continuación se muestran imágenes ilustrativas del proceso.



Figura 9 - Frascos de vidrio color caramelo de 250ml con muestras de efluente del biodigestor (INTA - Venado Tuerto, 2022).



Figura 10 - Estufa regulada a 35 °C, donde se alojan los frascos durante el ensayo (INTA - Venado Tuerto, 2022).

6.5.1. Sistema de medición de biogás mediante probeta y aguja

Por otro lado, para realizar la medición de producción de biogás se construye un frasco lavador que consiste en una probeta de vidrio graduada de 250 mL llena hasta su enrase. Una de las salidas se conecta a un recipiente de plástico a presión atmosférica que tiene el mismo nivel. La otra contiene una manguera y una aguja. Se procede a medir diariamente la producción de biogás insertando la jeringa en el tapón septum de los frascos y registrando el desplazamiento del volumen de líquido provocado en la probeta. Esta medición se realiza durante 49 días aproximadamente o hasta que se registran valores despreciables o nulos. Estos valores medidos se registran en una planilla de cálculo.

La imagen que se muestra a continuación da una idea ilustrativa del proceso de medición.



Figura 11 - Sistema de medición de producción de biogás mediante probeta y aguja (INTA - Venado Tuerto, 2022).

6.6. ENSAYOS DE ALIMENTACIÓN EN CONTINUO

Los ensayos de alimentación en continuo sirven para encontrar las condiciones operativas del proceso. En el caso de la biodigestión, se podrán obtener parámetros como la velocidad de carga orgánica, el tiempo de residencia hidráulico, la producción real de biogás, la relación de CH_4 /Biogás y la tasa de degradación de la materia orgánica para un determinado sustrato.

En este tipo de ensayos se debe seguir la operatoria del digestor, es decir, alimentar una determinada cantidad de material diario en función al volumen de reactor disponible y un tiempo determinado; a fin de poder escalar al biodigestor.

El volumen de reactor utilizado para estos ensayos puede ser variable. Lo que limita esta capacidad es la cantidad de sustrato diario a utilizar (Y el mantenimiento de sus condiciones) ya que pequeñas cantidades hacen que se puedan producir errores en su pesaje y condiciones similares de composición; y grandes cantidades implicaría utilizar un reactor de mayores dimensiones.

De construirlos a una escala de laboratorio, es más sencillo controlar variables como la temperatura y la condición del biogás, pero puede que sea limitante el volumen de reactor, a escalas no mayores de 5 litros.

Variables del sistema implementado:

- **Reactores:** En este caso se optó por construir 2 (Dos) biodigestores utilizando envases de vidrio de 1 litro de capacidad, uno a partir del cuál se registró la producción total diaria de biogás y otro a partir del cuál se registró la producción de metano CH_4 .
- **Volumen de sustrato:** Se los mantuvo constantemente a un volumen de sustrato de 800 mililitros.

- Sistemas de medición de CH₄/Biogás: Los sistemas de medición utilizados tanto para el biogás como para el metano se detallan posteriormente en los puntos 5.1 y 5.2; respectivamente.
- Temperatura: Para lograr mantener la temperatura constante se utilizó un baño termostático de laboratorio de 10 litros de capacidad lleno de agua. Este sistema funciona por transferencia de calor, desde el agua al reactor, calentando el efluente a la temperatura deseada. Se llevó la temperatura del agua a 37 °C (Rango mesofílico) y se mantuvo constante durante todo el ensayo.
- Evaporación del agua: Una variable que puede no ser considerada y sobre la que se tuvo especial cuidado en el ensayo es la evaporación del agua que sufre el baño termostático. La reducción del nivel del agua puede causar una elevación de la temperatura por encima de los valores recomendados, lo cuál puede influir sobre los resultados del proceso.
- Agitación: Otra variable que no debemos descuidar es la agitación. La agitación del biodigestor es un factor importante, ya que distribuye el sustrato por todo el sistema ayudando a que las bacterias entren en contacto con el mismo; lo cual favorece una mayor y más rápida digestión de la biomasa, acortando los tiempos de retención hidráulica, y acelerando en consecuencia los tiempos de producción de biogás. No se utilizó ningún dispositivo de agitación. Los reactores fueron agitados con movimientos circulares de manera manual antes y después de realizar la realimentación diaria.
- Duración del ensayo: Se mantuvo un registro de las fechas de inicio y finalización de las diferentes etapas del ensayo.
- Variables operativas: Durante el ensayo se mantuvo un registro con las variables del proceso: Composición y tipo de sustrato, caudal de realimentación, temperatura, ST/SV, pH, FOSTAC y producción de gas metano/biogás.

A continuación, se adjuntan imágenes que muestran el sistema mediante el cuál se llevó a cabo el ensayo descrito:



Figura 12 - Sistema de producción de biogás/metano en baño termostático (INTA - Venado Tuerto, 2022).



Figura 13 - Temperatura de funcionamiento del ensayo de producción de metano/biogás (INTA - Venado Tuerto, 2022).

A continuación, se detallan los métodos de medición utilizados:

6.6.1. Sistema de medición de biogás por desplazamiento volumétrico basado en el protocolo VDI 4630 (2006).

El biogás producido puede desplazar una solución contenida en un sistema colector externo al reactor. Se llena el colector con una solución barredora y se invierte en un recipiente reservorio. El biogás pasa a través de la solución y el volumen desplazado es igual al volumen de biogás generado. La solución barredora puede ser agua de red, aceite, agua acidificada y agua carbonatada. En la figura 14 se muestra una representación del armado del sistema. La desventaja que presenta este método es la posible disolución del CO_2 en la solución barredora, conduciendo a una subestimación del biogás generado (Filer et al., 2019). La solubilidad del CO_2 en agua a 25 °C es 25 veces más alta comparada con el CH_4 bajo las mismas condiciones de pH y presión (Strömberg et al., 2014). Su solubilidad puede reducirse decreciendo el pH o incrementando la salinidad en la solución barredora (Strömberg et al., 2014; Zaman, 2010). Por otro lado, además de ajustar el volumen de biogás generado en condiciones estándares de presión y temperatura, es necesario considerar el contenido de vapor de agua y corregir por la presión hidrostática sobre el gas, cuando se utiliza este método (Filer et al., 2019; Strömberg et al., 2014). Esta técnica es sencilla y de bajo costo para su implementación en el laboratorio, pero presenta como desventaja la posibilidad de tener fugas del biogás mediante el sistema de conexión y medición (agujas, mangueras). Debe considerarse el uso de jeringas esmeriladas y

mangueras impermeables para gases, a fin de asegurar la hermeticidad del sistema y las condiciones anaeróbicas (Aquino et al., 2007).²⁰

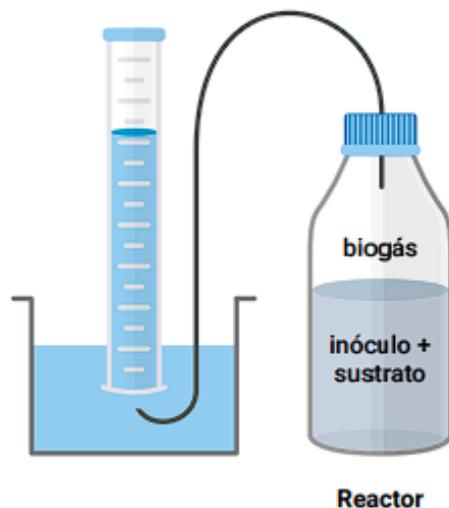


Figura 14 - Figura ilustrativa del método volumétrico por desplazamiento de medición de biogás.

6.6.2. Sistema de medición de CH₄ por burbujeo en solución alcalina²¹

Para la medición del metano se utilizó el mismo sistema de medición detallado en el apartado 5.1.1. Sin embargo, a diferencia de la medición de biogás, este método se basa en añadir un paso intermedio. El objetivo de éste paso intermedio es retener el CO₂ presente en el biogás, obteniendo así una medición final aproximada al contenido real de CH₄ en el gas, el dióxido de carbono disuelto es separado antes de ejecutar la medición; cualquier otro gas presente corresponderá a trazas proporcionalmente insignificantes. Este proceso de selección es implementado mediante una trampa de CO₂, solución acuosa de hidróxido de sodio al 10% v/v. El biogás producido es filtrado y llevado posteriormente a una columna de desplazamiento para determinar solo volumen. Inicialmente la altura Δh es cero, pero esta aumenta conforme el metano escapa de la trampa. El armado del sistema es esquematizado en la figura 15.

²⁰Patricia Bres, María Eugenia, Beily Diana Crespo - 2022. Ensayo potencial bioquímico metanogénico: Una metodología clave para conocer la energía de las biomásas. Método volumétrico por desplazamiento (Página 28). INTA Ediciones 2022. Visto en línea en: [\[https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/bitstream/handle/20.500.12123/11309/INTA_CICVYA_IMYZA_Bres_PA_Ensayo_potencial_bioqu%C3%ADmico_metanog%C3%A9nico.pdf?sequence=1&isAllowed=y\]](https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/bitstream/handle/20.500.12123/11309/INTA_CICVYA_IMYZA_Bres_PA_Ensayo_potencial_bioqu%C3%ADmico_metanog%C3%A9nico.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

²¹Vaquerano-Pineda, N; Salazar-Rojas, T; Porras-Acosta - Costa Rica, 2016. M. Medición automática del metano en biogás, por columnas de desplazamiento. Tecnología en Marcha. Encuentro de Investigación y Extensión 2016. Disponible en: [\[https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0379-398220160009000086&lng=en&nrm=iso&tlng=es\]](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0379-398220160009000086&lng=en&nrm=iso&tlng=es)

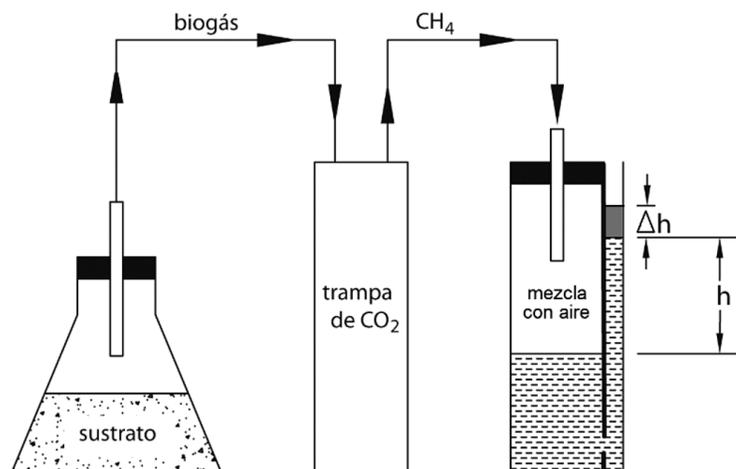


Figura 15 - Esquema general de la medición del volumen de metano en el biogás.

La presión interna del sistema está directamente asociada al peso de la columna h . El volumen de CH_4 se determina con exactitud conociendo el volumen de esa columna; sin embargo, existen ciertos factores que afectan esta medición:

- Tras la disolución inicial del biogás en medio acuoso, se presentan desviaciones importantes en las lecturas. La solubilidad del metano en agua ronda los 3,3 gramos por cada 100 mL de agua a 20°C, por lo que 500 mL como medio para medición implican 16,5 gramos en disolución, es decir, cerca de 10 mL de metano (0,6 g/mL) en las primeras horas.
- La presión atmosférica local afecta la altura h . Este desplazamiento confina el gas, pero expone al medio ambiente la solución acuosa a través de una pequeña sección transversal. Al igual que el barómetro de Torricelli, el aumento de la presión atmosférica implica una desviación Δh que puede interpretarse erróneamente como disminución del volumen desplazado.
- Las microfugas en sellos y tuberías hacen de esta técnica un sistema delicado, ya que la simple presencia de estas produce pérdidas sensibles que imposibilitan la medición de volumen. En sistemas comunes, inyectar aire a presión facilita la detección de fugas, pero es una herramienta limitada, ya que el tamaño de la molécula de metano es comparativamente más pequeño y propensa a escapar cuando el sistema entra en operación.
- La porosidad de muchos plásticos utilizados en sellos y uniones entre las distintas partes del sistema degrada el desempeño de esta técnica. Detectar burbujeos con agua jabonosa es un procedimiento inútil por el reducido caudal visible; por ello se inyectó gas helio (fácil disponibilidad y suficientemente liviano) para delatar cualquier microfuga. El empleo directo de metano no es práctico debido a su reducida disponibilidad.

7. RESULTADOS

7.1. Ensayos de producción de biogás

Siendo el objetivo principal de la investigación el aumento de la producción de energía eléctrica generado a partir de purines porcinos del establecimiento en cuestión, se realizaron diferentes ensayos del potencial de producción de biogás para diferentes situaciones y sustratos agregados, tomando como base del estudio los purines generados actualmente en el criadero porcino.

7.1.1. Ensayos previos e intraoperatorios de análisis de estado del biodigestor

En la etapa preoperatoria e intraoperatoria de los ensayos se analizaron para todas las muestras el contenido de materia seca, representada como sólidos totales (ST) y; el contenido de materia orgánica, representada por los sólidos volátiles (SV). También se realizaron mediciones intraoperatorias de pH y se realizó análisis FOSTAC de los sustratos líquidos (efluentes e inóculo).

Para la medición de ST se procedió a pesar una determinada cantidad de muestra de sustrato ubicada en crisoles, luego se colocó los crisoles en estufa a 105 °C durante 24 horas y se los retiró debiendo registrar posteriormente su peso para obtener los ST mediante cálculos matemáticos.

Esta muestra “seca” se utilizó posteriormente para el análisis de SV, procediendo a colocar los crisoles en una mufla a 550 °C durante 2 horas. Luego se colocaron los crisoles dentro del desecador dejándolos enfriar. Una vez fríos se procedió a calcular su peso para calcular los SV de forma matemática.²²

En la tabla 3 se puede observar las características del efluente en los puntos representativos del proceso.

Tabla 3 - Valores de Sólidos Totales (ST), Sólidos Volátiles (SV), pH y FOS/TAC.

Sitio de muestreo	% ST	% SV (Base seca)	pH	FOS/TAC
Entrada	0,610%	49,78%	7,28	-
Reciclo	0,760%	46,65%	7,59	0,15
Salida	0,511%	33,87%	7,6	0,15

²²INTA - Ministerio de Agroindustria, Presidencia de la Nación. Ensayo de producción de biogás. ADECCO AGRO - TAMBO 2.

A partir de estos datos se puede deducir que el biodigestor se encuentra degradando correctamente el material orgánico presente en el efluente. Por otro lado, de acuerdo al análisis FOSTAC; el biodigestor actualmente se encuentra subalimentado y posee capacidad para recibir un aporte de materia orgánica superior. Esto podrá verse reforzado con las conclusiones posteriores obtenidas en el resto de los ensayos.

7.1.2. Ensayo de potencial de producción de biogás

Para el ensayo de producción de biogás, se procedió a colocar 100 g de muestra en frascos color caramelo de 250 mL de capacidad. Cada tratamiento se realizó por cuadruplicado. Los frascos se mantuvieron en condiciones estables a 35 °C de temperatura en estufa, de acuerdo a la metodología detallada para dicho ensayo (6.5.). Este ensayo se basó en establecer un “blanco” representativo de cada sitio de muestreo y; en paralelo, un “frasco control” con agregado de celulosa monocristalina al 4% para cada tipo de muestra. La producción de biogás con este sustrato es conocida y permite verificar el buen funcionamiento del ensayo.

A continuación, se muestra una tabla en la que figuran los resultados obtenidos en el ensayo de potencial de producción de biogás.

Tabla 4 - Ensayo de potencial de producción de biogás con celulosa monocristalina.

Tipos de muestra	Promedio de biogás generado acumulativo (mL)	Relación (mL biogás / g efluente)	Promedio de biogás generado acumulativo con celulosa monocristalina al 4% (mL)	Relación (mL biogás / g de celulosa)	Variación de la relación respecto al valor ideal (800mL/g)
CARGA	130,63	1,31	430,83	740,65	-7,42%
RECICLO	51,13	0,51	357,50	747,24	-6,59%
DESCARGA	51,09	0,51	289,50	581,97	-27,25%

Resultados y conclusiones del ensayo:

Los datos obtenidos del ensayo nos dejan en claro varias cuestiones:

- Como se planteó en la hipótesis de este trabajo, se supone que el biodigestor en cuestión es un sistema de mezcla completa, por lo tanto, el contenido de materia orgánica presente en el efluente de recirculación o “reciclo” deberá ser similar al presente en el efluente de descarga.

Como puede observarse en la tabla anterior los valores promedio de generación de biogás para los “blancos” de reciclo y descarga son similares. Es por esto que podemos afirmar que nuestra teoría es correcta y el biodigestor funciona correctamente.

Otro valor que afirma el correcto funcionamiento del biodigestor en cuanto a la degradación de la materia orgánica presente en el efluente es la relación $\frac{mL \text{ biogás}}{gr \text{ de efluente}}$. Para dicha relación; como figura en la tabla, obtuvimos un valor muy superior para la carga (1,31) en comparación con el valor de la descarga y el reciclo (0,51).

En la siguiente gráfica se puede observar la generación de biogás promedio acumulativa de los frascos en los que se realizó el "blanco" para cada efluente y a partir del cuál se conoce la relación mencionada anteriormente.

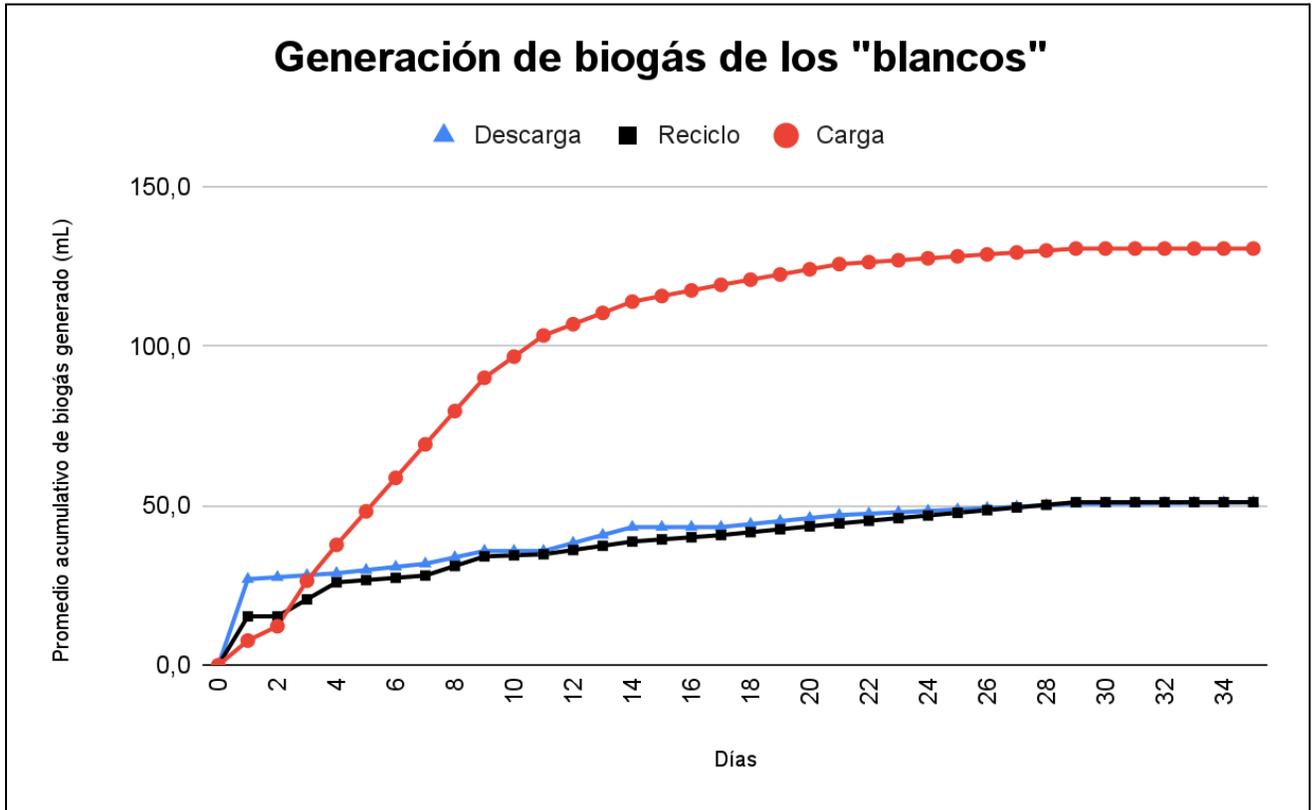


Gráfico 1 - Ensayo de potencial de producción de biogás.

- Como se planteó inicialmente, el ensayo en cuestión se basa en medir la capacidad de generación de biogás del efluente en cuestión, en este caso, mediante el añadido de celulosa monocristalina al 4%. Según otros ensayos realizados para este tipo de efluentes se considera que un valor aproximado de $800 \frac{mL \text{ biogás}}{gr \text{ de celulosa monocristalina}}$ indica una buena capacidad de generación de biogás de las bacterias presentes en el efluente.

A partir del ensayo realizado, podemos observar que los valores obtenidos de esta relación son aproximados al valor ideal tanto para el efluente de carga, como para el efluente de recirculación. Esto nos indica que existe buena calidad del material bacteriológico responsable de la producción de biogás en el efluente.

Esto no sucede así, con el efluente de descarga del biodigestor (-27,25% de variación respecto del valor ideal), lo que nos da la pauta de que podría no ser adecuado añadir un tratamiento adicional destinado a la producción de biogás con el efluente de descarga del biodigestor.

El aumento de esta relación durante el transcurso del ensayo puede observarse en la siguiente gráfica:

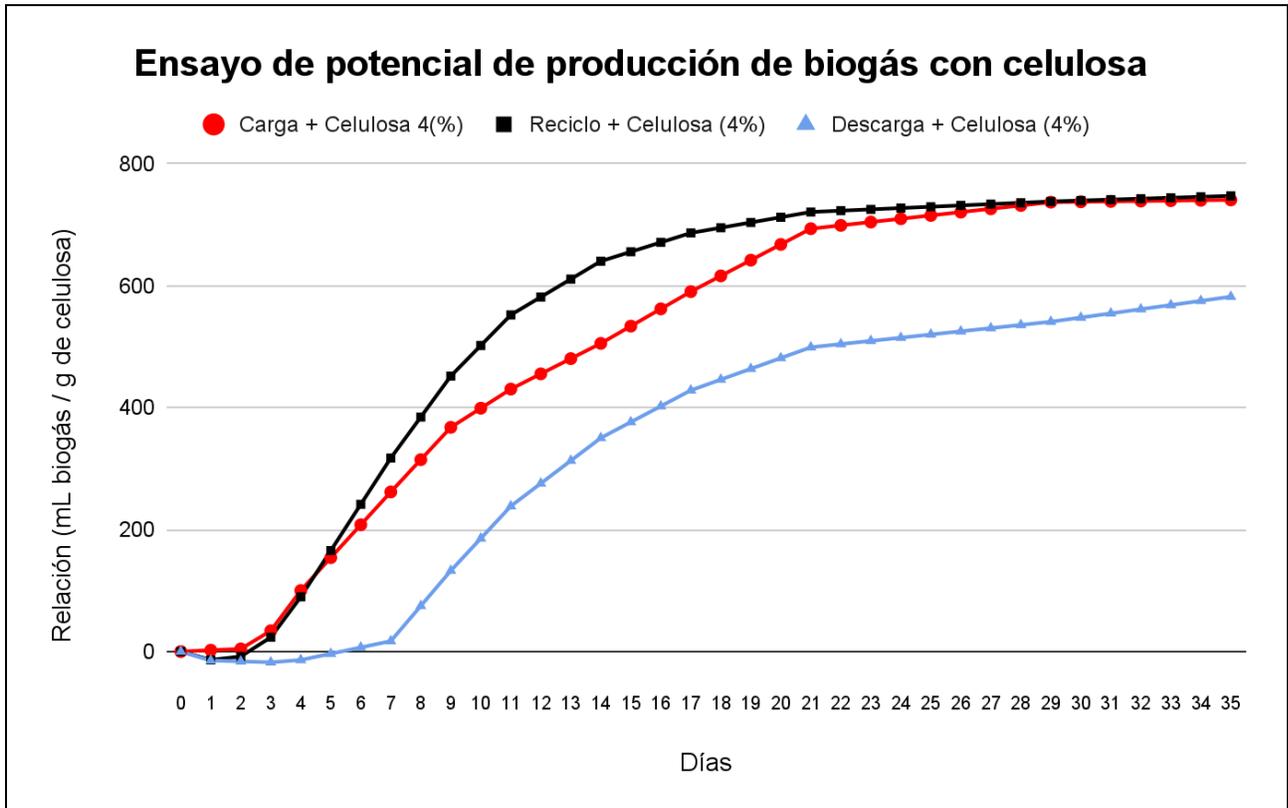


Gráfico 2 - Ensayo de potencial de producción de biogás con celulosa monocristalina.

- Con este ensayo y los valores FOSTAC obtenemos una de las conclusiones esenciales del trabajo en cuestión; al estar subalimentado el biodigestor y debido a que existe un buen sustrato bacteriológico, el mismo tiene buena capacidad de co-digerir otro sustrato o de aumentar la carga diaria. En las condiciones actuales el aumento de la carga de efluente no es posible debido a que esta variable se encuentra limitada por la cantidad de madres del criadero en cuestión (Producción diaria de efluentes). Estos resultados nos permitieron analizar la posibilidad de co-digerir otro sustrato. En los próximos ensayos se analizará dicha posibilidad.

7.1.3. Ensayo de producción de biogás de co-digestión de AVUs en reactores batch

En este ensayo, como se mencionó anteriormente, se analizarán las posibilidades de co-digestión de otro sustrato; en este caso de Aceites Vegetales Usados. Dicho ensayo se llevó a cabo bajo las mismas condiciones que el ensayo anterior. Para establecer una línea de base se dejaron 4 frascos cargados sólo con inóculo (Obtenido del biodigestor en funcionamiento), a dicho tratamiento se lo denominó "Blanco". En el resto de los frascos, se pesó una cantidad de 100 g de inóculo y el sustrato en cuestión a analizar y se los agregó a los frascos.

Cabe destacar que este ensayo tiene el objetivo de analizar el rendimiento obtenido del sustrato ya que refleja la máxima producción de biogás en condiciones estables del biodigestor, lo cuál sabemos, que en la práctica no sucede. Para estudiar el rendimiento de los AVUs, en los ensayos de co-digestión se decidió trabajar con una proporción de AVUs del 4% p/p. Dicha proporción equivaldría a añadir 3,75 m³ de AVUs en conjunto con los 90 m³ de crudo generados diariamente.

En la siguiente tabla, figuran los resultados obtenidos de los ensayos realizados:

Tabla 5 - Ensayo de potencial de producción de biogás con agregado de AVUs.

Tipo de ensayo	Promedio acumulativo generado (mL biogás)	Relación (mL de biogás / g de efluente)
1. Inóculo (Blanco)	76,2	0,75
2. Inóculo + Aceite (4%)	1383,3	13,14
3. Inóculo + Ef. de carga	107,3	0,951
4. Inóculo + Ef. de carga + Aceite (4%)	2906,3	25,14
5. Ef. de descarga	34,8	0,35
6. Ef. de descarga + Aceite (4%)	280,6	2,68

Los resultados obtenidos en el ensayo nos permiten obtener varios parámetros que nos serán útiles de cara a tomar una decisión en el futuro:

Tabla 6 - Parámetros de rendimiento obtenidos del ensayo de producción de biogás con AVUs.

Resultados y parámetros	Relación (mL de biogás / g de efluente)	Variación en la producción total de biogás (%)	Relación (mL de biogás/g de aceite o sustrato)
Aporte del efluente de carga	0,2	0,0%	2,78
Aporte adicional del aceite en la carga	24,19	2643,2%	696,2
Aporte adicional del aceite en la descarga	2,33	774,2%	58,9

- Mediante las relaciones obtenidas en los tratamientos 1) y 3) obtenemos el dato de la producción actual del biodigestor a partir del efluente de carga utilizado actualmente, por lo tanto, la relación de generación del biodigestor es de $0,95 \frac{mL \text{ biogás}}{g \text{ efluente}}$ siendo el aporte del efluente; $0,2 \frac{mL \text{ biogás}}{g \text{ efluente}}$. Este dato constituirá la base sobre la que se analizarán los rendimientos del resto de los tratamientos y nos será útil luego para comparar el rendimiento adicional que se puede obtener mediante el agregado de AVUs.

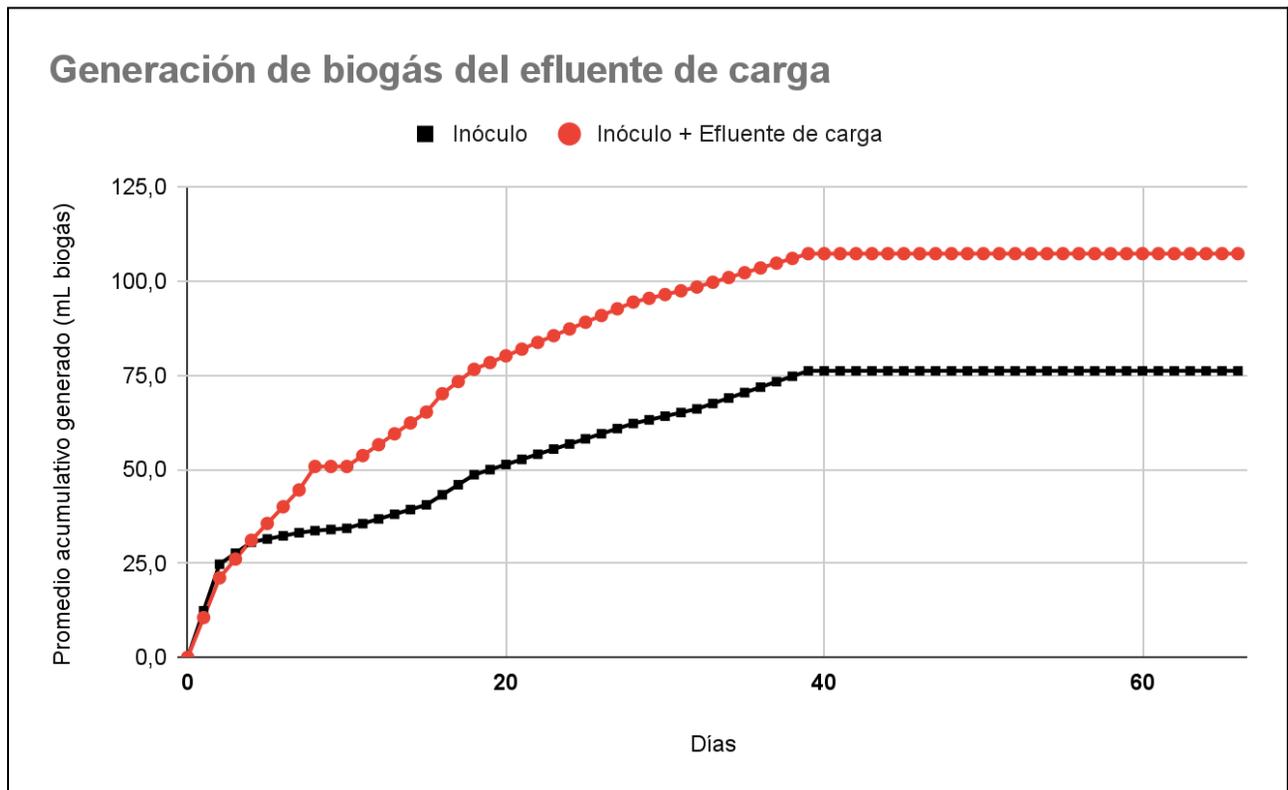


Gráfico 3 - Ensayo de generación de biogás del efluente de carga.

- Por otro lado, mediante la relaciones obtenidas en los tratamientos 4) y 3) obtenemos la relación de rendimiento de co-digerir AVUs en conjunto con el efluente de carga en una concentración del 4% de peso en peso. Tal y como se puede observar en la tabla 5 la relación obtenida es de $25,14 \frac{mL \text{ biogás}}{g \text{ efluente}}$ lo que equivale a una producción del 2643% en relación a la generación actual del biodigestor.

En síntesis el aporte adicional del aceite en la producción de biogás sería de aproximadamente $700 \frac{mL \text{ biogás}}{g \text{ aceite}}$ o $24,19 \frac{mL \text{ biogás}}{g \text{ efluente}}$ si utilizamos las mismas proporciones que se utilizaron en el tratamiento (Aceite al 4% p/p).

En la siguiente gráfica pueden observarse los ensayos que muestran la producción actual del biodigestor y la producción de biogás a partir de la co-digestión de AVUs.

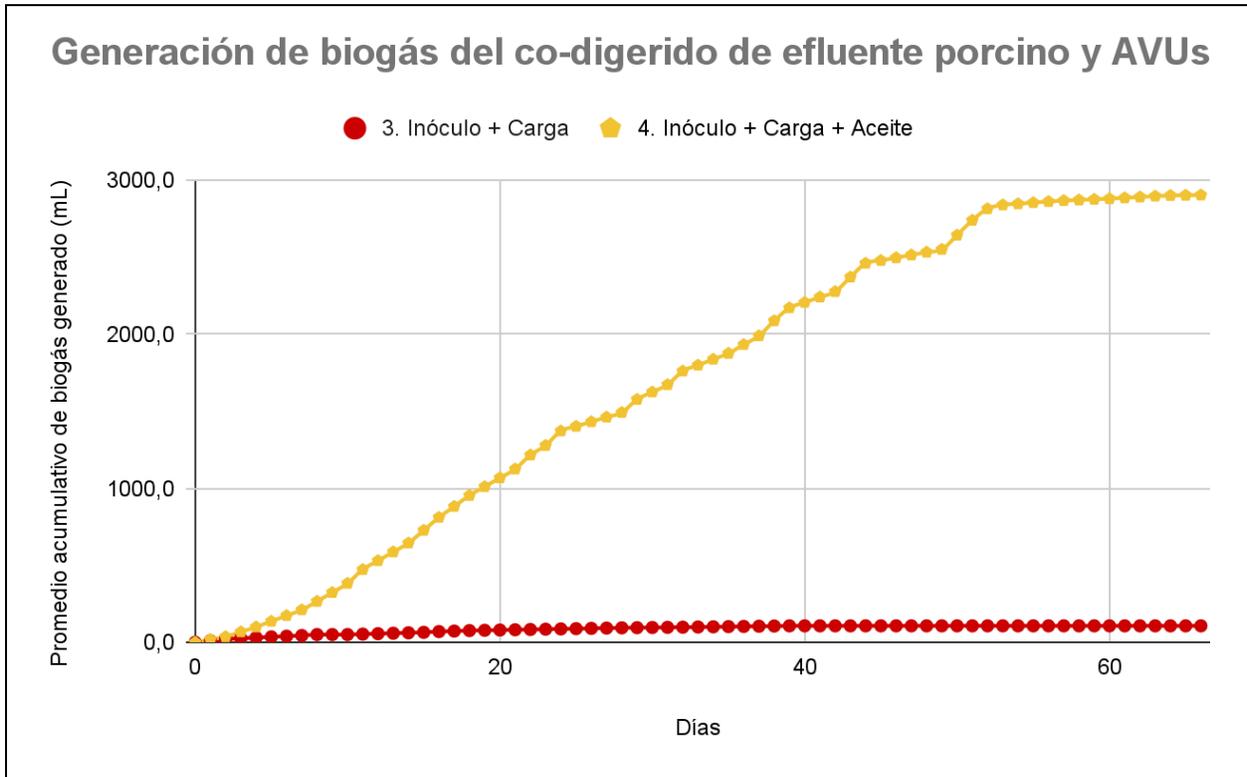


Gráfico 4 - Ensayos comparativos de la generación de biogás mediante codigestión de purines de cerdo y AVUs.

- Por otro lado, otros de los ensayos realizados consistió en analizar el rendimiento adicional que generaría la adición de AVUs en el efluente de descarga del biodigestor, con el objetivo de analizar la factibilidad de realizar un tratamiento adicional con dicho efluente.

A partir de los ensayos 5) y 6) se obtuvo una relación en la producción de biogás neta a partir de la co-digestión de AVUs en la descarga equivalente a $2,68 \frac{\text{mL biogás}}{\text{g efluente}}$ siendo la misma superior a la generación actual de biogás en la descarga pero muy inferior a la relación obtenida para la co-digestión de AVUs en la carga del biodigestor. Por otro lado, como puede observarse en la tabla anterior, el aporte adicional del aceite en la producción de biogás sería de aproximadamente $60 \frac{\text{mL biogás}}{\text{g aceite}}$ si respetamos las proporciones mencionadas.

En la siguiente gráfica puede observarse lo descrito anteriormente:

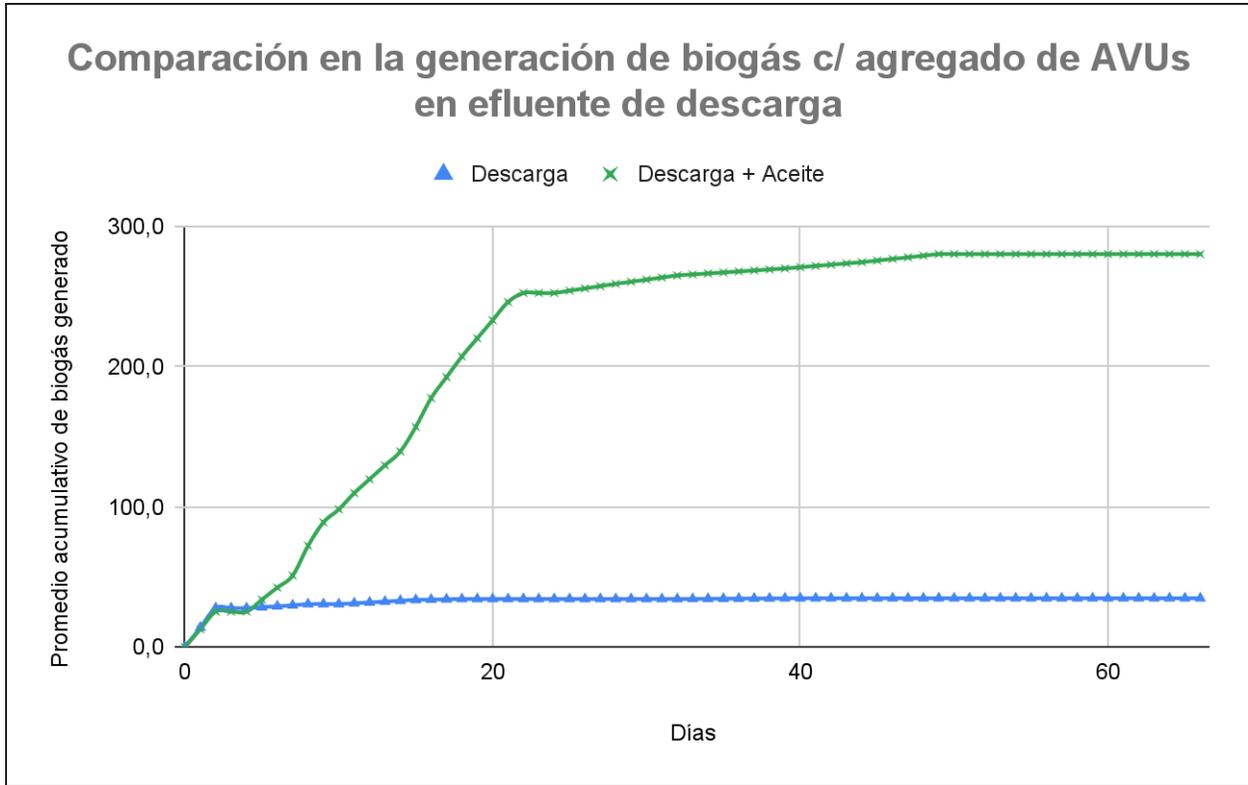


Gráfico 5 - Ensayos comparativos de la producción de biogás de la codigestión de AVUs y digeridos.

Conclusiones del ensayo:

En la siguiente gráfica se puede observar una comparación de los ensayos realizados, en la misma se muestra la producción promedio acumulativa de biogás generado hasta finalizar los ensayos.

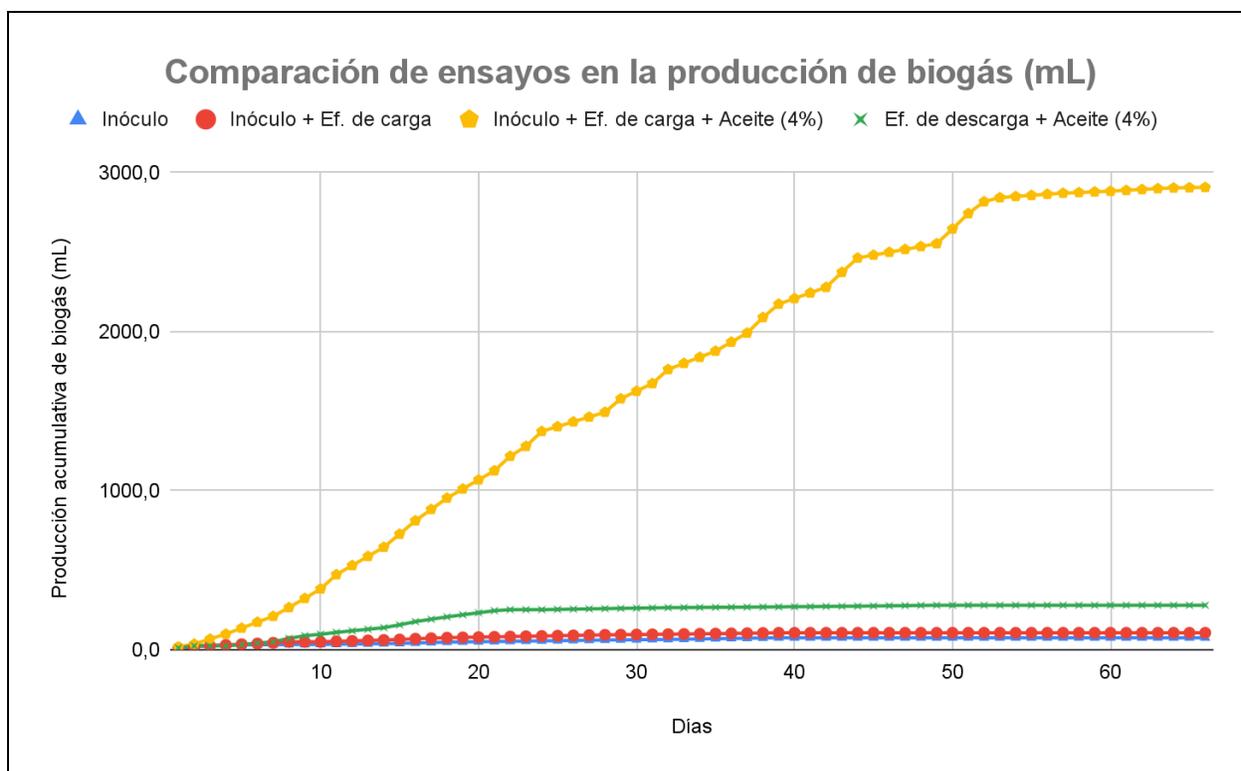


Gráfico 6 - Ensayos comparativos de la producción de biogás mediante codigestión de AVUs y purines de cerdo.

Con los resultados que se muestran en la gráfica podemos obtener dos conclusiones principales:

- Como puede observarse, el añadido de AVUs en el digerido del biodigestor presenta una relación $\frac{mL \text{ biogás}}{g \text{ efluente}}$ equivalente a una décima parte de la relación obtenida del añadido de AVUs con el efluente de carga en una proporción equivalente. Esta comparativa nos da la pauta de que no es conveniente realizar un tratamiento adicional de co-digestión con el digerido si nos enfocamos netamente en la producción energética. Esto es, básicamente debido a que el material bacteriológico responsable de la producción de biogás presenta un potencial mucho menor en el digerido comparándolo con el efluente crudo, lo cuál es lógico.

Por otro lado, basándonos en análisis como el FOSTAC realizado en el ensayo descrito el punto 7.1.1. sabemos que el biodigestor se encuentra subalimentado, al menos durante los meses de verano (Meses en los que se realizó la toma de muestras), por lo cuál, actualmente y debido a la capacidad de aumentar la carga de cara al futuro; no es práctico construir otro biodigestor que funcione con el digerido del biodigestor actual.

- Por el contrario, centrándonos en la co-digestión de AVUs y el crudo, las conclusiones son antagónicas. Con las relaciones y los valores obtenidos, desde el punto de vista energético, añadir AVUs en dicha proporción generaría un gran impacto en el

rendimiento energético del biodigestor. Por cuestiones de practicidad, dicha carga de aceite se podría realizar a través de la estación elevada de distribución (Recirculación).

7.1.4. Ensayo de producción de biogás de la co-digestión de AVUs en continuo

En el ensayo anterior se verificó el gran potencial de la co-digestión de AVUs con crudos porcinos. Este ensayo en particular, a diferencia del anterior se basa en obtener un promedio de generación diario de biogás, simulando y respetando algunos parámetros reales de funcionamiento, tales como la temperatura interna del biodigestor, la re-alimentación diaria de efluente y el tiempo de retención hidráulico.

Por otro lado, entendemos que, para los fines prácticos; conseguir AVUs para respetar los $3,75 \frac{m^3}{día}$ (4% p/p) en la alimentación del biodigestor puede resultar algo complejo. Es por eso que, en este ensayo se decidió trabajar con una proporción de AVUs del 1% p/p. Extrapolando este parámetro a la escala real del biodigestor equivaldría a añadir 900 litros de AVUs en conjunto con los 90 m³ diarios de purines porcinos generados.

Se decidió iniciar el ensayo con un caudal de realimentación de 25 mL, respetando el TRH promedio del biodigestor considerando todas las épocas del año (32 días aproximadamente). De este modo, se obtuvo la base sobre la cuál comparar los cambios que se manifestaron en los parámetros durante las diferentes etapas en las cuales se aumentó el caudal de realimentación, es decir, se disminuyó el TRH. Por último, se comparó la producción base con la producción de la co-digestión de AVUs (1% p/p) y purines de cerdo.

Durante el ensayo se controlaron los sólidos totales y sólidos volátiles en diferentes etapas del mismo. También se controlaron parámetros como el pH y el FOSTAC.

Tabla 7 - Valores de ST/SV durante el ensayo en continuo.

Etapa de muestreo	Punto de muestreo	% ST	% SV
Alimentación con 25 mL	Carga	1,172%	70,29%
	Digestor N° 1	1,304%	48,56%
	Digestor N° 2	1,813%	45,94%
Días iniciales de alimentación con 40 mL	Descarga N° 1	1,307%	53,83%
	Descarga N° 2	0,586%	42,90%
Días finales de alimentación con 40 mL	Descarga N° 1	0,838%	46,80%
	Descarga N° 2	0,740%	47,97%

Realizando una breve descripción de los resultados obtenidos para el parámetro ST/SV, durante las primeras semanas puede observarse que el valor de ST se mantuvo alto, sin embargo, el valor de los SV disminuyó, lo que nos indica que los reactores se encontraban realizando la digestión de manera adecuada. Los altos valores de ST podrían deberse a que la materia inerte se deposita en el fondo de los reactores una vez digerida. Pese a esto, los valores se encuentran dentro de los niveles normales de funcionamiento.

Por otro lado, los valores de FOSTAC se mantuvieron dentro de los niveles normales para los efluentes porcinos (0,3-0,4). En cuanto a los valores de pH no sufrieron cambios bruscos y se mantuvieron estables. A continuación se muestra una gráfica de los valores adoptados por el pH durante el ensayo.

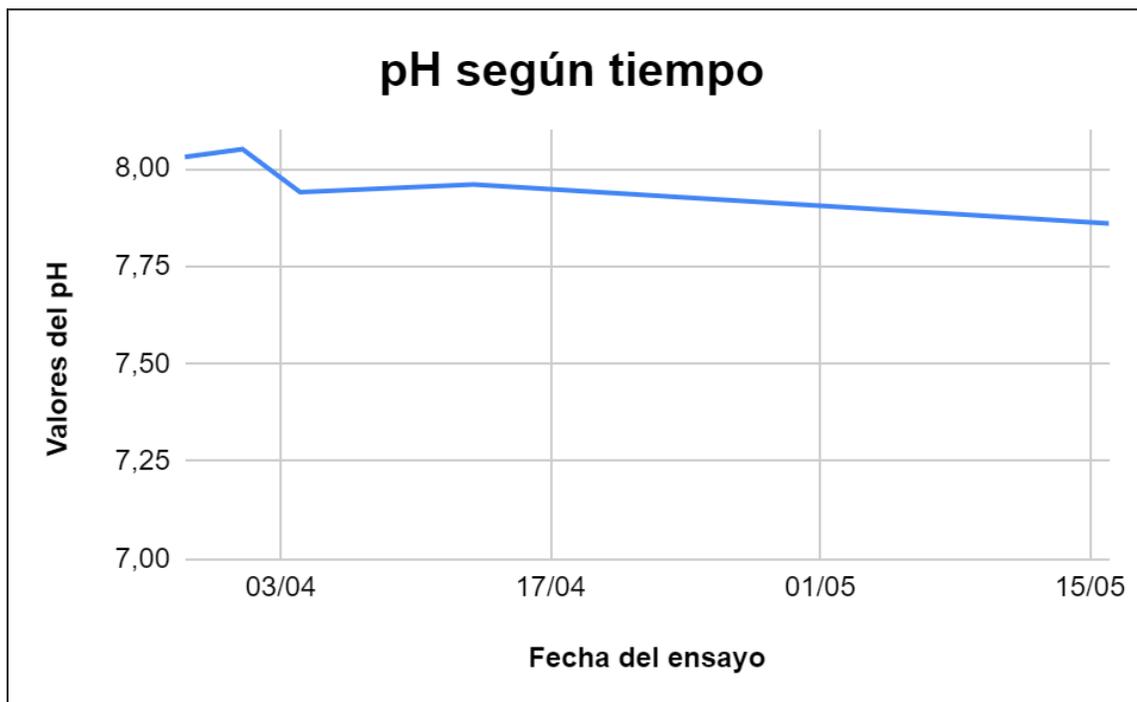


Gráfico 7 - Valores del pH según fecha del ensayo.

El ensayo se basó en 4 etapas: Una etapa inicial en la que se respetó el TRH del biodigestor alimentando a los reactores con $25 \frac{mL}{día}$ de efluente; una segunda y tercer etapa en la que se disminuyó el TRH a 20 y 13 días, alimentando con $40 \frac{mL}{día}$ y $60 \frac{mL}{día}$ de efluente; respectivamente, y por último, una cuarta etapa en la que se retomó el caudal de alimentación inicial de $25 \frac{mL}{día}$ de efluente con el añadido de AVUs al 1% p/p en la mezcla.

A continuación se muestra una tabla en la que figuran los resultados obtenidos:

Tabla 8 - Resultados del ensayo de producción de biogás en continuo.

Etapa del ensayo	TRH (días)	Volumen de inóculo en el biodigestor (mL)	Tasa o caudal de alimentación diaria (mL/día)	Relación (mL biogás / mL de efluente alimentado)	Aumento en la relación (mL biogás / mL de efluente) (%)	Relación (mL biogás / mL biodigestor. día)
Funcionamiento actual	32	800	25	1,26	-	0,039
Disminución del TRH ▼	20		40	2,74	217,76%	0,137
Disminución del TRH ▼▼	13,35		60	3,12	247,66%	0,234
Funcionamiento actual con AVUs (1%)	32		25	5,61	445,18%	0,175

Conclusiones del ensayo:

De acuerdo a los resultados, sabemos que la primera etapa se basó en obtener un “valor base” representativo del funcionamiento del biodigestor en las condiciones actuales. De dicha etapa se obtuvo un valor base de $1,26 \frac{\text{mL biogás}}{\text{mL efluente}}$.

Una vez obtenido un valor “base” confiable (Según mediciones realizadas durante 20 días), se decidió proceder a la segunda etapa. En la misma se redujo el TRH de los reactores (20 días); obteniendo así un aumento en dicha relación hasta en un doble del valor base.

Con este resultado se decidió proseguir con una tercera etapa, respetando una reducción aún mayor en el TRH (13 días). De la misma se obtuvo un leve aumento en el rendimiento del biogás generado por mililitro de purín de cerdo.

Para finalizar, se ensayó la codigestión de AVUs en una proporción del 1% sobre el total de la mezcla de purines de cerdo (0,9 m³ de aceite en 90,9 m³ de efluente en la escala real). En esta cuarta etapa se respetó nuevamente el TRH promedio del biodigestor (32 días) con el objetivo de analizar el aumento del rendimiento en dicha relación para una misma cantidad de efluente alimentado (En comparación con el valor base). Para el mismo se obtuvo una relación de $5,61 \frac{\text{mL biogás}}{\text{mL efluente}}$ lo que supera ampliamente los rendimientos obtenidos en las etapas anteriores, superando este valor en más de 4 veces el valor base.

Dichos rendimientos pueden verse plasmados en la siguiente gráfica:

Relación (mL biogás / mL de efluente alimentado) según etapa

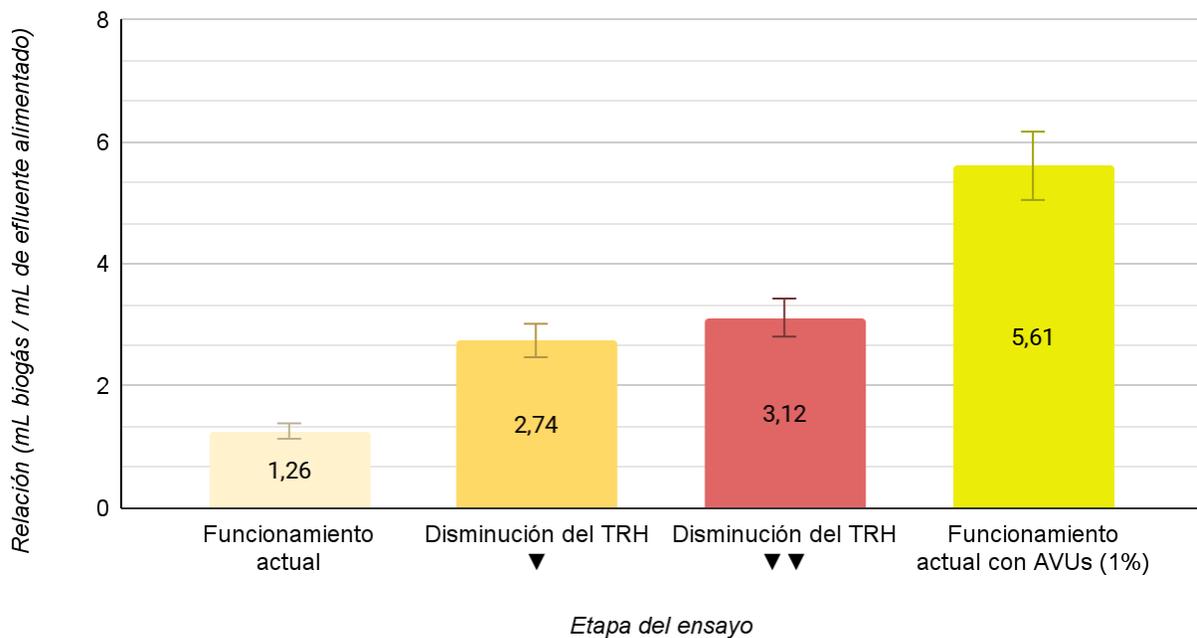


Gráfico 8 - Comparativa en la producción de biogás por volumen de efluente.

Como conclusiones generales del ensayo podemos reafirmar algunas cuestiones:

- Se observa un aumento de la relación $\left[\frac{\text{mL biogás}}{\text{mL efluente}}\right]$ inversamente proporcional al TRH y proporcional al aumento en el caudal de alimentación del biodigestor. Como los ensayos fueron realizados durante los meses de verano (Meses de mayor calidez) sabemos que al menos, durante los mismos, el biodigestor se encuentra subalimentado y es capaz de recibir un mayor aporte de carga. Si el criadero de cerdos crece, el volumen de biodigestor es suficiente como para digerir más volumen de efluente. De todas formas, los resultados obtenidos deben verificarse con un nuevo ensayo de producción de biogás en reactor continuo en el que se analicen más específicamente las características del biogás y su composición. Esto, debido a que un mayor porcentaje en la relación metano/biogás deriva en un mayor potencial energético del biogás.
- Por otro lado, también puede ocurrir que; al disminuir el TRH y al tratarse de un efluente muy diluído se produzca un “lavado” en el biodigestor y se pierda mucho material biológico útil en el proceso.

Es por ello que, optar por co-digerir un sustrato con alta carga orgánica por litro de sustrato como los AVUS puede resultar en una opción más viable. De éste modo no se modificarían las condiciones operativas.

8. CONCLUSIONES

Habiendo evaluado el uso de AVUs en la producción de biogás a través de diferentes ensayos, se concluye en lo siguiente:

Sabiendo que el consumo mensual de energía eléctrica del establecimiento agropecuario es de 1.000 kWh/día; se realizó una evaluación de la capacidad de abastecimiento energético actual y de aquella que se podría alcanzar añadiendo AVUs de cocina (Al 1% p/p) al proceso de producción de biogás. Para ello se consideraron 2 escenarios posibles para cada situación: El primero con una producción de CH₄ del 60% y el segundo escenario con una producción de CH₄ del 75%.

Situación actual

Para la producción actual se partió desde la base del rendimiento de biogás obtenido, siendo esta $1,26 \frac{m^3 \text{ de biogás}}{m^3 \text{ de efluente}}$. Basándonos en los cálculos realizados durante el desarrollo del documento, considerando que se obtienen 9,15 kWh por m³ de metano y la eficiencia del generador para la transformación en energía eléctrica es del 30% (El resto se pierde en forma de calor); se obtienen 2 resultados:

Para el escenario 1 (60% de CH₄) se obtendrían 186,7 kWh/día (Cubriendo un 18,7% del consumo diario). En el escenario 2 (75% de CH₄) se obtendrían 233,4 kWh/día (Cubriendo un 23,3% del consumo diario).

Situación: AVUs al 1%

Basándonos en los ensayos realizados del añadido de AVUs en una proporción del 1% p/p, obtuvimos una relación de $5,61 \frac{m^3 \text{ de biogás}}{m^3 \text{ de efluente}}$.

Para el escenario 1 (60% de CH₄, AVUs al 1%) se obtendrían 840 kWh/día, cubriendo el 84% de la demanda eléctrica del establecimiento. Para el escenario 2 (75% de CH₄, AVUs al 1%) se obtendrían 1050 kWh/día, lo que cubriría el 100% de la demanda eléctrica del establecimiento.

Análisis final de investigación

En esta investigación se logró demostrar de manera efectiva la hipótesis planteada en un inicio mediante los diferentes ensayos realizados, siendo los resultados muy satisfactorios. Los resultados antes mencionados pueden observarse en el [Anexo 3: Tabla de resultados del abastecimiento energético](#).

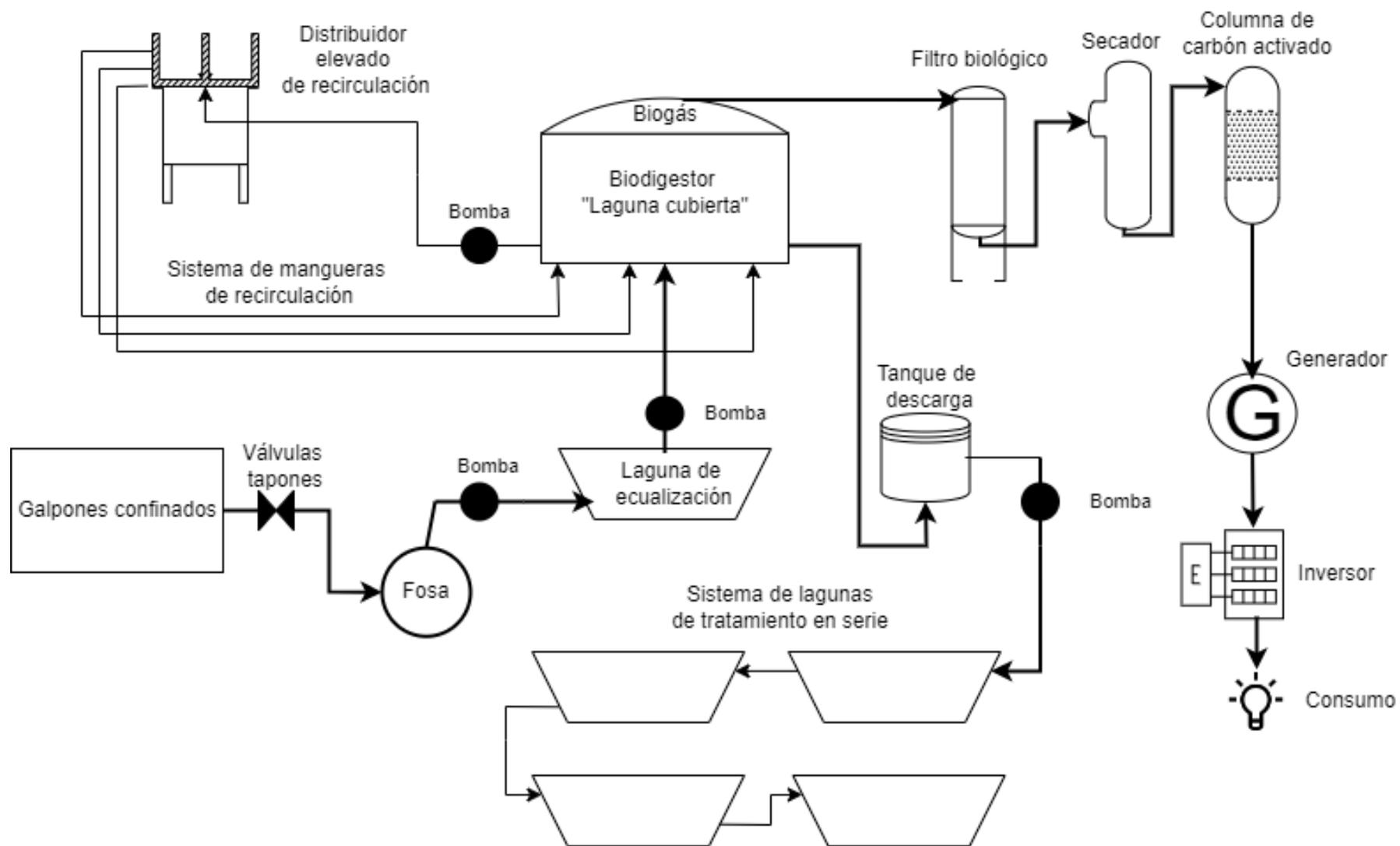
Por otro lado, considerando los resultados podría ser de gran utilidad para el productor la aplicación de AVUs en una frecuencia diaria respetando sus cantidades para mantener una proporción baja de aceites en el efluente (1-5% p/p) evitando de este modo, la formación de una capa emulsionada dentro del biodigestor.

En caso de llevar a cabo este tipo de estrategia, ya sea con AVUs u otros sustratos (Glicerina, Suero de leche de tambos, etc.) y considerando que la producción energética es variable a lo largo del día y dependiendo de la estación, al igual que el consumo eléctrico; el productor debería considerar la posibilidad de inscribirse como usuario generador en el programa ERA del que dispone la EPE para evitar que en los momentos en los que existan excedentes de energía eléctrica producida esta sea desperdiciada incurriendo en pérdidas monetarias debido a la imposibilidad de almacenar energía.

9. RECOMENDACIONES

- Para llevar a cabo este proyecto se debería realizar un análisis de generación y disponibilidad de AVUs en la zona llevado a cabo por profesionales del área. En caso de ser factible se debería realizar un acuerdo con entidades del entorno privado y/o público, tales como la empresa DH-SH S.R.L. o comunas de la zona (Chañar Ladeado, Corral de Bustos, Los Quirquinchos, Berabevú, Cafferata) con motivos de realizar el retiro de AVUs recolectados por un canon o precio accesible.
- Debería realizarse un estudio de factibilidad económica y financiera por profesionales del área en base a precios de AVUs disponibles en la zona, tasa de retorno de la inversión, posibilidades económicas del productor, entre otros factores; con el fin de determinar si esta estrategia puede ser viable para el productor.
- En caso de no obtener un volumen de AVUs suficiente para realizar su aplicación respetando los 900 litros diarios, podría considerarse disminuir las cantidades requeridas según los ensayos, disminuyendo la proporción de los mismos por debajo del 1% p/p. Otra posibilidad sería disminuir la frecuencia de aplicación (bisemanal, semanal, bimensual, etc.). Estas prácticas requerirían de ensayos previos con los purines de porcinos controlando diferentes factores para evitar perjudicar la operación del biodigestor a largo plazo.
- La aplicación a gran escala de los AVUs en otros proyectos, debería considerarse según la tecnología disponible o instalada, tomando como base los resultados obtenidos en la presente investigación, ya que al usar los residuos aceitosos de fritura al 1-4% se obtiene mayor producción de biogás. Deberán realizarse ensayos previos con el sustrato principal utilizado en cada proyecto en particular y en ningún caso deberá considerarse aplicar AVUs directamente en el biodigestor. Su aplicación indiscriminada o con falta de principios y bases técnicas podría conllevar fallas operativas en el funcionamiento del biodigestor, lo que podría perjudicar al productor.
- En caso de implementarse la aplicación de este tipo de sustrato en el biodigestor, sería necesario que un profesional del área de las Ciencias Agrarias determine la factibilidad técnica y ambiental de su aplicación para evitar un impacto ambiental indeseado debido al uso que se le da al digerido en los lotes de la producción agrícola.

Anexo 2: Diagrama de flujo del procesos



Anexo 3: Tabla de resultados del abastecimiento energético

Ensayo	Escenario	Producción de energía eléctrica (kWh/día)	Consumo eléctrico diario (kWh/día)	Cobertura de consumo eléctrico
Producción actual	1 (CH4 60%)	186,7	1000	18,70%
	2 (CH4 75%)	233,4		23,30%
AVUs al 1% p/p	1 (CH4 60%)	840		84%
	2 (CH4 75%)	1050		105%

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Vicari, María P. 2012. Efluentes en producción porcina en Argentina : Generación, impacto ambiental y posibles tratamientos. Trabajo Final de Ingeniería en Producción Agropecuaria. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Católica Argentina. Disponible en: [\[http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/tesis/efluentesproduccion-porcina-argentina.pdf\]](http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/tesis/efluentesproduccion-porcina-argentina.pdf)
- Ana Rosa García, Santiago Nicolás Fleite, Jaqueline Bereterbide, 2016. Marco legal ambiental para el manejo de residuos en producciones animales intensivas. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Disponible en: [\[https://inta.gob.ar/sites/default/files/marco_legal_para_manejo_residuos_sist._prod._animal_-_inta_2.pdf\]](https://inta.gob.ar/sites/default/files/marco_legal_para_manejo_residuos_sist._prod._animal_-_inta_2.pdf)
- Prof. María Teresa Varnero Moreno, Santiago de Chile, 2011. Manual de Biogás. Gobierno de Chile: Ministerio de Energía. PNUD, FAO, Global Environment Facility. Disponible en: [\[https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/manual_de_biogas.pdf\]](https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/manual_de_biogas.pdf)
- Ing. A. M. Sc. Jorge A. Hilbert. Instituto de Ingeniería Rural. I.N.T.A. - Castelar. Disponible en: [\[https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manual_para_la_produccion_de_biogas_del_iir.pdf\]](https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manual_para_la_produccion_de_biogas_del_iir.pdf)
- Huerga, I.R. , 2019. Residuos Pecuarios. Actualidad de normativas y lineamientos para regulaciones provinciales. AER INTA Venado Tuerto. Disponible en: [\[https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta-oliveros.residuos-pecuarios.actualidad-normativas-y-lineamientos-regulaciones-provinciales.pdf\]](https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta-oliveros.residuos-pecuarios.actualidad-normativas-y-lineamientos-regulaciones-provinciales.pdf)
- Huerga I. R., Mariano Butti, Daniel Intaschi, José Masigogge, Leandro Pusineri y Sergio Justianovich, 2016. Generación de biogás: Experiencia del Tambo La Natividad, Coronel Dorrego, Buenos Aires. INTA. Disponible en: [\[https://www.produccion-animal.com.ar/Biodigestores/85-biogas-inta_ipaf_pampeana.pdf\]](https://www.produccion-animal.com.ar/Biodigestores/85-biogas-inta_ipaf_pampeana.pdf)
- Ing. Amb. Msc. Ignacio Huerga. ENSAYO DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS: ADECCO AGRO - TAMBO 2. INTA Venado Tuerto.
- Paulo Armando Victória de Oliveira, Martha Mayumi Higarashi, Concórdia, SC 2006. Generación y uso de biogás en unidades de producción porcina. Proyecto de control de la degradación ambiental derivada de crianza de cerdos en Santa Catarina. Embrapa. Disponible en: [\[https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/856124/geracao-e-utilizacao-de-biogas-em-unidades-de-producao-de-suinos\]](https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/856124/geracao-e-utilizacao-de-biogas-em-unidades-de-producao-de-suinos)
- Ulrich Lossie, Petra Pütz. Informe práctico: Análisis de laboratorio. Valoración FOS/TAC. Control orientado de plantas de biogás con la ayuda de FOS/TAC. Fuente: EnerCess. Disponible en: [\[https://es.scribd.com/document/455419060/Control-Orientado-de-Plantas-de-Biogas-con-ayuda-de-FOS-TAC\]](https://es.scribd.com/document/455419060/Control-Orientado-de-Plantas-de-Biogas-con-ayuda-de-FOS-TAC)
- Voß E., Weichgrebe D., Rosenwinkel, K.-H., VE Efficiency Solutions GmbH, Landesbergen, Alemania. FOS/TAC - Deducción, métodos, aplicación y significado. ISAH - Instituto para la

Calidad del Agua y Gestión de Residuos, Hannover, Alemania. Disponible en: [\[https://www.yumpu.com/en/document/view/7291332/fos-tac-deduction-methods-application-and-ve-gmbh\]](https://www.yumpu.com/en/document/view/7291332/fos-tac-deduction-methods-application-and-ve-gmbh)

- Vaquerano-Pineda, N; Salazar-Rojas, T; Porras-Acosta - Costa Rica, 2016. M. Medición automática del metano en biogás, por columnas de desplazamiento. Tecnología en Marcha. Encuentro de Investigación y Extensión 2016. Disponible en: [\[https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0379-39822016000900086&lng=en&nrm=iso&tlnq=es\]](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0379-39822016000900086&lng=en&nrm=iso&tlnq=es)
- Patricia Bres, María Eugenia Beily, Diana Crespo - Buenos Aires, 2022. Ensayo potencial bioquímico metanogénico. Una metodología clave para conocer la energía de las biomásas. Ediciones INTA. Disponible en: [\[https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/handle/20.500.12123/11309\]](https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/handle/20.500.12123/11309)
- María Eugenia Castelao Caruana ; contribuciones de Solange Preuss ; Agustín Piccoletti - Ciudad Autónoma de Buenos Aires, 2018. Economía y organización de proyectos de generación de bioenergía en feedlots en Argentina. CONICET - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas . Centro de Estudios Urbanos y Regionales - CEUR. Disponible en: [\[http://www.ceur-conicet.gov.ar/archivos/publicaciones/Bioenergia_en_feedlots_CAF_CONICET_INTI_\(1\).pdf\]](http://www.ceur-conicet.gov.ar/archivos/publicaciones/Bioenergia_en_feedlots_CAF_CONICET_INTI_(1).pdf)
- Virginia García Páez. Dirección de Sustentabilidad, Medio Ambiente y Cambio Climático de la provincia de Buenos Aires. Manual de Biogás: Conceptos básicos. Página 27. Visto en línea en: [\[https://www.gba.gob.ar/sites/default/files/agroindustria/docs/Manual_de_Biogas01.pdf\]](https://www.gba.gob.ar/sites/default/files/agroindustria/docs/Manual_de_Biogas01.pdf)
- MAGyP. SENASA. Mapas de distribución de existencias bovinas. Existencias bovinas - Participación en total de establecimientos. Visto en línea en: [\[https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2_densidad_bovinos_km2_31122021.png\]](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2_densidad_bovinos_km2_31122021.png)
- LEGISLATURA DE LA PROVINCIA DE SANTA FE. Ley N° 13808/18: REGULACIÓN, CONTROL Y GESTIÓN INTEGRAL DE ACEITES VEGETALES Y GRASAS DE FRITURAS USADOS PARA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES. Disponible en: [\[http://www.santafe.gob.ar/index.php/web/content/download/252275/1326740/file/Ley%2013808.pdf\]](http://www.santafe.gob.ar/index.php/web/content/download/252275/1326740/file/Ley%2013808.pdf)
- Decreto Provincial N° 2151/14: Residuos No Peligrosos Industriales o de Actividades de Servicios. Gobierno Santa Fe. Disponible en: [\[https://www.santafe.gov.ar/index.php/web/content/view/full/185309#:~:text=T%C3%ADtulo-,A prueba%20la%20reglamentaci%C3%B3n%20tendiente%20a%20regular%20la%20gesti%C3%B3n%20de%20los,o%20de%20actividades%20de%20servicios\]](https://www.santafe.gov.ar/index.php/web/content/view/full/185309#:~:text=T%C3%ADtulo-,A prueba%20la%20reglamentaci%C3%B3n%20tendiente%20a%20regular%20la%20gesti%C3%B3n%20de%20los,o%20de%20actividades%20de%20servicios)
- E.D. Días, J.C. Kreling, R. Botero , J.V. Murillo - Año 2007. EVALUACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD Y DEL EFLUENTE DE BIODIGESTORES SUPLEMENTADOS CON GRASAS RESIDUALES. Universidad EARTH (Las Mercedes de Guácimo, Limón, Costa Rica).

- *Carlos Ordax de Castro - 2013. Valorización integral de los residuos procedentes del procesado de aceites vegetales usados. Proyecto VALUVOIL. Área de Biocombustibles del Centro Tecnológico CARTIF. Conferencias de Bioenergía y tratamientos energéticos de residuos.*
- *H. Villanueva Fernández y J. M. Hinga Blas - Perú, 2018. Eficiencia de la producción de biogás a partir de residuos aceitosos de fritura. Facultad de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales: Universidad Nacional del Callao. Disponible en: [\[http://209.45.55.171/bitstream/handle/20.500.12952/2969/Villanueva%20Fernandez%20y%20Hinga%20Blas_TITULO%20AMBIENTAL_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y\]](http://209.45.55.171/bitstream/handle/20.500.12952/2969/Villanueva%20Fernandez%20y%20Hinga%20Blas_TITULO%20AMBIENTAL_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y)*
- *Dra. (Ing. Agr.) Vanesa Pegoraro Responsable de los Análisis de Residuos Pecuarios del Laboratorio de Gestión Ambiental de la EEA INTA Marcos Juárez. Muestreo de efluente porcino para uso agronómico. Año 2020. Disponible en: [\[https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_mj_muestreo_efluentes_2020.pdf\]](https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_mj_muestreo_efluentes_2020.pdf).*
- *Carlos Alberto Severiche Sierra, Marlon Enrique Castillo Bertel y Rosa Leonor Acevedo Barrios - Cartagenas de Indias, Colombia - 2013. Manual de Métodos Analíticos para la Determinación de Parámetros Físicoquímicos Básicos en Aguas. Disponible en: [\[https://www.eumed.net/libros-gratis/2013a/1326/1326.pdf\]](https://www.eumed.net/libros-gratis/2013a/1326/1326.pdf)*