

# EVALUACIÓN DE LA BIODIGESTIÓN APLICADA AL TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA CERVECERA ARTESANAL EN MENDOZA, ARGENTINA

Agustín Guisasola

Para optar al título de INGENIERO EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

Facultad de Ciencias Agrarias - Universidad Nacional de Cuyo

Mendoza, Argentina

19 de Agosto de 2022

*EVALUACIÓN DE LA BIODIGESTIÓN APLICADA  
AL TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS  
PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA CERVECERA  
ARTESANAL EN MENDOZA, ARGENTINA*

Agustín Guisasola

Contacto: [aguisasolacrembil@gmail.com](mailto:aguisasolacrembil@gmail.com)

Director: Ing. RNR. José Nicolás Martín

Codirectora: Ing. Qca. Natalia Spano

Comisión Evaluadora: 6

## RESUMEN

Desde los años 90, la industria de cerveza de tipo artesanal se encuentra en permanente expansión tanto a nivel provincial como nacional. Durante su proceso productivo, se originan grandes cantidades de un residuo biomásico, conocido como “bagazo”. Un producto orgánico de estructura lignocelulósica con gran hidratación. Consecuentemente, la presión sobre el ambiente en lo que a contaminación se refiere, irá en aumento si no es llevado a cabo un correcto tratamiento del mismo.

Para minimizar el impacto que puede tener un proceso agroindustrial como el descrito, se puede fomentar la utilización de fuentes energéticas que aprovechen la biomasa. Esto permite transformar elementos que son considerados como desechos en una primera instancia, en subproductos que serán aprovechados. Es por eso que el presente trabajo tiene como objetivo llevar a cabo un análisis de viabilidad de la tecnología de biodigestión como un sistema de tratamiento de residuos sólidos en la industria de cerveza artesanal.

En esta tesis, se hace énfasis en el estudio del Potencial de Biometanización (BMP) del bagazo de cerveza con dos inóculos diferentes (guano de gallina ponedora y de cerdo de corral). También se analiza la viabilidad del biol resultado de la biodigestión a escala batch como uso fertilizante. Por último, se propone el diseño de un biodigestor que trate la totalidad de residuos generados en una cervecería artesanal ubicada en Maipú, provincia de Mendoza. Mediante la utilización del mismo, se calculó la disminución de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) que se produciría debido al reemplazo de Gas Licuado de Petróleo (GLP) por biogás, en la cervecería artesanal presentada.

Los resultados de la biodigestión batch del bagazo de cerveza para un tiempo de ensayo de 31 días, uso de dos cosustratos diferentes, 0,350 l de reacción y 5% de dilución en Sólidos Totales (%ST), muestran que los potenciales de biometanización son prácticamente iguales, con valores correspondientes de 80,5 (ml de biogás/g ST) con el cosustrato aviar, y de 80,4 (ml de biogás/g ST) con el cosustrato porcino.

El ensayo “Toxicidad aguda con semillas de Lechuga (*Lactuca sativa*)” brinda información sobre cuán perjudicial en la salud vegetal puede ser un elemento líquido. En este caso se evaluaron los bioles generados de la biodigestión a escala batch a diferentes diluciones. Obteniendo como resultado que el bagazo inoculado con guano de gallina al 10%, es más favorable en la elongación radical y del hipocótilo, con una Germinación Relativa GR (%) de 78,7 %, un Largo de Germinación Relativa ER (%) de 94,8 % y un Índice de Germinación IG (%) de 74,7 %, por lo tanto, una toxicidad moderada. En cambio, con el cosustrato porcino en cualquiera de las diluciones usadas, no se produjeron buenas características germinativas, obteniendo en todas las diluciones toxicidades severas.

Por último, se determinó que un biodigestor que trate la totalidad de los residuos generados por la cervecería artesanal estudiada, con un esquema de producción de 870 l de cerveza por lote y una variación productiva que va de 7 a 13 cocciones mensuales, según la estación del año, debería tener un volumen de reacción de 73,2 m<sup>3</sup>. Produciendo un reemplazo energético de 17,7 % de la fuente convencional de GLP por biogás, en el lapso de un año. Debido a esto, se calculó una potencial disminución de 2876,2 kg CO<sub>2EQ</sub> de GEI por año. Lo que representa grandes beneficios de tipo ambiental, pero la factibilidad de su implementación se ve reducida, por la considerable inversión que debería realizar el productor para construir una planta de biogás de tales dimensiones y tecnología.

**PALABRAS CLAVE:** Biodigestión, biogás, bagazo, biomasa, biol, GEI.

## SUMMARY

Since the 1990s, the craft beer industry has been in permanent expansion at both provincial and national level. During its production process, large quantities of biomass waste are generated. Which is known as Brewer Spent Grain (BSG), this is an organic product with a lignocellulosic structure and high hydration. The pressure on the environment in terms of pollution will consequently increase if it is not correctly treated.

In order to minimise the impact of an agro-industrial process such as the one described, the use of energy sources that make use of biomass can be encouraged by transforming elements that are considered waste in the first instance into useful products that will be used. That is why the present work seeks to investigate the feasibility of anaerobic digestion technology as a solid waste treatment system in the craft beer industry.

In this study, emphasis is placed on the study of Biomethanes Potential (BMP) of Brewer Spent Grain (BSG), with two different inoculums (chicken manure and pig manure). It also analyses the viability of the biol resulting from anaerobic digestion at batch scale as a fertiliser. In addition, it is proposed the design of a biodigester to treat all the waste generated in a craft brewery located in Maipú, Mendoza province. Finally, it was calculated the reduction of Greenhouse Gas (GHG) emissions due to the replacement of Liquefied Petroleum Gas (LPG) in the craft brewery presented.

The results of the batch biodigestion of Brewer Spent Grain (BSG) for a test time of 31 days, using two different cosubstrates, 0.350 l reaction and 5% dilution in Total Solids (%ST), show that the BMP are almost equal with corresponding values of 80.5 (ml biogas/g ST) with the chicken manure as cosubstrate, and 80.4 (ml biogas/g ST) with the porcine manure as cosubstrate.

The test "Toxicity with lettuce seeds (*Lactuca sativa*), provides information on how detrimental a liquid element can be to plant health. In this case, the biol generated from batch-scale anaerobic digestion at different dilutions, showed that the resultant brewer spent grain inoculated with 10% chicken manure is more favourable for root and hypocotyl elongation. This resulted in a Relative Germination Percentage GR (%) of 78.7 %, a Relative Germination Length ER (%) of 94.8 % and a Germination Index Percentage IG (%) of 74.7 %. Thus, it represents a moderate toxicity. In contrast, biols products of BSG and the porcine inoculum in any other dilution used, did not show good germination characteristics, causing in all severe toxicities.

Finally, it was determined a biodigester to treat all the waste generated by the craft brewery studied, with a production scheme of 870 l of beer per batch and a production variation ranging from 7 to 13 brews per month (depending on the season of the year). The result shown that it should have a reaction volume of 73.2 m<sup>3</sup> and it will produce an energy replacement of 17,7 % of the conventional LPG source by biogas, within one year. Due to this, a potential decrease of 2876,2 kg CO<sub>2EQ</sub> of GHG per year was calculated. This represents significant environmental benefits, but the feasibility of its implementation is reduced due to the considerable investment that the producer would have to make to build a biogas plant of such dimensions and technology.

**KEY WORDS:** Anaerobic digestion, biogas, biomas, biol, Brewers Spent Grain (BSG), GHG.

## AGRADECIMIENTOS

*A mi director de tesis, Nicolás, que ha hecho un trabajo excelente, siempre atento a mis dudas, y estando al tanto de mis avances. Me demostraste tu gran pasión por las energías alternativas, lo que hizo que esta tesis sea mucho más placentera.*

*A mi codirectora, Natalia, la cual ha hecho su aporte y me ha acompañado en mis primeras experiencias laborales y de investigación relacionadas al biogás.*

*A Andrea, de la cátedra de Química General e Inorgánica de la Facultad de Ciencias Agrarias. Ella me facilitó gran cantidad de las herramientas y materiales utilizados para este estudio.*

*A Iván, profesor de la Facultad e investigador del INTA, que me brindó su asesoría, conocimientos, y un espacio adecuado para poder realizar uno de los ensayos.*

*Quiero agradecerle y dedicarle este trabajo a mis viejos, Alejandro y Stella Maris, que siempre me mostraron su apoyo incondicional en este lindo camino de ser estudiante. También a mis hermanos, Juani, Mari y Gabi, los cuales son pilares fundamentales en mi vida. Además, festejo con vos abue, aunque estemos en diferentes planos terrenales.*

*A mis amigos y compañeros de la facultad, Ari, Coni, Ema, Marc, Luisi, Ro y Seba. Agradecido de haber compartido tantos mates, risas, viajes, historias y conocimientos.*

*A la Argentina, país que me dio la posibilidad de obtener educación de calidad y gratuita, en una institución tan prestigiosa como la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cuyo.*

## Tabla de contenido

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1	Hipótesis.....	1
1.2	Objetivo general .....	1
1.3	Objetivos específicos.....	2
1.4	Estado del arte .....	2
1.4.1	Biodigestión anaerobia .....	2
1.4.2	Tipos de biodigestores.....	4
1.5	Parámetros óptimos de la biodigestión .....	9
1.5.1	Sólidos presentes en el/los sustratos de la biodigestión.....	9
1.5.2	Temperatura .....	9
1.5.3	Potencial de Hidrógeno (pH) .....	10
1.5.4	Relación C/N .....	11
1.5.5	Agitación y mezcla.....	12
1.5.6	Tiempo de Retención Hidráulica .....	12
1.5.7	Velocidad de carga volumétrica .....	13
1.6	Inhibidores en la biodigestión .....	13
1.7	Biol como biofertilizante .....	14
1.7.1	Correcto uso del biol en cuanto a la nutrición vegetal.....	15
1.8	Disminución de Gases de Efecto Invernadero por efecto de la biodigestión .....	16
1.9	Biogás en Argentina según caso de estudio .....	16
1.10	Proceso productivo de cerveza.....	18
1.11	Bagazo de cerveza .....	21
1.12	Antecedentes del uso o aprovechamiento del bagazo cervecero.....	21
1.13	Marco legal Nacional .....	23
1.13.1	Energías renovables .....	23
1.13.2	Leyes y Normativas pertinentes.....	23
1.13.3	Leyes o normativas adoptadas en función de Convenciones Internacionales ..	24
1.14	Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible .....	25
<b>2</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>25</b>
2.1	Potencial de Biometanización (BMP) del bagazo de cerveza en codigestión con inóculo aviar y porcino.....	26
2.2	Viabilidad del biol obtenido para el crecimiento vegetal .....	28
2.3	Tecnología necesaria para tratar la totalidad de bagazo generado en una cervecería local .....	31

2.4	Estudio de factibilidad económica para la implementación del biodigestor que trate la totalidad de residuos producidos en la cervecería local .....	31
<b>3</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>32</b>
3.1	Caracterización de sustratos .....	32
3.2	Potencial de biometanización (BMP) del bagazo de cerveza .....	33
3.3	Caracterización del biol .....	34
3.3.1	Parámetros biol obtenido .....	34
3.3.2	Fitotoxicidad .....	35
3.3.3	Dosis-Respuesta en función de la elongación radicular a diferentes concentraciones.....	37
3.4	Análisis de la viabilidad técnica para la implementación de un biodigestor en la cervecería estudiada .....	38
3.4.1	Cálculo del volumen de reacción de un biodigestor para tratar la totalidad de residuos generados.....	38
3.4.2	Abastecimiento energético estacional y anual de la cervecería analizada con biodigestión del bagazo producido .....	41
3.4.3	Disminución de GEI por implementación de biogás .....	42
3.4.4	Factibilidad económica en la implementación del biodigestor dimensionado en una cervecería de tipo artesanal.....	42
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>45</b>
<b>5</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>46</b>
<b>6</b>	<b>ANEXOS</b> .....	<b>54</b>
6.1	Anexo 1: Fitotoxicidad .....	54
6.2	Anexo 2: Ensayo de BMP .....	57

## Índice de tablas

Tabla 1:	Composición promedio del biogás.....	2
Tabla 2:	Clasificación de biodigestores en función de distintos criterios.....	4
Tabla 3:	Rangos de temperatura y tiempos de fermentación anaerobia.....	10
Tabla 4:	Inhibidores de la biodigestión .....	14
Tabla 5:	Composición del bagazo de cerveza.....	21
Tabla 6:	Nomenclatura utilizada en ensayo de laboratorio para identificar tratamientos. ....	26
Tabla 7:	Caracterización de sustratos. ....	32
Tabla 8:	Producción acumulada promedio según tratamiento.....	33
Tabla 9:	pH y Conductividad de bioles resultantes de los ensayos de biodigestión. ....	34
Tabla 10:	Porcentaje de Germinación relativo GR (%), Largo de la Radícula Relativo ER (%) y Porcentaje de Germinación IG (%) de los bioles resultantes de los tratamientos B+C (%) y B+G (%) a diferentes concentraciones (5%, 10%, 50% 100%).....	35
Tabla 11:	Estadística descriptiva en base a la elongación de radícula e hipocótilo (mm) en diferentes tratamientos. ....	36
Tabla 12:	Largo promedio de radícula a diferentes diluciones de bioles (5%,10%,50%,100%) provenientes de la biodigestión de (B+G) y (B+C) y porcentaje de inhibición relativizados al control.....	37

Tabla 13: Largo promedio de hipocotilos a diferentes concentraciones de biol y porcentaje de inhibición relativizados al control. ....	38
Tabla 14: Producciones según estación.....	40
Tabla 15: Reemplazo energético del biogás por GLP.....	41
Tabla 16: Cantidad germinada y longitud de radícula e hipocótilo de control. ....	54
Tabla 17: Cantidad germinada y longitud de radícula e hipocótilo de control B+C (10%). ....	54
Tabla 18: Cantidad germinada y longitud de radícula e hipocótilo de control de B+C (5%). .	55
Tabla 19: Cantidad germinada y longitud de radícula e hipocótilo de control de B+G (10%).	55
Tabla 20: Cantidad germinada y longitud de radícula e hipocótilo de control B+G (5%). ....	55
Tabla 21: Porcentaje de Germinación relativo GR (%), Largo de la Radícula Relativo ER (%) y Porcentaje de Germinación IG (%) de los bioles resultantes de los tratamientos B+C (%) y B+G (%) a diferentes concentraciones (5%, 10%, 50% 100%). ....	56
Tabla 22: Valor Medio de Semillas Germinadas y de Elongación Radicular en el testigo. ...	56
Tabla 23: Valores promedio normalizado en ml de biogás obtenidos a lo largo del ensayo de BMP a escala batch. ....	57
Tabla 24: Valores promedio de biogás normalizado y acumulado en ml a lo largo del tiempo de ensayo de BMP a escala batch .....	57

## Índice de figuras

Figura 1: Esquema de reacciones y elementos involucrados en la digestión anaerobia. ....	3
Figura 2: Curva característica de producción de biogás en biodigestores batch.....	5
Figura 3: Funcionamiento de un biodigestor discontinuo. ....	5
Figura 4: Biodigestor chino. ....	6
Figura 5: Esquema biodigestor tubular .....	7
Figura 6: Reactor de mezcla completa. ....	7
Figura 7: Reactor tipo U.A.S.B. ....	8
Figura 8: Composición del biogás vs pH en una mezcla de Guano – Tuna.....	11
Figura 9: Valores de pH vs actividad metanogénica. ....	11
Figura 10: Producción de biogás ( $m^3$ gas/ $m^3$ día) y eliminación de Sólidos Volátiles (%) para un biodigestor de mezcla completa en función del TRH.....	13
Figura 11: Ubicación geográfica plantas relevadas por INTI. ....	17
Figura 12: Tipos de sustratos más utilizados.....	18
Figura 13: Esquema del proceso productivo de cerveza .....	20
Figura 14: Montaje de biodigestores en forma esquemática (A) y montaje real (B). ....	27
Figura 15: Puesta en marcha biodigestores Batch. ....	28
Figura 16 Semillas en diferentes diluciones de bioles.. ....	29
Figura 17: Estufa de cultivo .....	30
Figura 18: Acumulación de biogás según diferentes tratamientos en el tiempo ensayado. ..	33
Figura 19: Ubicación de la cervecería artesanal.....	39
Figura 20: Esquema de producción de cervecería artesanal ubicada en Maipú, Mendoza...	39

## Índice de ecuaciones

Ecuación 1: Volumen de carga diaria.....	13
Ecuación 2: Normalización de volúmenes de biogás a Condiciones Normales de Presión y Temperatura.....	27
Ecuación 3: Índice de Germinación Relativo .....	30
Ecuación 4: Largo de Radícula Relativo.....	30
Ecuación 5: Índice de Germinación Relativo .....	30
Ecuación 6: Kilogramos diarios de Sólidos Totales en los meses de verano en una cervecería local.....	40
Ecuación 7: Volumen de reacción necesario del biodigestor para tratar la totalidad de residuos producidos. ....	40
Ecuación 8: Cantidad de biogás (m <sup>3</sup> ) que produciría el biodigestor de 73,2 m <sup>3</sup> asumiendo una eficacia del 50% con respecto al ensayo de laboratorio. ....	41
Ecuación 9: Energía en Kcal por el biogás obtenido en cada cocción .....	41
Ecuación 10: Totalidad de CO <sub>2eq</sub> emanado por el GLP utilizado de forma anual en la cervecería local.....	42

## Glosario

**Ácidos Grasos Volátiles (AGVs):** *“En la digestión anaeróbica de la biomasa se producen corrientes con una determinada concentración de ácidos carboxílicos de cadena corta, conocidos industrialmente como ácidos grasos volátiles (AGVs), como por ejemplo el ácido propiónico, el ácido butírico y el ácido valérico.”* (Rios, 2018).

**Anegado:** Zona cubierta con agua en gran cantidad. Sinónimo: Inundado.

**Biomasa:** Se conoce como biomasa a las sustancias de origen orgánico que están formadas por compuestos carbonados como productos de la actividad fotosintética, que pueden haber sufrido algunos cambios estructurales y que son muy propicios para ser utilizados por su tasa de renovación natural, por lo que no se incluyen los combustibles fósiles, que tardan miles de años en formarse (Manrique, 2015).

**BMP:** Siglas en inglés, resultado de “Biomethane Potential Test”. En español, Potencial Bioquímico de Metano, es un indicador de la biodegradabilidad anaerobia de los residuos orgánicos que proporciona el valor experimental de producción máxima de metano generada con una cantidad conocida de residuos orgánicos (Doublet *et al.*, 2013) en (Gonzalez-Sánchez *et al.*, 2015)

**Capacidad de Intercambio Catiónico:** Mide las cargas negativas de la superficie de los minerales y componentes orgánicos del suelo, esto representa la cantidad de cationes que pueden ser retenidos en la superficie (Ca, Mg, Na, K, etc.). Por lo tanto, un suelo con bajo CIC, tendrá poca habilidad de retención de nutrientes, será arenoso y pobre en materia orgánica. Su medición es en centimoles de carga por kg de suelo (“cmolc/ kg suelo” o “meq/100g suelo”) (FAO, 2022).

**Co-digestión:** digestión anaerobia de dos o más sustratos de origen diferente. Su principal ventaja consiste en aprovechar la sinergia de la mezcla, compensando las carencias que cada uno de los sustratos tengan por separado (Devesa, 2014).

**Costos directos:** *“Son aquellos que corresponden a un coste imputable a un determinado producto, proceso o sección”* (Gonzalez, 2020).

**Costos indirectos:** *“Son costes que no pueden ser directamente atribuibles a un determinado producto, a no ser que la planta produzca un único producto”* (Gonzalez, 2020).

**Costos fijos:** *“Son costes que no dependen de la cantidad producida. Están relacionados con el hecho de abrir la planta cada día ya supone estos costes”* (Gonzalez, 2020).

**Costos Variables:** *“Son costes que aumentan a medida que incrementa la producción. Se incluye dentro de los costes de las materias primas, la mano de obra directa y las patentes”* (Gonzalez, 2020).

**Descarboxilación:** Término utilizado en química para indicar la pérdida de un grupo carboxilo en forma de CO<sub>2</sub> (Cornejo Arteaga, s.f.).

**Gas Licuado de Petróleo (GLP):** *“mezcla de gases, en su mayoría compuestos por Butano y Propano, que se obtienen a través del refinamiento del petróleo y también de procesos de separación del gas natural. Una de sus características es que tiene un alto poder calorífico por unidad de volumen. Además, almacenarlo en estado líquido y en grandes cantidades facilita su modo de transporte.”* (Ministerio de Economía, s.f.)

**P-cresol:** Compuesto orgánico con la fórmula CH<sub>3</sub>C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>, sólido, incoloro, derivado del fenol, con isómeros como el o-cresol y el m cresol.

**Polietileno de Alta Densidad (PEAD):** *“Es un polímero de cadena lineal no ramificada. Su resistencia química y térmica y su dureza son superiores a las del polietileno de baja densidad. Presentan alta capacidad elástica y flexibilidad. Son muy utilizados para la fabricación de tubos (...)”* (Quintana et al., 2007)

**Policloruro de Vinilo (PVC):** *“Producto de la polimerización del monómero de cloruro de vinilo a policloruro de vinilo. Es un material termoplástico industrial amorfo, que puede ser transparente e incoloro pero que se encuentra comúnmente pigmentado”* (Quintana et al., 2007).

**Semilla fotoblástica negativa:** Son las semillas que germinan en la oscuridad, conforman el 25% de las especies. A diferencia de las fotoblásticas positivas, que germinan con presencia de luz, y conforman el 70% de las especies (Come, 1970).

# 1 INTRODUCCIÓN

Según diferentes estudios realizados por Flack (1997), Schnell (2003) y Eberts (2014) citado en un informe de Winkelmann et al. (2019), las cervezas artesanales se expanden en Argentina a una tasa del 30% anual. El mismo trabajo afirma que el mercado es liderado por micro y pequeñas empresas, orientado a los mercados locales y atento a las nuevas exigencias de los consumidores.

Estos autores afirman que en Argentina existen más de 1.200 microproductores y 200 pequeñas cervecerías en todo el país y en cuanto a producción, algunos datos registran un total de 16 millones de litros en 2015, tres millones más que en 2013. Un informe más reciente de la Cámara de "Industria Cervecera en Argentina" que menciona Martínez (2020), afirma este sector ha presentado un crecimiento promedio del 40% contemplando el periodo 2013-2018. Con 1500 productores artesanales en todo el país, representando el 2,5% del mercado cervecero total. Además del crecimiento productivo a nivel Nacional, también la industria artesanal se ha visto potenciada a nivel local, en la Provincia de Mendoza (Gonzalez, 2019), todo esto trae aparejado un aumento en el consumo de los combustibles fósiles para su elaboración.

Según Mussatto *et al.* (2004) el principal residuo de la industria cervecera tanto de pequeña como de gran escala, es conocido como bagazo, y representa el 85% del total de los residuos generados. Éste está compuesto en mayor medida por los restos de malta hidratada que se obtiene luego del proceso de maceración en la elaboración de la bebida alcohólica. Desde la década de los noventa, esta industria se encuentra en permanente crecimiento en Argentina (Gonzalez, 2008), por lo que la presión sobre el ambiente por estos restos generados es cada vez mayor.

Una posible solución frente a la generación de grandes cantidades de residuos de tipo biomásicos, se da con la tecnología de biodigestión, ya que, con la misma se produce una descomposición de forma controlada de éstos, y se obtiene una fuente de energía conocida como biogás, pudiendo ser utilizado con fines térmicos y/o eléctricos. Además de ello, se produce una estabilización de la materia orgánica contaminante, lo que permite que pueda ser usada posteriormente como fertilizantes y abonos. Varnero (2011) hace mención de otros beneficios de tipo ambientales, como la disminución de Gases de Efecto Invernadero (GEI); esto es debido al reemplazo que se produce de los combustibles de tipo convencionales por uno de tipo alternativo que proviene de una fuente de origen biomásico.

## 1.1 Hipótesis

El bagazo de cerveza es un sustrato óptimo para ser sometido al proceso de biodigestión, provocando la disminución en los impactos negativos ambientales de residuos provenientes de la producción de esta bebida, transformándolos en productos de utilidad como biogás y fertilizante.

## 1.2 Objetivo general

Evaluar la viabilidad técnica de la biodigestión del bagazo de cerveza y la efectividad de tratamiento del residuo mediante dicha tecnología.

## 1.3 Objetivos específicos

- 1) Determinar el potencial de biometanización (BMP) del bagazo de cerveza con dos cosustratos diferentes.
- 2) Analizar la viabilidad del digestato del proceso de biodigestión para ser utilizado en aplicación agrícola.
- 3) Determinar la efectividad de la biodigestión en cuanto a la disminución de residuos producidos y de GEI en una cervecería de tipo artesanal de Mendoza, en el lapso de un año.
- 4) Analizar la viabilidad técnica-económica de implementación de esta tecnología en una cervecería artesanal local.

## 1.4 Estado del arte

### 1.4.1 Biodigestión anaerobia

Se entiende por biodigestión al proceso de degradación de materia orgánica, tanto vegetal como animal, en ausencia de oxígeno, obteniéndose como producto biogás. Este proceso, se produce de forma natural en espacios que favorecen estas condiciones como en zonas anegadas y es por eso que se lo conoce con el nombre de “gas de los pantanos” (Hilbert, 2006).

El ser humano aprovechó este proceso observado para su propio beneficio, como la obtención de energía, pero realizándolo con un control de las condiciones del medio, tales como la temperatura, el pH, las relaciones proporcionales entre los sustratos que participan, las disoluciones de éstos en agua, entre otros.

El biogás está compuesto por metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), junto con otros gases traza (Tabla 1), es decir, que están en una proporción significativamente menor (Deublein; Steinhauser, 2008). También, se obtiene un residuo estabilizado que por lo general posee grandes propiedades como fertilizante, al poseer macronutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) (Molina tirado *et al.*, 2016).

Tabla 1: Composición promedio del biogás.

Composición biogás	Volumen del gas en volumen total (%)
Metano (CH <sub>4</sub> )	50-75
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	25-45
Vapor de Agua (H <sub>2</sub> O)	2-7
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	<2
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	<2
Sulfuro de Hidrógeno (H <sub>2</sub> S)	<2
Monóxido de Carbono (CO)	Traza
Amoníaco (NH <sub>3</sub> )	Traza

Fuente: (Ortiz *et al.*, 2017) citado en (Gutiérrez, 2019).

En la producción de biogás actúa una comunidad de bacterias y arqueas, que irán variando su composición a medida que la biodigestión pasa por sus diferentes etapas. Entre éstas, encontramos las metanogénicas, las cuales promoverán la producción de metano, gas de especial interés como combustible. Para favorecer su presencia, es necesario contar con un inóculo, es decir, un material que posea una fuerte flora de microorganismos metanogénicos. Por lo general se obtiene de estiércoles de animales de corral, plantas de tratamientos de efluentes u otros biodigestores. Este inóculo, favorecerá la degradación de la materia orgánica presente.

La digestión de la materia orgánica ocurre en cuatro etapas básicas: **hidrólisis**, **acidogénesis**, **acetogénesis** y **metanogénesis**; en la etapa final, los compuestos intermedios formados en las etapas anteriores se rompen para formar metano, este gas es almacenado como producto principal del proceso (Gonzalez, Gaza, Urueña, 2007).

Varnero (2011) detalla que, en la primera etapa, la **hidrólisis**, se produce la descomposición de las macromoléculas orgánicas de mayor peso molecular (proteínas, carbohidratos y lípidos), las cuales son hidrolizadas por enzimas extracelulares producidas por microorganismos acidogénicos o fermentativos. Como resultado se obtienen compuestos solubles más sencillos (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga), que serán metabolizados en la **acidogénesis**, donde se obtiene principalmente ácidos orgánicos de cadena corta, alcoholes, hidrógeno ( $H_2$ ), dióxidos de carbono ( $CO_2$ ) y otros productos intermedios (Varnero, 2011). Para luego pasar a la **acetogénesis**, donde se transforman ácidos grasos de cadena corta en ácido acético ( $CH_3COOH$ ), hidrógeno ( $H_2$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ), donde actúan organismos acetogénicos (Varnero, 2011). Por último, en la **metanogénesis**, se produce metano a partir de ácido acético,  $H_2$  y  $CO_2$  con la intervención de organismos metanogénicos (Varnero, 2011).

La Figura 1 muestra cómo se desarrolla el proceso de biodigestión. Indicando en la parte derecha las diferentes partes del proceso (Hidrólisis-Acidogénesis-Acetogénesis-Metanogénesis)

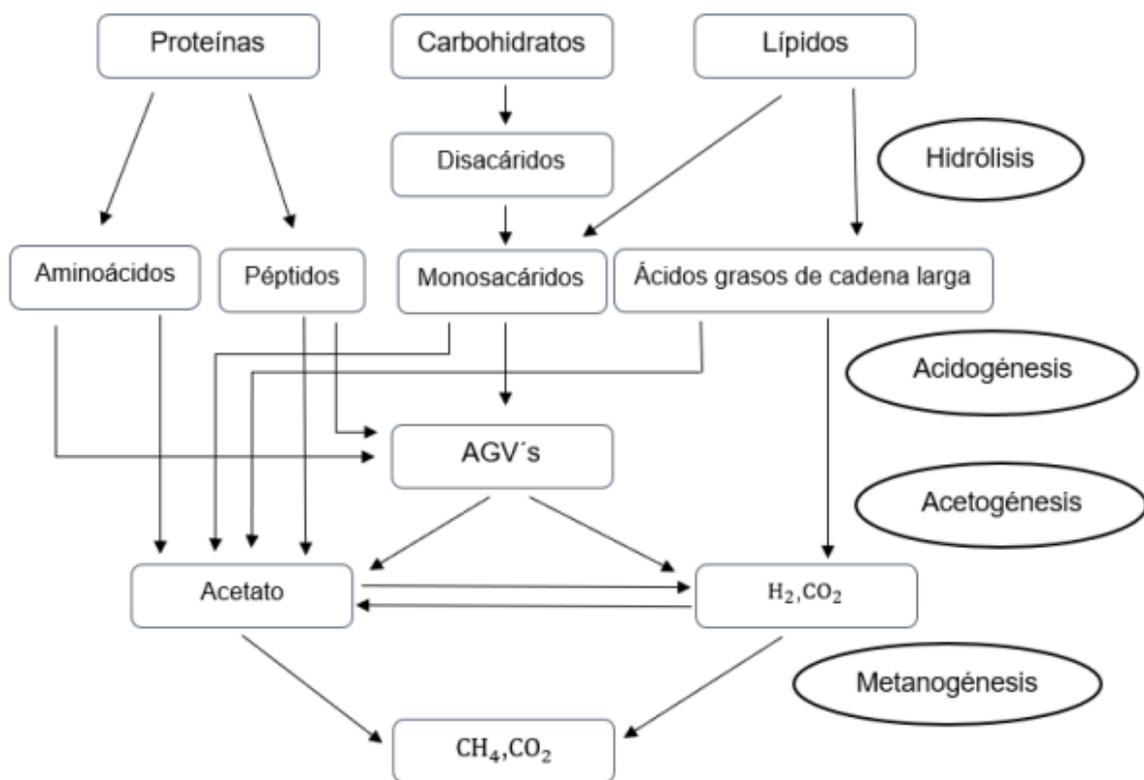


Figura 1: Esquema de reacciones y elementos involucrados en la digestión anaerobia.

**Fuente:** Li, Chun y Wu (2019) citado en (Pedraza, S.N).

Varnero (2011) afirma que los materiales lignocelulósicos son de difícil degradación microbiana por la estructura polimérica compleja que éstos poseen, como lignina, celulosa y hemicelulosa, y esto tiene como consecuencia una gran inercia para iniciar el proceso hidrolítico. Es por esto, que esta autora explica que para favorecer su degradación mediante biodigestión es recomendable llevar a cabo un tratamiento previo, lo que conducirá a una

reducción del tamaño de las partículas, aumentando la relación superficie/volumen para que puedan actuar tanto las bacterias y arqueas intervinientes.

### 1.4.2 Tipos de biodigestores

La biodigestión utiliza dispositivos herméticos denominados biodigestores, que pueden variar significativamente en tamaño y también en estructura según los propósitos de los mismos, los recursos con los que se cuentan, y el ambiente en el que se encuentran insertos.

Hilbert (2006) realiza la clasificación de los biodigestores para poder estudiarlos de una forma más simplificada, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: Clasificación de biodigestores en función de distintos criterios.

1. FRECUENCIA DE CARGA	a) Sistema batch b) Sistema continuo c) Sistemas semicontinuos
2. INTENSIDAD DE MEZCLA	a) Mezcla completa b) Mezcla parcial o nula
3. MANEJO DEL SUSTRATO	a) Contacto anaeróbico b) U.A.S.B (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) c) Lecho fluidizado d) Filtro anaeróbico
4. MANEJO BIOQUÍMICO	a) Una etapa b) Dos etapas

Fuente: Hilbert (2006).

#### 1.4.2.1 Frecuencia de carga

Según la frecuencia con la que se añade el sustrato y la salida del efluente producido, existen biodigestores de tipo discontinuo, continuo y semicontinuos, éstos se detallan a continuación.

##### 1.4.2.1.1 a. Biodigestores batch (o discontinuos)

El discontinuo o tipo batch, se lo alimenta una sola vez con el sustrato y el inóculo correspondiente, se mide la producción que se produce de gas en un cierto período de tiempo y luego se retira el efluente. Para favorecer su arranque, se requiere al menos una producción de inóculo del 20%, obteniendo así una curva característica de arranque-estabilización y agotamiento, representada en la Figura 2 (Hilbert, 2006).

Éstos, por lo general son pequeños, y sirven para analizar los potenciales de producción de biogás de diferentes sustratos, conocido como BMP (FAO, 2019). También, son muy tenidos en cuenta en el diseño y operación de biodigestores a escala real, pudiendo analizar en un primer momento la factibilidad técnica, balance energético, condiciones operativas, tamaño de reactores y otros equipamientos (Cristof Holliger *et al.*, 2016).

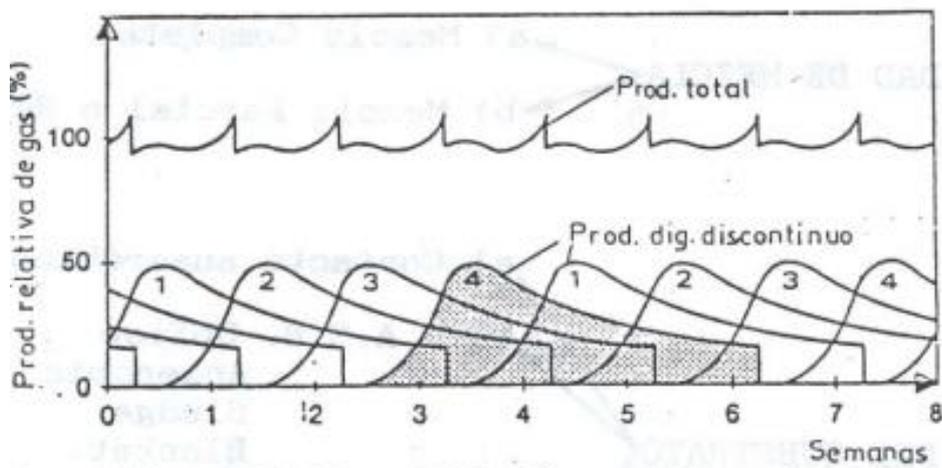


Figura 2: Curva característica de producción de biogás en biodigestores batch.  
**Fuente:** (Hilbert, 2006).

En la Figura 3 puede verse como opera un biodigestor batch o discontinuo. Varnero (2011) afirma que, en un primer momento, entra el sustrato inoculado, para luego ser digerido en ausencia de oxígeno. Próximamente se produce una separación de los elementos dentro de él por diferencia de densidades, y por último, se descarga del material que se encuentra dentro del biodigestor, generalmente cuando la producción de biogás ya es ínfima (Varnero, 2011).

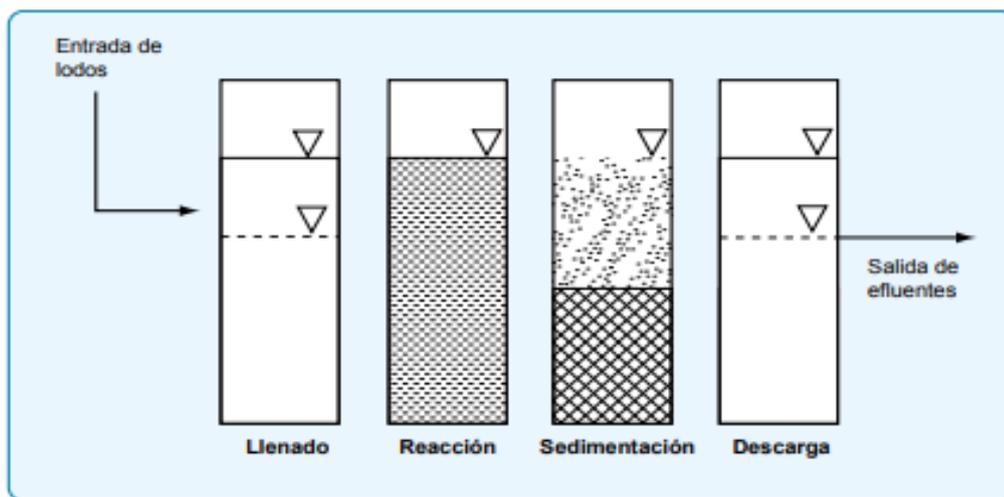


Figura 3: Funcionamiento de un biodigestor discontinuo.  
**Fuente:** (Varnero, 2011).

#### 1.4.2.1.2 b. Biodigestores continuos

Por otra parte, existen los biodigestores continuos, en éstos la alimentación es un proceso ininterrumpido donde el efluente que descarga es igual al afluente o material de carga, produciendo biogás, de forma uniforme en el tiempo (suelen utilizarse para tratar aguas) (Varnero, 2011). Los biodigestores continuos son cargados de forma diaria y la biomasa estará dentro del biodigestor un tiempo igual al cociente del volumen del mismo por su volumen de carga, expresado en días (Hilbert, 2006).

#### 1.4.2.1.3 c. Biodigestores semicontinuos

También, existen los biodigestores semicontinuos, en donde la primera carga que se introduce al digester consta de una gran cantidad de materias primas. Posteriormente, se agregan volúmenes de nuevas cargas de materias primas en función del tiempo de retención hidráulico (TRH) y del volumen total del digester. Además, son descargados uno o dos veces al año, momento que coincide con el período de siembra para poder aprovechar el poder fertilizante del digestato, en donde parte de éste se utilizará para arrancar de nuevo el proceso. Es muy utilizado en China, como se muestra en la Figura 4 (Hilbert, 2006).

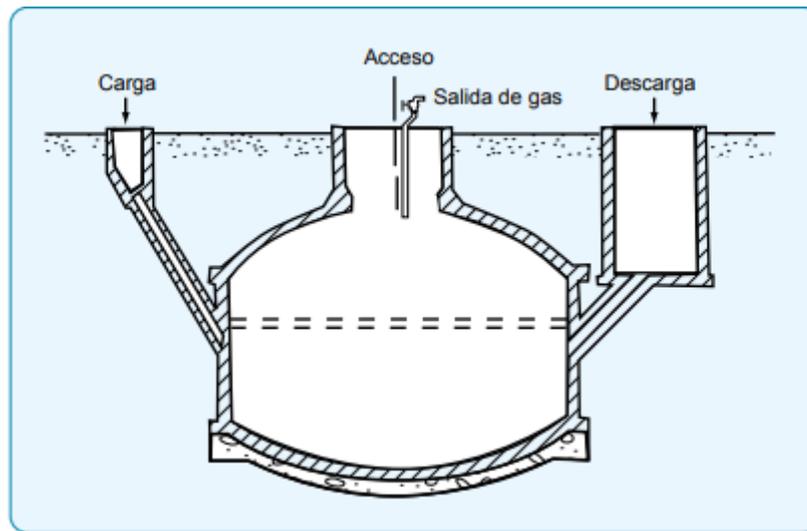


Figura 4: Biodigestor chino.

**Fuente:** Varnero (2011).

Otro tipo de biodigestor de régimen semicontinuo, es el biodigestor tubular (taiwanés, bolsa o balón), representado esquemáticamente en la Figura 5. El mismo combina la cámara de digestión, el tanque de sedimentación y el gasómetro en toda su estructura (Zabaleta, Viera y Aldana, 2017). Parte del volumen del biodigestor es ocupado por el sustrato, ya que la otra parte será la que se llenará con gas, dándole forma al gasómetro en este proceso (Zabaleta, Viera y Aldana, 2017). Éste debe ser apoyado hasta el nivel de mezcla que contiene en su interior, mediante una zanja cavada en el suelo, que posee la función aislante térmico, con las entradas y salidas correspondientes al sistema (Zabaleta, Viera y Aldana, 2017).

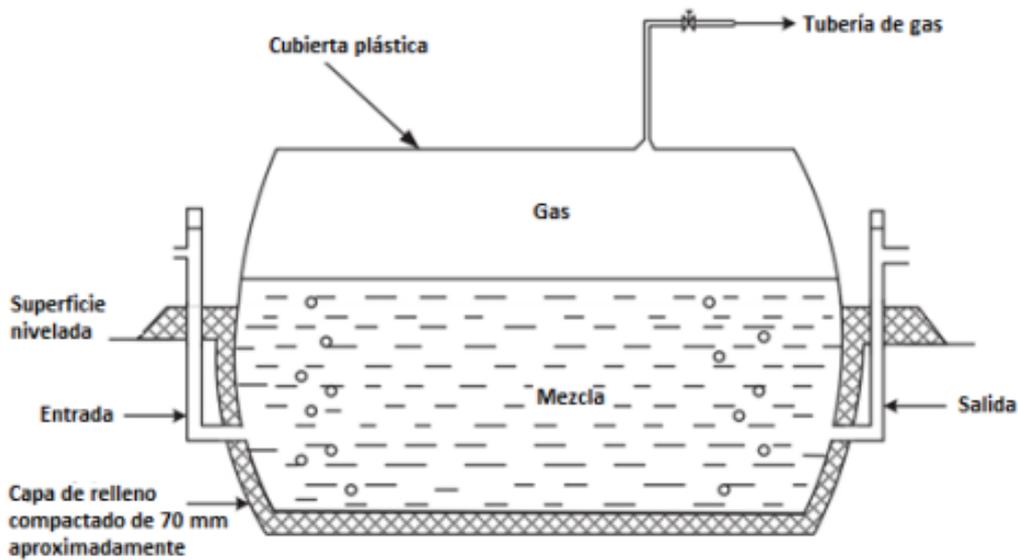


Figura 5: Esquema biodigestor tubular  
**Fuente:** Mazumdar (1982) en (Zabaleta, Viera y Aldana, 2017)

#### 1.4.2.2 Intensidad de mezcla

##### 1.4.2.2.1 Mezcla completa

Según el Ministerio de Energía de Chile (2012) un tipo de biodigestor ampliamente difundido para el tratamiento de residuos agroindustriales es el de mezcla completa, el cual es un reactor en el que se mantiene una distribución uniforme de concentraciones. Es decir, el sustrato que está siendo fermentado dentro de la cámara, se mezcla de forma total (Hilbert, 2006), como puede observarse en la Figura 6. Lo que se produce mediante un sistema de agitación, que puede ser mecánica (agitador de hélice o palas, de eje vertical u horizontal) o neumática (recirculación de biogás a presión), y se realiza a baja velocidad (Varnero, 2011).

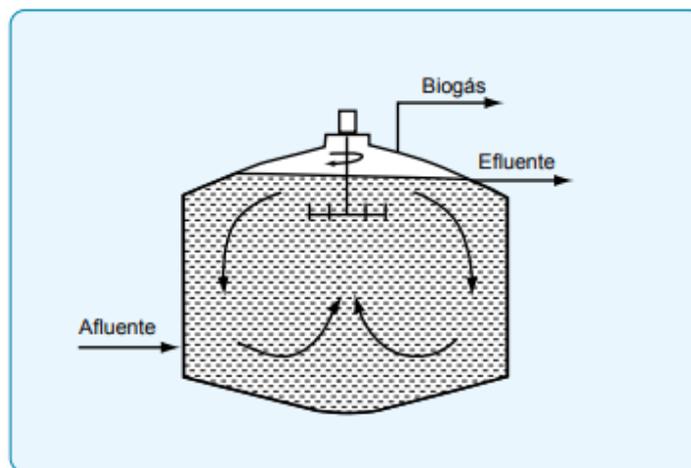


Figura 6: Reactor de mezcla completa.  
**Fuente:** Varnero (2011).

#### 1.4.2.2 Mezcla parcial

Por otro lado, existen los biodigestores de mezcla parcial, muy utilizados en el ámbito rural, que cuentan con sistemas de agitación rudimentarios para evitar formación de estratos endurecidos (Hilbert, 2006). Esta puede ser manual, rotación de campanas gasométricas, haciendo que el flujo sea ascendente o descendente según las conexiones tubulares que posea (Hilbert, 2006).

#### 1.4.2.3 Manejo del sustrato

##### 1.4.2.3.1 U.A.S.B

Su funcionamiento se basa en la formación de glomérulos en su interior, ya que poseen zonas de tranquilidad de circulación facilitada por el uso de mamparas y separadores en el interior del biodigestor, esto evita que las bacterias no escapen del sistema y puedan continuar con sus funciones. Este se encuentra representado en la Figura 7 y es muy usado para el tratamiento de residuos agroindustriales como vinazas, pero no permite residuos insolubles.

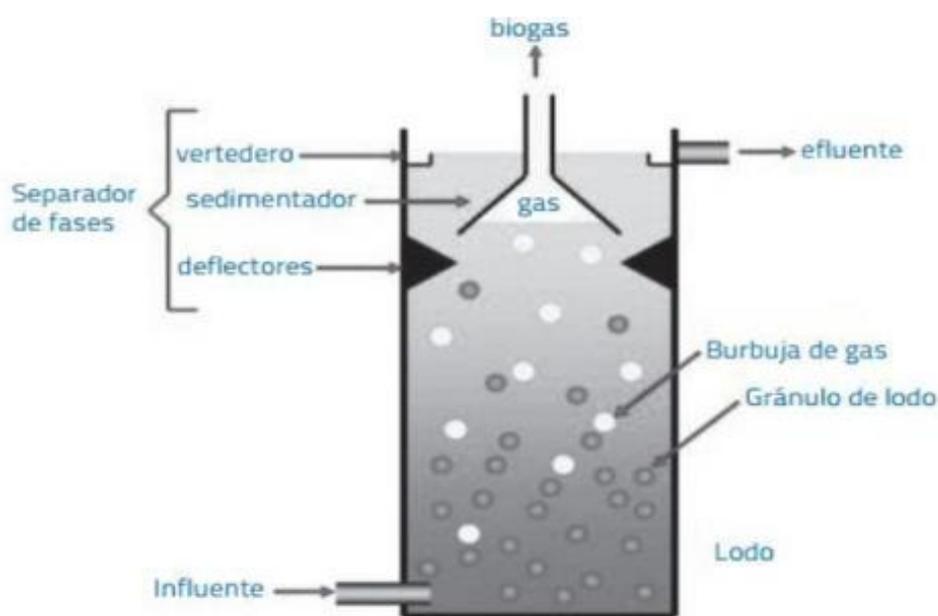


Figura 7: Reactor tipo U.A.S.B.

Fuente: (Caro, 2018).

#### 1.4.2.4 Manejo bioquímico<sup>1</sup>

Según el manejo bioquímico que se lleve a cabo en los biodigestores, éstos se clasifican en una etapa y en dos etapas. Se definen biodigestores de una sola etapa cuando toda la biodigestión se produce en una sola cámara, es decir los sistemas descritos anteriormente

<sup>1</sup> El siguiente apartado “Manejo bioquímico” muestra información provista por Hilbert (2006)

En cambio, en los biodigestores en dos etapas, existen dos cámaras de biodigestión separadas, una para desarrollar la primera etapa (acidogénica) mientras que la otra para llevar a cabo las etapas acéticas y metanogénicas. Lo que crea un ambiente más propicio para el crecimiento bacteriano según las condiciones que requiere cada tipo de bacterias/arqueas, y además, separar los sólidos no digeribles para que no pasen a la etapa metanogénica.

## 1.5 Parámetros óptimos de la biodigestión

Como se mencionó, en la biodigestión debe existir un control de las condiciones del medio, ya que los microorganismos como bacterias y arqueas que actúan en este proceso dependen de las mismas para un correcto funcionamiento. Algunos de estos parámetros son, cantidad de sólidos presentes en el/los sustratos digeridos, la temperatura, el pH, la relación Carbono Nitrógeno (C/N), la agitación y mezcla, el Tiempo de Retención Hidráulica (TRH), la velocidad de carga volumétrica y el análisis de la existencia de posibles compuestos que inhiban el proceso. La razón de estos parámetros es explicada por diferentes autores en sucesivos estudios, de los cuales, se mencionarán a continuación los más representativos según los objetivos buscados en el presente trabajo.

### 1.5.1 Sólidos presentes en el/los sustratos de la biodigestión

Cuando se trata de biodigestión es preponderante analizar la cantidad de sólidos presentes en los sustratos que van a ser digeridos. Esto es debido a que el movimiento de los microorganismos metanogénicos puede verse muy afectado a medida que el contenido de sólidos aumenta, lo que repercute en la eficiencia y cantidad de biogás producido (Varnero, 2011). La cantidad de sólidos que poseen los sustratos, serán preponderantes para poder llegar a una concentración específica. Además, esto condicionará el tipo de biodigestor que puede ser utilizado, esto se ve reflejado por ejemplo, en que los biodigestores continuos pueden poseer concentraciones más altas en sólidos que los biodigestores semicontinuos (Varnero, 2011).

Existe una clasificación de los sólidos de un sustrato variando la nomenclatura utilizada en función de la naturaleza de los mismos. En donde se distingue a los Sólidos Totales (ST), como la materia que queda luego de que el sustrato sea expuesto a una temperatura de 105°C, evaporando el agua presente. Estos ST, presentarán una parte que puede ser volatilizada y otra que no. Esto se determina mediante la incineración a 550°C durante 3 horas, en hornos especiales para alcanzar estas temperaturas en laboratorios, denominados, muflas. Esto hace que una parte de los ST denominada Sólidos Volátiles (SV), se volatice (como su nombre lo indica), y que otra parte de estos ST no lo haga, la cual corresponda a las Cenizas. Los SV, son de suma importancia ya que son los que los microorganismos utilizan en sus procesos metabólicos, obteniendo como resultado de los mismos, los diferentes gases ya vistos en la Figura 1, con especial interés en el Metano (CH<sub>4</sub>) por sus características energéticas.

### 1.5.2 Temperatura

El rango de temperatura en el cual actúan organismos anaeróbicos, es muy amplio, habiendo psicrófilos (por debajo de los 25°), mesófilos (entre 25 y 45°C) y termófilos (45 y 65°) (Varnero, 2011). Por lo que la temperatura óptima, dependerá de los objetivos

buscados, el sustrato a digerir, si se cuenta con la disponibilidad de energía para llegar a la temperatura deseada, entre otros. Es importante que la misma no decaiga, ya que podrían verse afectada la actividad de las bacterias metanogénicas y no la de las acidogénicas (menos sensibles) lo cual produciría una excesiva acumulación de ácidos y una falla en el biodigestor (Solano, Vargas y Watson, 2010). Dentro de cada rango de temperatura, existe un intervalo para el cual, el desarrollo microbiano se hace máximo, determinando así la temperatura de trabajo óptima en cada uno de los rangos posibles de operación (tabla 3).

Tabla 3: Rangos de temperatura óptimo para el crecimiento de bacterias formadoras de metano

Grupo de Bacterias	Rango de Temperatura (°C)
Psicrófilos	5-25
Mesófilas	30-35
Termófilas	50-60
Hipertermófilas	>65

Fuente: (Gerardi, 2003)

Es por esto que (Bidlingmaier, 2006) afirma en (Aguilera, 2017) que debe conservarse una temperatura cálida en el biodigestor para poder tener una alta producción de biogás. La temperatura determinará el tiempo que la materia orgánica debe permanecer en el biodigestor para una degradación completa, a este parámetro se lo conoce como Tiempo de Retención Hidráulica (TRH), el cual, disminuirá cuando las temperaturas sean más altas. Al haber mayor actividad microbiológica a medida que aumenta la temperatura, el sustrato se degrada más rápidamente, repercutiendo en volúmenes menores de biodigestores para procesar la misma cantidad de material (Muñoz, 2012).

Varnero (2011) afirma que los rangos de temperatura que más se utilizan actualmente son los mesofílicos, esto es debido a que a pesar de que en el rango termófilo los TRH suelen ser menores, muchas veces se produce inestabilidades e inhibiciones del sistema debido a la naturaleza de los compuestos degradados.

### 1.5.3 Potencial de Hidrógeno (pH)

El pH del proceso también es preponderante, siendo los valores en el rango de la neutralidad los más óptimos para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente (Varnero, 2011). Esto es debido a que entre 5,5 y 6,5 es un rango óptimo de pH para los organismos acidogénicos y entre 7,8 y 8,2 para los metanogénicos, de este modo, en cultivos mixtos el rango óptimo de pH se encuentra entre 6.8 y 7.4 (FAO, 2019). El pH, no debe bajar de 6,0 ni subir de 8,0, lo que no sólo determinará la producción de biogás sino también su composición, valores inferiores a 6,0 hacen que el biogás generado sea muy pobre en metano y, por tanto, tendrá menores cualidades energéticas (FAO, 2019). También, a valores bajos, se verán afectados los microorganismos metanogénicos, haciendo que se acumule ácido acético ( $\text{CH}_3\text{-COOH}$ ) e hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), y esto hace que las bacterias que degradan el ácido propiónico sean severamente inhibidas, causando un aumento en la concentración de Ácidos Grasos Volátiles (AGVs) de alto peso molecular (propiónico y butírico), si esto no se corrige la biodigestión fallará. (FAO, 2019).

En la Figura 8 se muestra como la composición del biogás varía en función de la variación del pH, en este caso de una mezcla de guano y tuna.

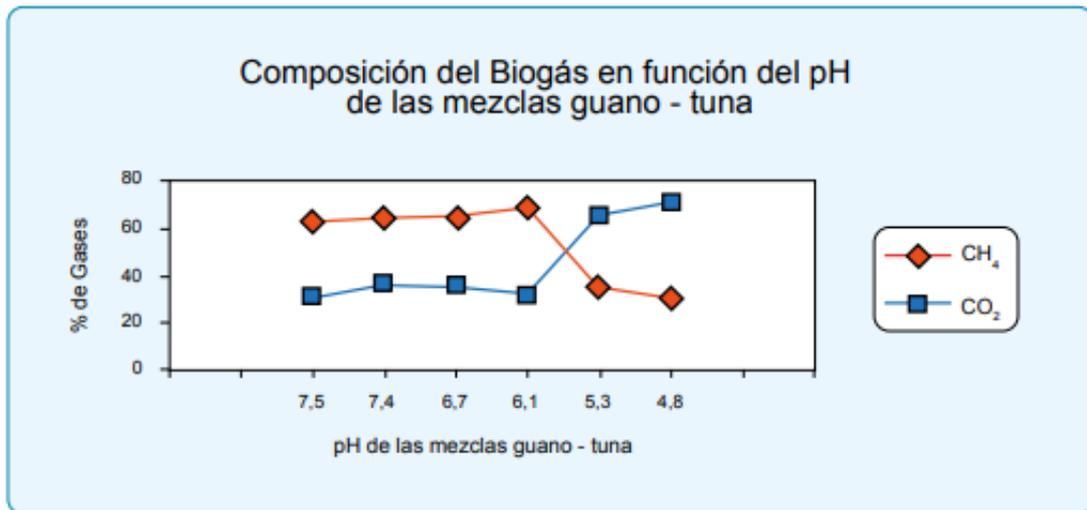


Figura 8: Composición del biogás vs pH en una mezcla de Guano – Tuna.  
**Fuente:** Varnero y Arellana (1991) en (FAO, 2019).

Este parámetro será preponderante en el equilibrio acido-base del Amoníaco (NH<sub>3</sub>) y Ácido Acético (CH<sub>3</sub>COOH), ya que al aumentar el pH se favorece la producción de Amoníaco, el cual inhibe el crecimiento microbiano en elevadas concentraciones (Varnero, 2011). En la Figura 9 puede verse como la actividad metanogénica cae drásticamente, cuando el valor de pH sobrepasa 8.

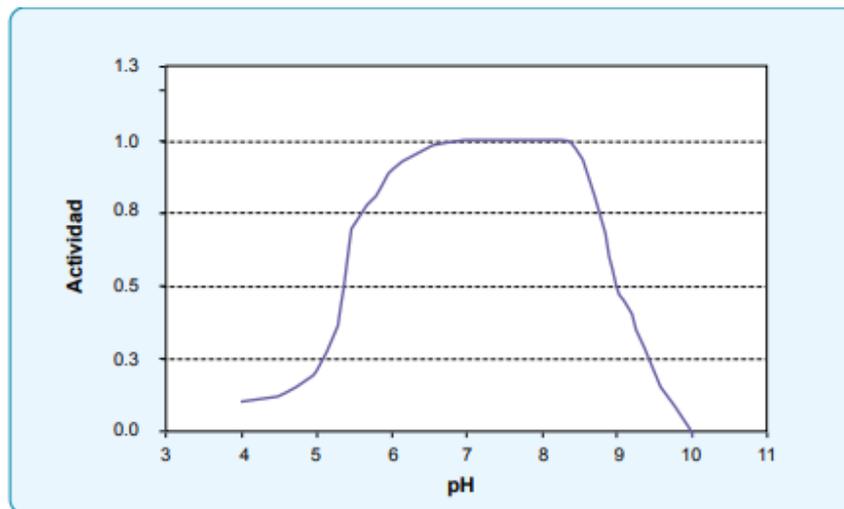


Figura 9: Valores de pH vs actividad metanogénica.  
**Fuente:** Speece (1996) en Varnero (2011).

#### 1.5.4 Relación C/N<sup>2</sup>

Es importante la relación Carbono-Nitrógeno (C/N), ya que el primero constituye la fuente de energía y el segundo es utilizado para la formación de nuevas células en los microorganismos. Los valores óptimos de dicha relación son entre 20 a 30, debido a que las bacterias intervinientes en la biodigestión consumen 30 veces más Carbono que Nitrógeno. Cuando los valores de los sustratos no se encuentran en el rango apropiado, deben hacerse

<sup>2</sup> Información resumida y recopilada de Varnero (2011)

las correcciones necesarias para poder conseguirlo, mezclando las materias primas de manera de poder conseguirlo.

### 1.5.5 Agitación y mezcla

También, hay que tener en cuenta que la agitación y mezclado de los sustratos presentes en el biodigestor será otro factor que favorecerá al proceso, ya que según (Hilbert, 2006), esto evitará la formación de costras dentro del digestor, y de esta forma no se dejarán espacios sin actividad biológica. Consecuentemente se logrará uniformizar la densidad bacteriana y se facilitará la homogeneización de la temperatura y la mezcla en digestión. A su vez, posibilitará un mayor contacto entre el sustrato y microorganismos y evitará la acumulación de lodos en la parte superior del biodigestor (Varnero, 2011).

### 1.5.6 Tiempo de Retención Hidráulica

Como se mencionó anteriormente, este parámetro es el tiempo que permanece los sustratos en el biodigestor siendo digeridos. Este será determinado según el biodigestor que esté involucrado en el proceso. En los biodigestores continuos y semicontinuos, el TRH se define como el valor en días del cociente entre el volumen del digestor y el volumen de carga diaria, que va a depender del tipo de sustratos y las temperaturas de éste (Hilbert, 2006). Mientras que, en un biodigestor de tipo discontinuo, será el tiempo de retención de los sustratos desde su carga, hasta su descarga (Varnero, 2011).

Generalmente sustratos con alta relación C/N requerirán mayores TRH para ser digeridos. A su vez, este estará muy relacionado con las temperaturas, por lo tanto, cuando éstas sean mayores, los TRH serán menores ya que la velocidad de degradación será mayor, debido a una mayor actividad microbiana (Varnero, 2011).

A medida que el tiempo pasa los sólidos volátiles (SV) irán disminuyendo en los sustratos que se están digiriendo, lo que estará relacionado con la producción de biogás que se tenga, en cierto volumen de un reactor en un tiempo determinado. Esto puede verse representado en la siguiente figura, observando la evolución de los parámetros nombrados (SV y producción de biogás), los cuales muestran una gran variación inicial y luego una tendencia asintótica. Obteniendo las mayores producciones de gas por volumen de reactor cuando se ha digerido entre el 40 y 60% del sustrato, según IDAE en (Muñoz, 2012), como puede verse en la Figura 10.

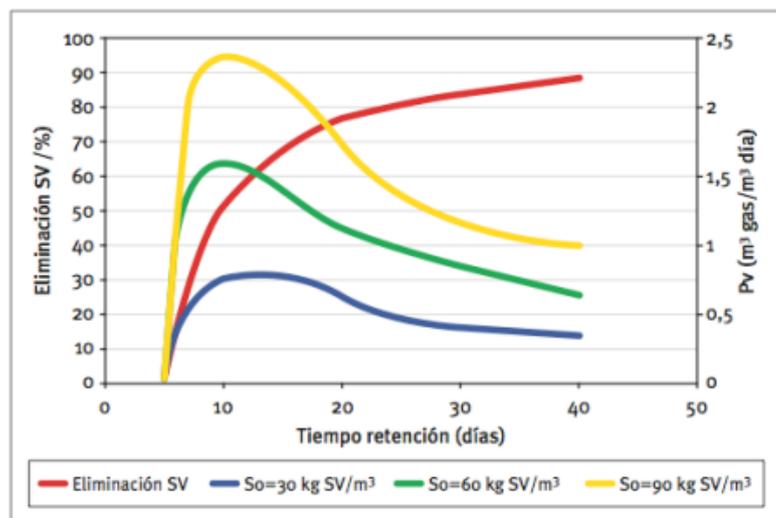


Figura 10: Producción de biogás (m³ gas/ m³ día) y eliminación de Sólidos Volátiles (%) para un biodigestor de mezcla completa en función del TRH.

**Fuente:** IDAE en (Muñoz, 2012)

### 1.5.7 Velocidad de carga volumétrica

Se define como la cantidad de sustrato orgánico cargado diariamente al biodigestor, inversamente proporcional al TRH, y es expresado de distintas formas como kg de material/día; kg de sólidos totales/día; kg de sólidos volátiles/día; todos expresados en relación al volumen del biodigestor. Para este parámetro también debe contemplarse la dilución con la que se trabaja (Hilbert, 2006). El volumen que va a ser cargado diariamente en el biodigestor de régimen semicontinuo será determinado por el volumen del mismo, relacionado a su TRH (Varnero, 2011). Es decir

Ecuación 1: Volumen de carga diaria

$$\frac{\text{Volumen del biodigestor (m}^3\text{)}}{\text{Tiempo de retención (días)}} = \text{Volumen de carga diaria (} \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \text{)}$$

Si contamos con un determinado TRH, por ejemplo, 30 días, esto quiere decir que la carga diaria de sustratos será igual a 1/30 el volumen del biodigestor. Y son 30 días promedio que la masa microbiana y los residuos permanecerá en el sistema (Varnero, 2011).

Tanto la velocidad de carga volumétrica como el TRH, son los principales parámetros tenidos en cuenta para el diseño del biodigestor. A mayores TRH, mayores serán los volúmenes de los biodigestores (Varnero, 2011).

## 1.6 Inhibidores en la biodigestión

Así como deben tenerse en cuenta variables que propicien el proceso de biodigestión, existen otras, importantes de analizar que pueden perjudicarlo. Según (Martí, 2006) y (Chen *et al.*, 2008) citado en (León, 2012), se deben analizar la concentración de sulfitos y sulfatos. Elevadas concentraciones de sulfato hacen que las bacterias metanogénicas compitan por éste, reduciéndolo, en vez de producir acetato (CH<sub>3</sub>COOH) e hidrógeno (H<sub>2</sub>). El sulfuro también puede actuar como inhibidor, y éste puede encontrarse en compuestos orgánicos azufrados tales como guano de cerdo (Varnero, 2011). Su forma

no ionizada (H<sub>2</sub>S) se ve favorecido a bajas temperaturas y bajos valores de pH, y tiene mayor poder inhibidor que su forma iónica (HS<sup>-</sup>) (Varnero, 2011).

Se debe también analizar la relación C/N en este apartado, debido a que valores mayores a 35 hacen que el proceso de biodigestión se ralente, ya que los microorganismos crecen más lentamente por el bajo contenido de N. Mientras que valores menores a 8, resultaran tóxicos porque se producirá una gran producción de amonio, el cual es un tóxico microbiológico (Varnero, 2011).

También, las sales pueden afectar la biodigestión causando la deshidratación de las células bacterianas inhibiendo el proceso, predominando ésta en las sales de Calcio, Magnesio y Potasio. Muy relacionado a éstas, se encuentran los cationes de metales alcalinos y alcalinotérreos. Éstos a partir de cierta concentración, puede proporcionar toxicidad, disminuyendo la velocidad de crecimiento microbiana, siendo más tóxicos los que presentan mayor peso molecular (Varnero, 2011). Metales pesados, antibióticos y detergentes en determinadas concentraciones pueden afectar el proceso fermentativo o inhibirlo (Hilbert, 2006), como puede verse en la siguiente la tabla.

Tabla 4: Inhibidores de la biodigestión

INHIBIDORES	CONCENTRACION INHIBIDORA
SO <sub>4</sub>	5.000 ppm
NaCl	40.000 ppm
Nitrato (según contenido de Nitrógeno)	0,05 mg/ml
Cu	100 mg/l
Cr	200 mg/l
Ni	200-500 mg/l
CN (Después que se han domesticado las bacterias metanogénicas a 2-10 mg/ml).	25 mg/l
ABS (Detergente sintético)	20-40 mg/l
Na	3.500-5.500 mg/l
K	2.500-4.500 mg/l
Ca	2.500-4.500 mg/l
Mg	1.000-1.500 mg/l

Fuente: (Hilbert, 2006)

También, otros productos que pueden llegar a formarse en la biodigestión, como los Ácidos Grasos Volátiles (ACVs), cuando se acumulan, causan una desestabilización y una disminución en la producción de gas (Varnero, 2011). Además, es preciso aclarar que, al ser un proceso anaeróbico, concentraciones mayores a 1 µg/l de Oxígeno (O<sub>2</sub>) actúan como inhibitorias (Varnero. 2011).

## 1.7 Biol como biofertilizante

En el proceso de biodigestión se obtienen dos productos principales, uno es el biogás, el otro es el material que queda una vez que finaliza el proceso, el cual se lo conoce como digestato. La parte líquida del mismo es conocida como biol, mientras que la parte sólida, biosol. El biol actúa como fitoregulator ya que permite promover actividades fisiológicas de las plantas y también estimula su desarrollo (RAAA, 2004).

La digestión anaeróbica, permite acelerar la mineralización de productos orgánicos, logrando su estabilización, con compuestos húmicos y sin patógenos (Varnero, 2011). Según (Masse, 2007) el digestato mejora el rendimiento del cultivo cuando se usa como

fertilizante en la producción de plantas, ya que el mismo provee nutrientes tales como fósforo (P) nitrógeno (N), los cuales se mineralizan en el biodigestor para luego estar disponibles, sin perderse en este proceso.

A su vez, (D'Imporzano, 2007) aclara que presenta beneficios para estructurar y agregar el suelo, además, provee en mayor proporción moléculas recalcitrantes (lignina, cutina, ácidos húmicos), las cuales son bien conocidas como precursoras en el proceso de humificación, aumentando la materia orgánica del suelo con todos los beneficios que esto conlleva. Gomero y Rabamal (1996) citado por (Mendizabal, 2003) afirman que el biol posee precursores hormonales que promueven el crecimiento y rendimiento vegetal.

Además, (Aparcana Robles, Jansen, 2008) afirma que el biol favorece la Capacidad de Intercambio Catiónico del suelo (CIC), y es por esto que la humedad del mismo se mantiene, como así también un microclima que es beneficioso para las plantas. También, estos autores afirman que se puede lograr igual o mayor productividad al de un fertilizante químico utilizando biol en un cultivo.

La composición del biol puede ser muy variable, y va a depender de los sustratos que sean digeridos y de cuan efectivo sea el proceso de biodigestión, es decir, si logra completar todas las etapas correspondientes, será más probable que el residuo sea más propicio para su aplicación como fertilizante.

Además de los beneficios ambientales que conllevan el uso de bioles, también se cuenta con beneficios de tipo económicos, ya que el productor además de obtener energía con el biogás, contará con una fuente de nutrición vegetal adicional, disminuyendo la necesidad de compra de este tipo de productos.

El informe de (AEDES, 2006) especifica que puede incorporarse directamente al suelo, el cual debe tener una disolución del 10 al 30%, también puede ser aplicado de forma directa a las hojas, con diluciones aún mayores, del 1 al 10%. Por último, el mismo informe aclara que puede usarse directamente en semillas, con función biocida, para realizar desinfecciones y acelerar el enraizamiento. Según (Aparcana Robles, Jansen, 2008) el 90% del material que ingresa al biodigestor pasa a transformarse en biol, y el 10% restante, en biosol y biogás.

### 1.7.1 Correcto uso del biol en cuanto a la nutrición vegetal

Como se mencionó en el apartado anterior, el biol puede ser utilizado tanto como biocida, como también, promotor del crecimiento y de la buena salud vegetal. Es por esto, que debe estudiarse según el propósito buscado las características del líquido en cuestión, que propicien uno u otro efecto.

Los bioles puros, suelen tener una gran toxicidad debido a su alta concentración de nutrimentos. Es por esto que estos suelen diluirse antes de la aplicación vegetal. Muy relacionado a lo mencionado, existe un ensayo el cual evalúa a que concentración el biol funciona como un promotor del crecimiento o un inhibidor del mismo. Este es el "Ensayo de Fitotoxicidad" que generalmente se realiza con semillas de Lechuga (*Lactuca sativa*). Este se basa en la gran sensibilidad que posee la plántula en las primeras etapas de crecimiento a los factores externos adversos, que puede inhibir o afectar la elongación de la radícula y el hipocótilo (Sobrero; Ronco, 2004). Por lo que, en este ensayo, se estudian diferentes diluciones de bioles para visualizar y medir el efecto causado, sobre el crecimiento radicular y del hipocotilo.

En consecuencia, una vez que se tiene el biol producto de la biodigestión, éste debe ser estudiado para visualizar cuan apto es para uso fertilizante, y si es que deben realizarse posibles correcciones, como puede ser diluciones en agua, para hacer efectiva su aplicación.

## 1.8 Disminución de Gases de Efecto Invernadero por efecto de la biodigestión

El biogás al ser energía que proviene de la biomasa, posee la ventaja de ser neutra en emisiones de carbono (Varnero, 2011). Es por esto que el CO<sub>2</sub> no se contabiliza en el balance final de Gases de Efecto Invernadero (GEI), ya que el CO<sub>2</sub> que se emana en los diferentes usos de tipo energético ha sido anteriormente fijado en la composición del material vegetal para su crecimiento, y es por esto que no se contribuye a un aumento en el balance de gases GEI (Manrique, 2015).

Utilizar esta tecnología conlleva reemplazar de forma parcial o total a las energías de tipo convencionales, como el carbón, petróleo y gas, los cuales, si contribuyen a un aumento de gases GEI, al aumentar las concentraciones de Metano (CH<sub>4</sub>), Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) y Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O) presente en la atmósfera. Un estudio de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (2013) citado en el trabajo de (Castañeda, Céspedes, Madrigal, 2016) afirma que, a nivel mundial, el 86% del total de gases GEI liberados se produce por la generación e implementación de energía de tipo convencional.

El biogás producido a partir del bagazo cervecero estaría enmarcado dentro de los biocombustibles de segunda generación, ya que se obtiene de cultivos que han sido destinados a la alimentación y que han cumplido este propósito (Planas, 2018). Aunque éstos no tienen gran significancia a nivel comercial, ofrecen reducciones de gases GEI del orden del 70 al 90% en comparación con el diésel fósil y el petróleo, sin contabilizar el carbono emitido debido al cambio del uso de la tierra (FAO, 2008).

Este gas puede formarse naturalmente si las condiciones ambientales así lo ameritan, liberándose CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> de forma no controlada. Con la implementación de uno o más biodigestores, el CH<sub>4</sub> producido es combustionado para la obtención tanto de CO<sub>2</sub> como de H<sub>2</sub>O, evitando de esta forma el CH<sub>4</sub> que podría liberarse en un proceso natural. Lo cual es de suma importancia, ya que el CH<sub>4</sub> contribuye al 20% del efecto invernadero de origen antropogénico, éste a su vez, posee un potencial de calentamiento global 21 veces mayor al del CO<sub>2</sub> medido en un lapso de tiempo de 100 años (Varnero, 2011). Es decir, con la biodigestión se disminuye 21 veces el potencial efecto invernadero que se generaría por la descomposición orgánica (considerando solo el CH<sub>4</sub> no liberado) en un período temporal de 100 años, lo cual podría producirse en ambientes tales como vertederos que no cuenten con una correcta supervisión.

## 1.9 Biogás en Argentina según caso de estudio <sup>3</sup>

En el año 2014, el INTI realizó un relevamiento de 61 plantas de biogás ubicadas en diferentes provincias de Argentina, con el objetivo de analizar el grado de desarrollo que posee el país con respecto a esta tecnología. Lo cual fue formalizado mediante un proyecto en el que participó la Organización de la Naciones Unidas (FAO), una entidad financiera (PROBIOMASA) y el INTI. El objetivo del mismo fue poder contar con una línea de base que sirva para la planificación estratégica y el desarrollo sostenido de esta tecnología. En la

---

<sup>3</sup> Información recopilada del estudio “Relevamiento Nacional de plantas de biogás” realizado por Goicoa (2014).

Figura 11, se muestra la ubicación geográfica de las plantas relevadas en el territorio nacional.



Figura 11: Ubicación geográfica plantas relevadas por INTI.  
**Fuente:** (GOICOA, 2014).

En dicho estudio se constató que de las plantas relevadas, un 53,1% pertenecen al sector privado, luego un 37,5% pertenecen al sector público y un 4,7% a cooperativas y ONGs. Una importante proporción del sector privado equivalente al 85,7% implementó esta tecnología como sistema para tratar efluentes o desechos y solo 6% con fines energéticos. Con respecto al sector público, 54,2% se han construido para tratar tanto efluentes cloacales como también la fracción orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos. Por otro lado, 33,3% de este sector construyó estas plantas con fines educativos o de investigación.

Analizando el sector privado, la mayor cantidad de plantas se encuentran en zonas rurales (64,7 %), mientras que solo 11,7% en parques industriales, lo que puede tener relación con el objetivo de favorecer una mayor disponibilidad energética en zonas que se encuentran algo marginadas en esta temática. Relacionado a esto, en este trabajo se estudia en los apartados que siguen, una cervecería ubicada en una zona rural de Maipú, la cual debe comprar Gas Licuado de Petróleo (GLP), por no contar con una red de gas propia ya instalada en la zona.

Tanto en zonas rurales como urbanas, el tratamiento de pasivos ambientales es el principal motivo de la biodigestión en Argentina, utilizándose diferentes tecnologías como UASB, laguna cubierta, mezclas completas, entre otros. Es decir, con el mismo propósito de esta tesis, como es el tratamiento del bagazo de cerveza artesanal.

Un punto interesante es que pocos de los biodigestores relevados contaban con sistemas de calefacción y agitación, no asegurando una estabilidad térmica en el sistema que requiere el proceso, dando como resultado un proceso de biodigestión algo ineficaz en relación al posible potencial que se podría lograr. Esta posible problemática busco evitarse en el estudio de laboratorio tipo batch que se detalla con posterioridad, realizando agitaciones frecuentes en los sucesivos muestreos del biogás producido.

Se llevó a cabo una clasificación en 5 grupos de los sustratos más utilizados para la producción de biogás. En donde los de tipo industrial tuvieron la mayor participación, seguidos de los RSU, luego los residuos de ganadería, como puede apreciarse en la Figura 12.

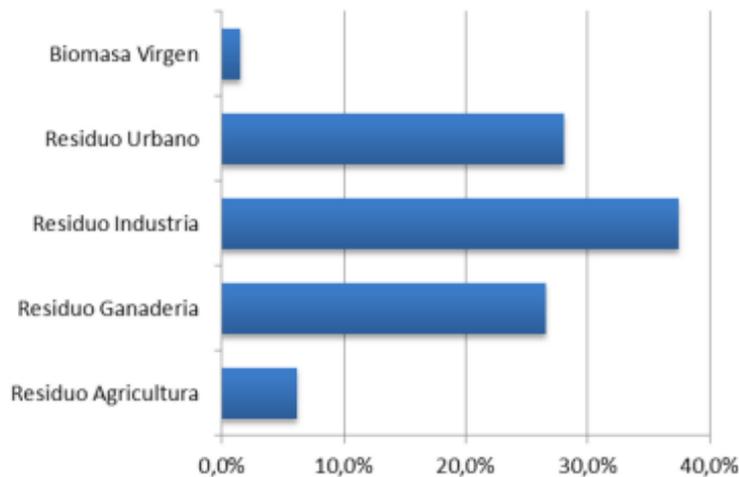


Figura 12: Tipos de sustratos más utilizados.  
Fuente: (GOICOA, 2014).

Es preciso aclarar, que en el año 2017 se inició un programa nacional denominado RenovAr, el cual busca el abastecimiento de energía eléctrica a partir de fuentes de origen renovable. Aumentando la participación porcentual de forma progresiva hasta alcanzar un 20 % de abastecimiento de E<sup>o</sup> eléctrica por parte de fuentes renovables para el 31 de diciembre del año 2025 (Secretaría de Gobierno de Energía, 2018). Esto, mediante el estímulo de este tipo de energías en el territorio nacional, creando nuevas plantas o ampliaciones de las ya instaladas (Secretaría de Gobierno de Energía, 2018). El programa se ha subdividido en cuatro rondas de licitaciones desde que comenzó, y con respecto al biogás, han sido adjudicados 37 proyectos en todo el territorio nacional, sumando una potencia instalada de 64,9 MW (Ministerio de Energía y Minería, S.N). Las provincias con mayor potencia instalada son Córdoba y Santa Fé, con 21,42 MW (13 plantas) y 21,61 MW (10 plantas) respectivamente (Ministerio de Energía y Minería, S.N). Pero también han sido adjudicado proyectos en San Luis 4 MW (4 plantas), La Pampa 2 MW (1 planta), Santiago del Estero 3MW (1 planta) y Tucumán 3 MW (1 planta) (Ministerio de Energía y Minería, S.N).

### 1.10 Proceso productivo de cerveza

La elaboración de cerveza puede variar en pequeños detalles según el tipo de cerveza que sea producida y las preferencias del productor, pero a grandes rasgos, cuenta con un mismo proceso que lo caracteriza, el cual puede ser dividido en 11 etapas (Lastra; Nougues, 2016).

#### 1. Malteado

Consiste en un proceso de germinación controlada para poder activar enzimas que se encuentran en los granos de cebada, que serán necesarias en la maceración.

## 2. Molienda

Proceso en el que se trituran los granos para poder liberar el contenido del mismo y así permitir que las enzimas tomen un buen contacto con el almidón en el proceso de maceración. Es importante que la molienda sea de calidad, ya que cuando se produce de forma excesiva, se filtran sustancias no deseadas en el mosto y una molienda escasa, no permite liberar adecuadamente el contenido del grano. Este proceso se logra con un molino para la malta.

## 3. Maceración

Una vez molido el grano de cereal, se realiza la mezcla de los granos con agua para preparar el mosto cervecero. Para el proceso de macerado, la malta se mezcla con el agua en tanques de maceración a temperaturas que oscilan los 70°C por un tiempo que varía entre 30 y 90 minutos, según la cerveza que se produzca. Esto llevará a cabo las transformaciones necesarias para convertir el almidón en azúcares fermentables.

## 4. Filtración del mosto

Luego de la maceración, se produce la separación del mosto líquido de los restos de malta. A esta biomasa residual se la denomina bagazo, y representa prácticamente la totalidad de los desechos en el proceso productivo.

## 5. Recirculación y lavado de granos

El líquido azucarado resultante se lo puede notar con cierta turbidez debido a la presencia de sólidos en suspensión que provienen del grano. Es por esto que se hace una recirculación del mosto desde la parte inferior del tanque de macerado, hacia la parte superior del mismo. A través de este proceso de recirculación se busca utilizar como filtro los mismos granos presentes. A su vez, este lecho absorbe agua y contiene azúcares, por lo cual se agrega agua adicional a una temperatura que oscila los 75°C para poder agotar los granos. Terminado este proceso, se retira el líquido por el fondo del tanque y pasa al tanque de cocción

## 6. Cocción

Luego, el mosto se lleva a ebullición durante 60 a 90 minutos con el objetivo de solubilizar los lúpulos agregados, los cuales se encargan de brindar amargor a la cerveza. En este proceso también se busca evaporar el exceso de agua; inactivar las enzimas y esterilizar el mosto.

## 7. Whirlpool

Aquí lo que se produce es un remolino en el tanque de macerado del mosto durante 2 o 3 minutos a través de una bomba de recirculación, luego se detiene el funcionamiento de la misma y se deja que el movimiento se detenga solo. Esto es para lograr depositar sólidos en suspensión. Luego se deja reposar durante 10 a 20 minutos para pasar a la siguiente operación.

## 8. Enfriado

El mosto debe encontrarse a una temperatura menor a los 20°C para que la levadura pueda trabajar. Al salir de la olla de hervido se encuentra a aproximadamente 95°C por lo que se debe enfriar antes de proceder con la fermentación. Esto es de suma importancia, ya que si no se hace, la levadura al ser agregada muere, por lo que no

podría procesar los azúcares que deben transformarse en alcohol. Para esta etapa del proceso suelen utilizarse intercambiadores de placas, es decir, intercambiadores de calor donde un fluido de baja temperatura recibe el calor del mosto.

#### 9. Fermentación de la cerveza

Durante la fermentación se transforman los azúcares fermentables en alcohol y CO<sub>2</sub>, al tiempo que se generan una gran variedad de compuestos, muchos de los cuales contribuyen a darle los aromas característicos tan populares de la cerveza. Este proceso se desarrolla en tanques de fermentación, el cual debe poseer una válvula que permita la salida de CO<sub>2</sub> generado. Es importante que, durante todo el proceso de fermentación, la temperatura de trabajo no supere los 24°C, ya que esto atentaría con las posibilidades de supervivencia de los microorganismos que componen la levadura. Las levaduras se retiran del fermentador y pueden ser reutilizadas hasta cuatro veces.

#### 10. Maduración

En esta etapa la cerveza es sometida a bajas temperaturas para lograr una estabilización del sabor y los aromas logrados, este proceso puede durar 7 días y debe realizarse entre temperaturas de 2 a 5°C. El tanque de maduración es similar al fermentador, solo que este no posee forma cónica basal. Puede no contar una doble aislación tipo encamisado, pero esto supone una posible inversión en una cámara frigorífica.

#### 11. Envasado

Las cervezas son guardadas en barriles de acero, en botellas u otro formato y son almacenadas en cámara de frío.

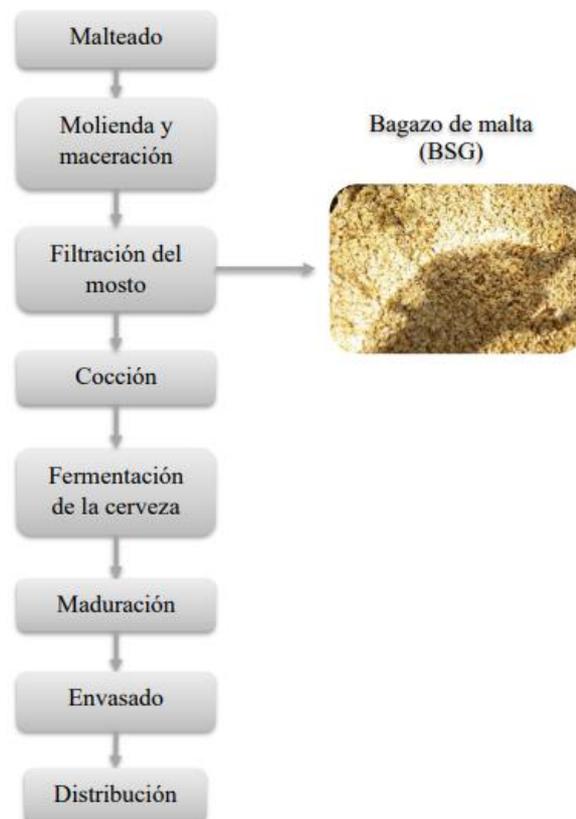


Figura 13: Esquema del proceso productivo de cerveza  
**Fuente:** (Villanueva, Tovar, 2020)

## 1.11 Bagazo de cerveza

En la industria de la cerveza, el bagazo constituye el principal residuo y está conformado en mayor medida por cebada (*Hordeum vulgare*) que ha sido agotada en cuanto a sus azúcares en el proceso de maceración, y en una proporción significativamente menor, encontraremos dentro de éste, residuos como lúpulos y levaduras.

El bagazo de cerveza al ser un recurso que proviene de la biomasa, tiene la ventaja de ser considerado neutro en emisiones GEI cuando se lo utiliza con fines energéticos, ya que todo el CO<sub>2</sub> que se emite, ha sido previamente fijado en la estructura vegetal en su crecimiento, por lo que no se produce un cambio en el balance de GEI emitidos (Manrique, 2015).

Este subproducto está compuesto mayoritariamente de cáscara, pericarpio y cubiertas de la semilla de cebada (Pantoja, 2020). Posee un contenido de almidón que varía según a uniformidad del proceso de malteado, aun así, este es insignificante en comparación con los elementos que forman la pared celular, como son la cáscara, el pericarpio, cubierta de semillas, que están conformados principalmente por lignina, celulosa, no celulosa, proteínas, lípidos (Pantoja, 2020). El bagazo posee una alta relación carbono/nitrógeno, con cadenas carbonadas largas, típico de los materiales lignocelulósicos. Como se detalla en la Tabla 5, puede verse que es un material rico en proteínas y fibra, el cual varía su composición de acuerdo a la variedad de cebada que haya sido utilizada, condiciones de cosecha, malteado y maceración del proceso (Martinez, 2020).

Tabla 5: Composición del bagazo de cerveza.

Elemento	Composición
Agua	75 al 80%
<b>Considerado solo su Materia Seca</b>	
Proteína	15 al 26%
Fibras	70% de las cuales (Celulosa 15-25%, hemicelulosa 28-35% y lignina 28%)
Lípidos	Puede contener lípidos en un rango de 4 al 18%
Minerales	Calcio, fósforo y selenio
Vitaminas	Biotina, Ácido Fólico, Vitamina B6, entre otras
Aminoácidos	Leucina, Valina, Serina, Glicina, Tirosina, Prolina, Treonina, Cistina, Histidina, entre otros
Cenizas	2,5- 4,5%
<b>Fuente</b>	(Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, S.N)

## 1.12 Antecedentes del uso o aprovechamiento del bagazo cervecero

Debido a las propiedades descriptas anteriormente, el bagazo puede ser reutilizado o aprovechado de diferentes formas. Entre éstas, encontramos el consumo humano, a través de la extracción de polifenoles, los cuales constituyen antioxidantes naturales para disminuir los radicales libres (Mussato, 2004). También, existen estudios que se basan en los arabiloxilanos presentes en su estructura, con un efecto positivo en la flora intestinal y por otro, los  $\beta$ -glucanos, compuestos que pueden ser utilizados para disminuir el colesterol humano ( Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca, 2019). Otros beneficios para la salud

son mencionados por Mussato (2004), como el aceleramiento del tránsito intestinal, incremento del bolo fecal y grasas en las deposiciones (aliviando la constipación y diarrea). También afirma que ayuda a reducir los cálculos biliares y la reducción de los niveles de glucosa en sangre lo cual está en concordancia con la presencia de proteínas ricas en glutamina.

El alto contenido proteico y de fibra que posee el bagazo, junto con su bajo costo de producción, lo convierte en un muy buen sustrato para la alimentación animal, tanto vacuna, como porcina y piscícola (Mussatto et al, 2004). En zonas rurales suele destinarse este subproducto para consumo animal de los productores locales, pero en zonas urbanas, esto puede ser un serio problema ambiental, ya que la libre descomposición en un relleno sanitario implica la emisión de GEI de forma no controlada, principalmente metano, gas con gran potencial de efecto invernadero ( Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca, 2019).

Villanueva y Tovar (2020) mencionan un estudio donde se evaluó el bagazo para producción de biogás, utilizando como cosustratos solubles acetato, glucosa y el colorante mono-azoico naranja ácido, en un sistema mesofílico y por lotes. En el mismo se menciona que la producción de enzimas celulasas por los microorganismos, junto con la glucosa y acetato presentes, produjeron una más eficiente degradación de las fases acetogénicas y metanogénicas. Esto es, debido a que la glucosa aumenta la hidrólisis acetogénica y el acetato descarboxila más rápido, produciendo CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, acelerando la fase metanogénica. También aclaran que el uso de éste colorante además de mejorar la producción de biogás, sirve para tratar el bagazo aportándole valor agregado en la biomasa. *Fusarium oxysporum* es un ejemplo de un microorganismo mesófilo, el cual a través de su actividad enzimática, ayudado por los cosustratos mencionados, acondicionará el bagazo para una mejor biodigestión.

En la Provincia de Santa Fe, Argentina, la secretaria de Estado de Energía, Verónica GESE ha presentado un innovador proyecto para generar energía a través del bagazo producido por las cervecerías artesanales locales. Trabajando en conjunto con el “Grupo Essential Energy” para reciclar el bagazo de los productores cerveceros, para luego ser transportado a un biodigestor común ubicado en Villa Ocampo para poder obtener biogás. Los primeros resultados han sido muy alentadores. Y de esta forma, se lograría una producción más sustentable y económica de cerveza artesanal (Lucero, 2019)<sup>4</sup>

El Instituto de Energía (IDE) de la Universidad Nacional de Cuyo ha llevado a cabo la instalación de dos biodigestores de tipo semicontinuos “Homebiogás” de volumen de reacción de 650l en una cervecería ubicada en el Departamento de Maipú, Provincia de Mendoza, Argentina. Esto ha sido llevado a cabo con fines meramente investigativos, enfocándose principalmente en la valorización del bagazo de cerveza y en segunda instancia, mediante el aprovechamiento del mismo reducir los costos que posee el proceso productivo de cerveza.

El aprovechamiento de este subproducto contribuye a fortalecer una producción de tipo sostenible y prácticas bajas en emisiones, recomendado en el “Plan de Acción Contra el Cambio Climático” y también con el objetivo 12 sobre la “Producción y Consumo Responsable” establecido como Objetivo de Desarrollo Sostenible para el año 2030 ( Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca, 2019).

Además, mediante la biodigestión evitaría la descomposición de un gran volumen de residuos de forma descontrolada, lo que conlleva a evitar un aumento de los niveles de

---

<sup>4</sup> Se buscó información con mayor nivel de detalle sobre este antecedente, pero no se encontró mucho más de lo que precisa este documento.

contaminación de suelos, napas freáticas, atmosférica, entre otros. Obteniendo también, subproductos útiles como fertilizantes y combustible.

## 1.13 Marco legal Nacional

### 1.13.1 Energías renovables

Según el artículo 2 de la ley Argentina 27.191/2015 de “Régimen de Fomento Nacional para el uso de fuentes Renovables de Energía destinada a la producción de Energía eléctrica”, se define a las mismas como: *“Las fuentes renovables de energía no fósiles idóneas para ser aprovechadas de forma sustentable en el corto, mediano y largo plazo: energía eólica, solar térmica, solar fotovoltaica, geotérmica, mareomotriz, undimotriz, de las corrientes marinas, hidráulica, biomasa, gases de vertedero, gases de plantas de depuración, biogás y biocombustibles”*.

Muy relacionado a la crisis del petróleo de los años 70, que desveló la vulnerabilidad de los países que no poseían recursos energéticos propios, se produce tanto en Argentina como en los otros países América Latina, el interés en la promoción de Energías de Fuentes Renovables (EFR) (Castelao Caruana, 2019).

En el año 1985 es cuando Argentina comienza específicamente a orientar su normativa en fuentes de energías de tipo no convencionales, impulsado por la Dirección Nacional de Conservación y Nuevas Fuentes de la Secretaría de Energía de la Nación. Luego, con la firma de Argentina del Protocolo de Kioto en el año 1997, se buscó reducir las emisiones de GEI, y se promovió la financiación de proyectos ambientales sustentables (Castelao Caruana, 2019).

### 1.13.2 Leyes y Normativas pertinentes

#### 1.13.2.1 Ley 27640/2021

El artículo 4 de esta ley define a los biocombustibles de la siguiente manera, *“se entiende por biocombustible al bioetanol y al biodiésel que cumplan los requisitos de calidad que establezca la autoridad de aplicación y que se produzcan en plantas instaladas en la República Argentina a partir de materias primas nacionales cuyo origen sea agropecuario, agroindustrial y/o provenga de desechos orgánicos”*.

El presente marco regulatorio actualizado, habla muy poco del biogás, solo especifica cómo debe actuar la autoridad de aplicación en cuanto a los requisitos y condiciones para su autoconsumo, distribución, comercialización y porcentajes de mezcla. Posiblemente esto sea porque el biodiesel y bioetanol son los biocombustibles que cada vez ganan más espacio en Argentina.

### 1.13.2.2 Resolución 19-2019<sup>5</sup>

La misma se apoya en un primer momento en ejes fundamentales, tales como la Ley General de Ambiente 25.675, que a grandes rasgos promueve un desarrollo de tipo sustentable a nivel nacional y regional. También en otras leyes que especifican como debe ser la Gestión Integral de Residuos tanto Industriales, de Servicios y Domiciliarios, como las leyes 25.612 y 25.916 para que el mismo se realice de forma tal de no provocar un perjuicio ambiental o a la población.

Ésta habla de que el biogás está derivando en un aumento de instalaciones de producción, y consecuentemente, un aumento en la cantidad de digerido, definido como un material con nutrientes tales como N, P y K cuya concentración varía según la materia prima utilizada, y es por esto, que lo que se plantea es el establecimiento de una norma técnica para la aplicación agrícola de digerido provenientes de plantas de digestión anaeróbica que trate sustratos de diferente naturaleza. Esto lo hace promoviendo los avances en el conocimiento de esta materia, los avances científicos, tecnológicos, normativos y organizativos en todo el Territorio Nacional.

### 1.13.3 Leyes o normativas adoptadas en función de Convenciones Internacionales

#### 1.13.3.1 Ley 24.295/1994<sup>6</sup>

Esta ley fue realizada en base a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, celebrado en Río de Janeiro en 1992. El objetivo de este convenio es lograr “la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático. Ese nivel debería lograrse en un *plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible*” por lo que la Ley Nacional 24.295 (1994) especifica este mismo objetivo en su artículo 2.

Todos los países de América Latina y el Caribe son partes involucradas, y este objetivo será logrado mediante el acceso libre a la información tanto nacional como regional, como así también, el intercambio de información y actualizaciones de las emisiones generadas, especificando cuales son las consecuencias producidas y las posibles soluciones. Además, en esta ley, se promueve la participación más amplia posible del público, como Organizaciones No Gubernamentales (ONGs), en temáticas como educación, capacitación y sensibilización.

#### 1.13.3.2 Convención de las Naciones Unidas de lucha contra la Desertificación en los Países Afectados por Sequía Grave o Desertificación

Este convenio es un acuerdo internacional nacido a partir de la cumbre de la tierra de Río de Janeiro de 1992, y tiene como objetivo promover una respuesta global a la desertificación y a la sequía (Argentina Gobierno, s.f.). Este convenio se plasma en la Ley

---

<sup>5</sup> Información recopilada y resumida de la Secretaría de Gobierno de Ambiente y Desarrollo Sustentable (2019).

<sup>6</sup> Información recopilada y resumida de (Pierri et Al., 1993).

Nacional 24.701 de 1996, la cual enseña las normativas correspondientes a la gestión de las tierras áridas, semiáridas y subhúmedas secas en los tres enfoques de sustentabilidad (social, económico y ambiental). Muy relacionado a esto, encontramos en el art 8, inciso 2 (iii) que fomenta la utilización de fuentes de energía renovables, particularmente la Energía Solar, Eólica y el Biogás, adoptando la tecnología pertinente para aliviar presiones sobre los recursos ambientales frágiles.

## 1.14 Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible trata de un acuerdo ambicioso que fue formulado por las Naciones Unidas en 2015, para lograr un desarrollo sustentable con miras al año 2030, estableciendo 17 Objetivos, los cuales poseen 169 metas asociadas. La Argentina se encuentra comprometida con dicho acuerdo.

El objetivo 7, habla de Energía Asequible y No Contaminante, y asegura para el año 2030 aumentar la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas, duplicar la eficiencia mundial de eficiencia energética. También, favorecer la cooperación en cuanto a la cooperación internacional en investigación y tecnologías relacionadas a energías limpias, como así también, mejorar las infraestructuras y tecnologías en relación a servicios energéticos modernos y sostenibles (Naciones Unidas, s.f.).

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

Sabiendo que es primordial obtener una buena caracterización de los sustratos utilizados para el proceso de biodigestión, se procedió a caracterizar el bagazo de cerveza (B), el estiércol porcino (C) y el estiércol de gallina (G) mediante técnicas de laboratorio y material bibliográfico. Las características del bagazo de cerveza como % Humedad, Sólidos Totales (%ST), Sólidos Volátiles (%SV), y Cenizas fueron determinados mediante laboratorio en la Facultad de Ciencias Agrarias, UNCuyo. Éstos, están basados en determinaciones gravimétricas resultantes de pérdidas de masa (APHA 2540G, APHA 1992). Mientras que la caracterización de los parámetros de los estiércoles (porcino y aviar) se determinaron mediante revisión bibliográfica.

Luego, se evaluó el BMP realizando un análisis de tipo batch de los sustratos, estiércol de Cerdo (C) y de Gallina (G) y el del bagazo de cerveza llevando a cabo una codigestión con éstos (B+G) y (B+C). También se procedió a evaluar las características fitotóxicas que poseen los bioles que resultaron de las biodigestiones realizadas. Lo que informó si éstos a diferentes diluciones fueron o no aptos para ser utilizado para nutrición vegetal.

Por último, contando con los BMP de los sustratos utilizados y relacionando esto a cuál ofrece una menor fitotoxicidad, se propuso llevar a cabo la biodigestión de la totalidad del bagazo que produce una cervecería que se presentará en los apartados siguientes. Determinando las dimensiones volumétricas del biodigestor apto para dicho proceso, y además, un breve análisis económico de cuánto es el costo de inversión, acudiendo a fuentes de información de origen secundario. Teniendo en cuenta el esquema productivo de esta cervecería, se determinó la disminución de GEI que se produce por el reemplazo de GLP por biogás, el cual será posible por el potencial productivo del biodigestor.

## 2.1 Potencial de Biometanización (BMP) del bagazo de cerveza en codigestión con inóculo aviar y porcino

Se procedió a determinar el potencial energético que posee el bagazo de cerveza. Las muestras de este subproducto se obtuvieron de una cervecería artesanal ubicada en la Ciudad de Mendoza y conformaron lo que se conoce como sustrato. Mientras que los cosustratos fueron estiércol de Cerdo (C) y estiércol Gallina (G) provistos por un pequeño productor pecuario de la localidad de Los Corralitos, Guaymallén. Los ensayos se realizaron en el domicilio del tesista, con los elementos necesarios provistos por la cátedra de Química General e Inorgánica, de la Facultad de Ciencias Agrarias (FCA) y el Instituto de Energía (IDE) de la Universidad Nacional de Cuyo.

Se llevó a cabo la puesta en marcha de 12 biodigestores tipo batch, colocados en un baño termostático a una temperatura de  $35\pm 1^{\circ}\text{C}$ . Las mediciones de biogás producido tuvieron una duración hasta que la producción diaria fue del 1% o menor con respecto al total generado, en todos los dispositivos, siguiendo la Normativa VDI 4630 (2006).

Los biodigestores contaron con una proporción estiércol-bagazo de 2:1, es decir, dos partes de estiércol por una de bagazo contemplando los %ST de los mismos. La concentración con la que se trabajó fue del 5% en (%ST), con 3 repeticiones cada una, para garantizar fiabilidad estadística. Por lo tanto, 3 biodigestores poseían Bagazo inoculado con estiércol de Gallina (B+G), y otros tres con Bagazo y estiércol de Cerdo (B+C). Por último, se contó con dos blancos por triplicado, compuesto solo por los respectivos estiércoles al 5% de disolución, es decir, 3 biodigestores con estiércol de Gallina (G) y otros tres con estiércol de Cerdo (C), con la concentración especificada. A pesar de que los biodigestores batch toleran concentraciones altas de ST, se trabajó con una del 5%, para luego poder extrapolar los resultados al biodigestor posteriormente dimensionado volumétricamente. Con el objetivo de buscar en ambos sistemas estabilidad en el proceso, para producir una biodigestión efectiva.

Tabla 6: Nomenclatura utilizada en ensayo de laboratorio para identificar tratamientos.

Nombre	Descripción tratamiento
B+G	Bagazo y estiércol de Gallina
B+C	Bagazo y estiércol de Cerdo
G	Guano de Gallina
C	Guano de Cerdo

Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la Figura 14 de forma esquemática, los biodigestores de pequeña escala fueron botellas de vidrio de salsa de tomate de 500 ml, donde 350 ml fueron utilizados como volumen de reacción, es decir fase sólida-líquida de sustratos y 150 ml volumen libre de fase gaseosa. Éstas fueron conectadas a través de una manguera cristal a una bolsa de plástico sellada tipo "bag in box" (gasómetros).

Para obtener los gasómetros con 0,5 l de volumen, se realizaron ciertas modificaciones del material, realizando los cortes necesarios y luego volviéndolos a sellar con un sellador plástico. Una vez selladas se comprobó su estanqueidad sumergiéndolas en agua para verificar que no posean orificios en donde pueda salir aire mediante burbujeo.

Los sustratos introducidos en los biodigestores no contaron con un tratamiento previo, y una vez cargados los mismos con las relaciones proporcionales que correspondían, se los selló con tapones plásticos y utilizando sella rosca entre el pico y la tapa para asegurar que no haya fugas en el futuro. Estas tapas fueron perforadas en su

centro y atravesadas con manguera de tipo cristal de 2mm de diámetro, utilizando aquí también sella rosca entre la tapa y la manguera. Esta manguera conectó los biodigestores con los gasómetros. Estos últimos se encontraban elevados, para que la humedad de la mezcla gaseosa condense en la manguera camino y vuelva al biodigestor.

Entre los biodigestores y los gasómetros se realizaron las adaptaciones necesarias, colocando una "T" del mismo material, para que puedan hacerse los cierres de paso de gas correspondientes (utilizando pinzas plásticas) para poder tomar las muestras de biogás (Figura 14). Estas mediciones fueron tomadas a diario con una jeringa de 60 ml, haciendo las descargas necesarias, hasta vaciar las bolsas con la precaución de no llegar a producir una presión negativa en el sistema. Cada biodigestor se agitó durante 5 segundos previos a la toma de muestras, realizando un movimiento de tipo circular en paralelo a la base de la botella.

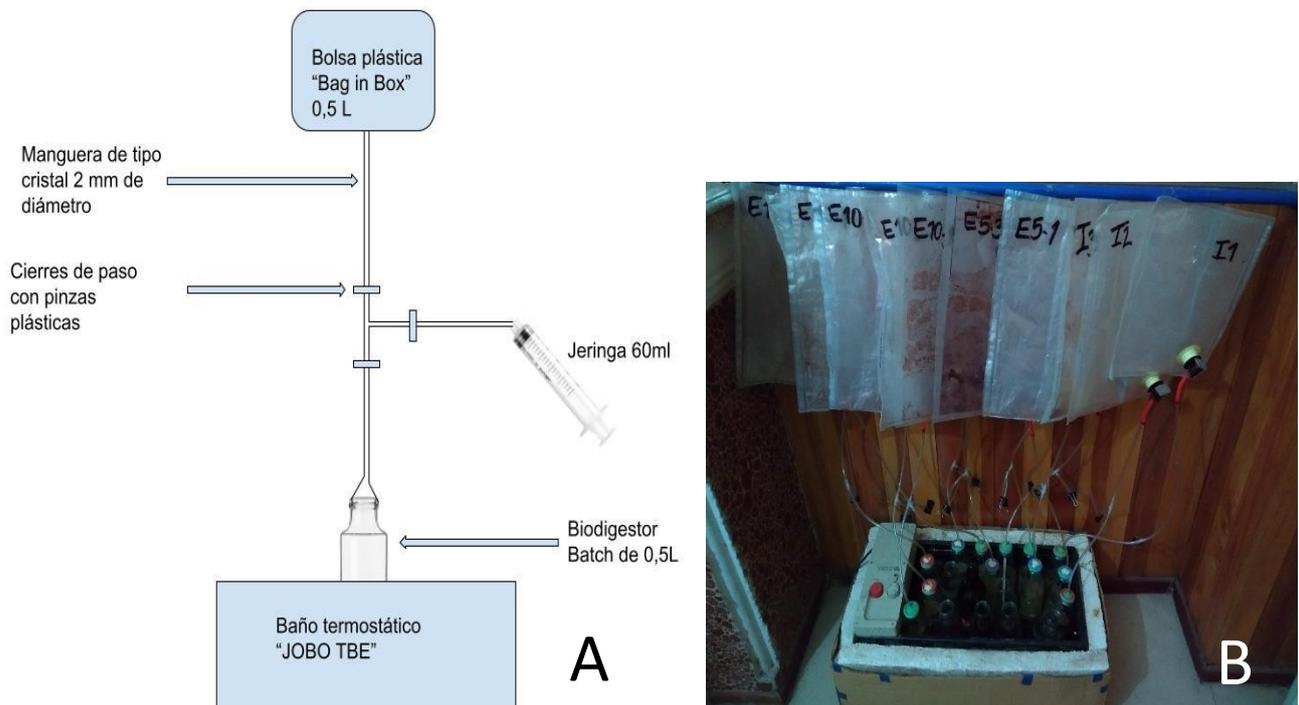


Figura 14: Montaje de biodigestores en forma esquemática (A) y montaje real (B).  
**Fuente:** Elaboración propia.

El baño termostático "JOBO TBE" se programó a una temperatura de 35°C y se tomó como referencia la Presión Ambiental Media diaria de los meses de enero y febrero de Mendoza, provistas por (Meteored, s.f.). Luego, esta información fue utilizada para poder normalizar los resultados a Condiciones Normales de Presión y Temperatura (CNTP). Es decir, con una temperatura de 273K y 1013hPa de presión basándonos en la guía que enseña Steinmetz (2019).

Ecuación 2: Normalización de volúmenes de biogás a Condiciones Normales de Presión y Temperatura.

$$\frac{P_1 * V_1}{T_1} = \frac{P_2 * V_2}{T_2}$$

Donde:

$P_1$ =Presión absoluta de 1013 Hectopascales (hPa)

$V_1$ = Volumen (ml) buscado de biogás normalizado

$T_1$ = Temperatura de 273 Kelvin (K)

$P_2$ = Presión del biogás al momento de medida, para lo cual se utilizó la presión ambiental del día en (hPa)

$V_2$ = Volumen (ml) del biogás medido

$T_2$ = Temperatura del biogás al momento de la medición, para lo cual se tomó la temperatura del agua medida por termómetro en el baño termostático.

La nomenclatura para identificar a los biodigestores fue la especificada en la Tabla 6. Para comprobar la estanqueidad del sistema, se utilizó espuma de detergente en las uniones con mayor riesgo de poseer pérdidas gaseosas. Diariamente, se registró producción de biogás, temperatura del baño, y demás parámetros y acontecimientos que puedan surgir. Los datos se procesaron con planillas de cálculo para obtener los valores acumulados de biogás.

En las siguientes imágenes que muestra la Figura 15, podemos ver en la imagen A, como se fue realizando la carga de los biodigestores, respetando las cantidades de agua, y sustratos que debían añadirse en la mezcla, previamente calculado, para obtener concentraciones de 5% de las mismas. También, en la imagen B, se puede ver el sistema completamente montado: en la base el baño termostático, en la parte superior los gasómetros conformados por bolsas tipo “bag in box”, unidas mediante mangueras de tipo cristal, con las adaptaciones necesarias para poder tomar las muestras gaseosas.



Figura 15: Puesta en marcha biodigestores Batch.

**Fuente:** Elaboración propia.

## 2.2 Viabilidad de bioles obtenidos para el crecimiento vegetal

Los bioles obtenidos de las diferentes disoluciones, fueron caracterizados en cuanto a parámetros fisicoquímicos como pH y conductividad, tomando como referencia los resultados obtenidos de éstos sin diluir en agua.

Por otra parte, se confeccionó un análisis de la fitotoxicidad de los bioles obtenidos llevando a cabo la metodología de Zucconi (1981) citada en (Venandy, 2012). A través de este bioensayo, se logra detectar la presencia de sustancias fitotóxicas de compuestos puros o en mezclas complejas en el proceso de germinación de las semillas (Sobrero, Ronco; 2004). Para lo cual se utiliza una especie indicadora sensible, lechuga (*Lactuca sativa*), que tiene como ventajas rápido crecimiento y fácil manejo. La cual es sometida a la sustancia a evaluar por un periodo de 120 horas. De este modo, se analizó el efecto que

tienen los bioles en sus diferentes diluciones en el proceso de germinación de semillas, analizándose la inhibición de la germinación, elongación de radícula e hipocótilo. Evaluar el desarrollo de la radícula y el hipocótilo constituyen indicadores representativos para analizar el establecimiento y desarrollo vegetal (Sobrero, Ronco; 2004).

Para dicha tarea, se establecieron 5 tratamientos con tres diluciones de evaluación con tres repeticiones cada una, que resultaron del biol proveniente del bagazo con estiércol de cerdo (B+C) y del bagazo con estiércol de gallina (B+G). Estos resultados conformaron un parámetro más para analizar con que estiércol es más favorable que sea biodigerido el bagazo de cerveza.

**T1:** Control Negativo o 100% agua destilada.

**T2:** biol puro 100:100 (100%).

**T3:** Dilución del biol 50:100 (50%).

**T4:** Dilución del biol 10:100 (10%).

**T5:** Dilución del biol 5:100 (5%).

Como se observa en la Figura 16, se utilizaron 20 semillas en cada placa de Petri con 4 ml de cada disolución.

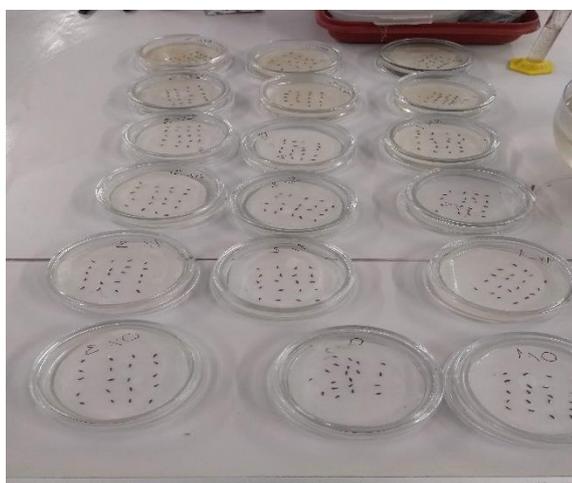


Figura 16 Semillas en diferentes diluciones de bioles.

**Fuente:** Elaboración propia.

En la Figura 17 se observa la cámara de cultivo donde fueron colocadas las placas durante 120 horas (5 días). Ésta se configuró a una temperatura de 23°C, y se colocaron en recipientes a oscuras. Esto fue para favorecer la germinación, ya que algunas variedades de semillas requieren de esta condición para germinar, ya que son fotoblásticas negativas (Sobrero; Ronco, 2004). Esto se realizó en el laboratorio de Agrotecnología Sostenible, INTA EEA Mendoza.



Figura 17: Estufa de cultivo

Fuente: Propia

Se determinó el nivel de fitotoxicidad a través de las siguientes ecuaciones:

Ecuación 3: Porcentaje de Germinación Relativo

$$GR(\%) = \frac{N^{\circ} \text{ de semillas germinadas en biol}}{N^{\circ} \text{ de semillas germinadas en testigo}} \times 100$$

Ecuación 4: Largo de Radícula Relativo

$$ER(\%) = \frac{\text{Largo promedio de radícula en biol (cm)}}{\text{Largo promedio de radícula en testigo (cm)}} \times 100$$

Ecuación 5: Índice de Germinación

$$IG(\%) = \frac{GR * ER}{100}$$

Zuconni et al. (1981) citado en (Varnero et Al., 2007) establece el siguiente criterio de interpretación con respecto al índice de fitotoxicidad: valores de  $IG \geq 80\%$  indicarían que no hay sustancias fitotóxicas o están en muy baja concentración; si el  $IG \leq 50\%$  indicaría que hay una fuerte presencia de sustancias fitotóxicas y si se obtiene un valor entre  $50\%$  y  $80\%$  se interpretaría como la presencia moderada de estas sustancias.

Se llevó a cabo un análisis estadístico de tipo descriptivo teniendo en cuenta la elongación de la radícula y del hipocótilo de las plántulas para cada tratamiento, utilizando el software Infostat. También, se calculó el porcentaje de inhibición con respecto a la elongación promedio de la radícula y del hipocótilo, referenciando estos parámetros al control negativo (agua destilada), ya que éste último puede considerarse que genera las condiciones ideales de germinación.

## 2.3 Tecnología necesaria para tratar la totalidad de bagazo generado en una cervecería local

Para poder estudiar el tratamiento del bagazo producido en la industria de cerveza utilizando la tecnología de digestión anaerobia, se tomó como referencia una cervecería de tipo artesanal ubicada en “Cruz de Piedra” zona rural del departamento de Maipú, Provincia de Mendoza, Argentina. Donde se detalló su ubicación mediante la confección de un mapa con el programa QGIS 3.2.2, en el cual también se especifica el terreno disponible que posee para la instalación de un biodigestor que trate la totalidad del bagazo producido.

Se propuso llevar a cabo el cálculo volumétrico de un biodigestor para poder tratar la totalidad de bagazo generado, teniendo en cuenta información recabada mediante encuesta realizada al productor en el año 2019 de su esquema de producción. También se contempló la generación de residuos que posee esta cervecería en los meses de mayor actividad (verano).

Con el objetivo de analizar que porcentaje de energía convencional (GLP) será cubierto por biogás con la instalación del biodigestor diseñado. Se tuvieron en cuenta parámetros tales como, las producciones de biogás de las digestiones con los sustratos estudiados, obtenidos a escala batch. También, las características fitotóxicas de los bioles producto de la codigestión entre el bagazo de cerveza y el estiércol, decidiendo en base a esto, cual de los dos estiércoles (de gallina o de cerdo) es más óptimo para utilizarse como cosustrato.

Se analizó también la disminución que se produciría de  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  liberado por realizar el reemplazo del GLP con biogás, teniendo en cuenta el poder calorífico de este último de 5500 kcal/l. Dicho cálculo se realizó considerando factor de emisión por defecto del GLP de 64.200 kg  $\text{CO}_2/\text{TJ}$ , para la industria manufacturera (IPCC, 2006). En la digestión anaerobia, no se considera el  $\text{CO}_2$  liberado en la combustión por tratarse de energía proveniente de biomasa (EPE, 2010).

Este cálculo fue determinado en función de cuántas calorías utiliza el productor por cocción, tomando en cuenta la tecnología de GLP ya instalada. Estas se obtuvieron multiplicando los 45 kg de GLP, por su respectivo poder calorífico de 11.739 kcal/kg (Osinergmin, 2012). Entonces, se analizó que porcentaje el biogás reemplazaría la fuente energética convencional, y de esta forma, la cantidad de  $\text{CO}_{2\text{EQ}}$  que disminuiría con el diseño de un biodigestor que trate la totalidad del bagazo producido.

## 2.4 Estudio de factibilidad económica para la implementación de un biodigestor que trate la totalidad de residuos producidos en la cervecería local

Una vez estudiada la tecnología necesaria para poder tratar la totalidad de los residuos que genera el productor de cerveza. Se realizó un breve análisis económico, utilizando fuentes de información de origen secundario, para poder determinar si el mismo puede llevar a cabo la inversión necesaria para dicha finalidad. Para esto, fueron provistos 3 presupuestos por la cátedra de Química General e Inorgánica de la Facultad de Ciencias Agrarias, UNCuyo. Los cuales fueron provistos por 3 organizaciones diferentes de Argentina dedicadas a las energías alternativas, donde especificaron el costo de la construcción de una planta de biogás de similares dimensiones a la determinada en este estudio. Además de esta inversión, se detallaron los costos operacionales que deberán afrontarse para un correcto funcionamiento. Por último, se determina el ahorro en el cual se incurre debido al reemplazo de GLP por el biogás que producirán esas plantas.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Caracterización de sustratos

A continuación, se presentan la caracterización de los sustratos utilizados en la biodigestión tipo batch, donde algunos parámetros fueron determinados en el Laboratorio de Química General e Inorgánica de la Facultad de Ciencias Agrarias, UNCuyo. Mientras que otros, fueron obtenidos mediante recopilación bibliográfica. Lo cual se detalla en la Tabla 7:

Tabla 7: Caracterización de sustratos.

	<b>Bagazo de cerveza</b>	<b>Estiércol de gallina ponedora</b>	<b>Estiércol de cerdo</b>
<b>%ST</b> (en base húmeda)	27,0 <sup>1</sup>	30,0	32,0
<b>%Humedad</b> (en base húmeda)	73,0 <sup>1</sup>	70,0	68,0
<b>%SV</b> (en base seca)	97,0 <sup>2</sup>	58,6	-
<b>%Cenizas</b> (en base seca)	3,0 <sup>2</sup>	41,4	-
<b>pH</b>	5,2 <sup>2</sup>	6,7	7,1
<b>Método/Bibliografía</b>	Laboratorio Química General e Inorgánica ( <sup>1</sup> FCA) y ( <sup>2</sup> Venandy, 2012)	(Secretaría de Agroindustria, 2019)	(Alvino, Guillén, Saa Pérez, 2019)

**Fuente:** Recopilación bibliográfica y propia.

Se puede ver que los valores tanto de %ST, %Humedad y %SV que caracterizan al bagazo de cerveza coinciden con los obtenidos por otros autores como Bougrier, Ulloa y colaboradores en diferentes estudios citados en (Pedraza, S.N). Dicho trabajo expresa contenidos de %ST de 24 a 26,4%, de % Humedad que van del 74 a 76%, y de %SV de 72 a 97% y el mismo valor de pH reportado por (Rodríguez, 2012).

En cuanto a los estiércoles, los valores de Guano de Gallina ponedora son coincidentes por los reportados por gran cantidad de autores citados en el trabajo de (Rizzo, 2009), siendo estos expresados como rango de valores, tales como %ST entre 22-41, % Humedad de 57 a 70% determinados por el mismo autor, y de % SV de 54-75% y de pH de 6,4 a 8,8. Aguilera y Castellón (2019) determinan un valor similar en porcentaje de Sólidos Totales para el estiércol porcino, de 39,4 %ST, y por lo tanto, un valor de % Humedad parecido al especificado de 60,6%.

Varnero (2011) aclara que idealmente los biodigestores semicontinuos deben contar con un %ST que no supere valores que vayan de 8 a 12%, para el correcto funcionamiento del proceso. En este trabajo, llevando a cabo las correcciones necesarias se estudiaron concentraciones a escala batch de 5% en ST, para que los resultados obtenidos puedan ser extrapolados a otros tipos de sistemas, como semicontinuos o continuos. En cuanto al pH, recordemos que valores óptimos para la biodigestión van de (6,8 – 7,4), por lo que se espera que el pH del bagazo cambie a un valor más propicio al llevar a cabo la codigestión con sustratos más básicos. Además, es de suma importancia contar con estos inóculos, ya que favorecerán la descomposición de la estructura compleja que posee el bagazo de cerveza.

### 3.2 Potencial de biometanización (BMP) del bagazo de cerveza en co-digestión con estiércol de cerdo y de gallina

En la Figura 22, pueden verse la evolución del biogás acumulado en el tiempo de 31 días que duró el ensayo, con sus valores normalizados a CNTP. Se determinó que una de las repeticiones de bagazo y estiércol de gallina no era representativa (B+G), ya que no se encontraba en un sistema totalmente hermético, por lo cual se desestimaron los valores obtenidos de la misma.

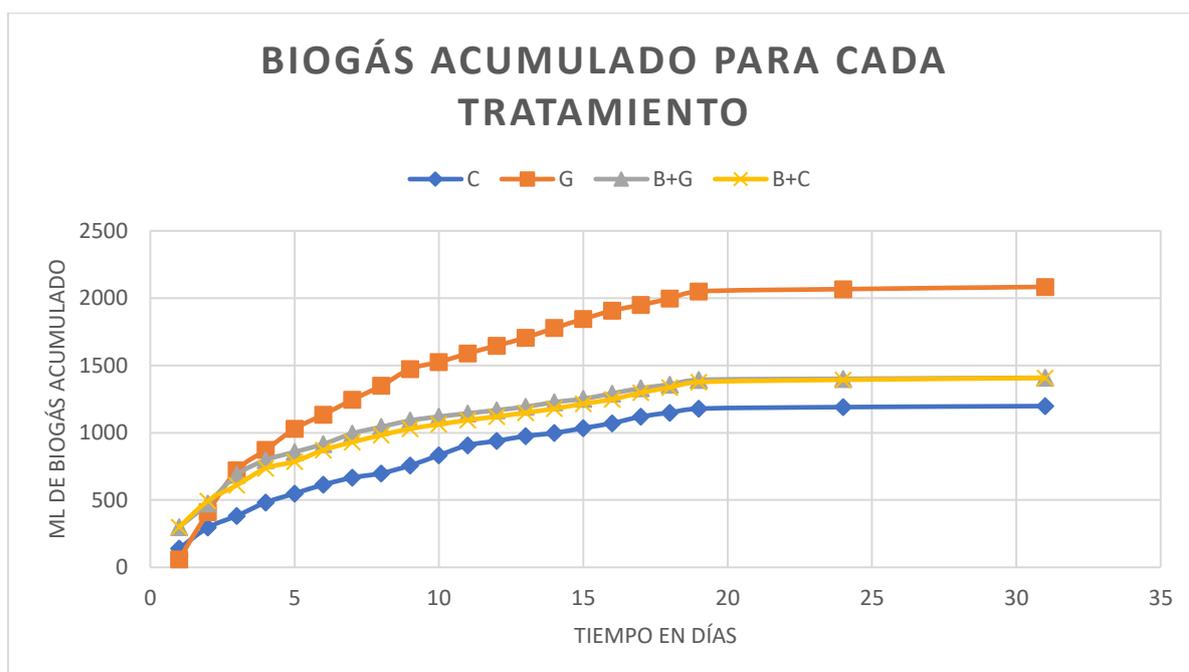


Figura 18: Acumulación de biogás según diferentes tratamientos en el tiempo ensayado.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8: Producción acumulada promedio según tratamiento.

Tratamiento	Promedio acumulado de biogás (ml) <sup>7</sup>	BMP (ml de biogás/g ST) <sup>7</sup>
C	1198	68,4
G	2084	119,0
B+G	1408	80,5
B+C	1407	80,4

Fuente: Elaboración propia.

Puede observarse que las mayores producciones acumuladas se obtuvieron con la biometanización solo de inóculo de Guano de Gallina (G), con un valor promedio de 2084 ml acumulados en los 31 días de ensayo, dando como resultado un BMP de 119 ml de biogás/g ST. También, que entre (B+G) y (B+C) no hay grandes diferencias, ya que en valores promedio de producción acumulada los resultados fueron prácticamente iguales de 1408 y 1407 ml, obteniendo un valor de BMP de 80,5 y de 80,4 ml de biogás/g ST respectivamente.

A través del análisis gráfico puede verse que la evolución de (B+G) y (B+C) es muy similar. Mientras que la biodigestión solo del sustrato porcino (C) obtuvo la menor cantidad de gas acumulada en el tiempo ensayado, 1198 ml, con un valor de BMP de 68,4 ml de

<sup>7</sup> En Condiciones Normales de Presión y Temperatura

biogás/g ST. Varnero (2011) aclara que el guano de cerdo puede contener ciertas proteínas azufradas que inhiben la biodigestión.

Venandy (2012) lleva a cabo la biodigestión del bagazo de cerveza, previamente corregido su pH con una solución de cal y agua. Inoculado con estiércol vacuno, es una proporción 10:1 en kg de los respectivos sustratos. Esto lo hace a través de un sistema tipo batch de 45 l de reacción. Obteniendo valores de 133 ml biogás/ g ST. Valor más alto a los obtenidos en este estudio, que puede deberse a dicha corrección de pH.

Es preciso analizar, como las producciones promedio acumuladas del inóculo aviar merma al ser mezclado con bagazo de cerveza, produciendo menores cantidades de biogás. Según (Panjicko et al., 2017) esta inhibición del proceso puede deberse a la producción de amonio debido al alto contenido proteico que posee el bagazo de cerveza. Mussatto (2013) afirma que la producción de biogás se ve inhibida por compuestos intermedios producto de la degradación de un material lignocelulósico, como es el bagazo de cerveza, entre estos compuestos, destaca el p-cresol. La misma autora asegura que la adaptación de los microorganismos anaerobios a altas concentraciones de este compuesto, puede estar dada a través de un pretratamiento con bacterias u hongos. También (Bougrier, 2018) afirman que la adición de nutrientes tanto en baja, como en alta concentraciones estabilizan el proceso de digestión, manteniendo el pH estable y removiendo la materia orgánica de forma considerable. Otros estudios como el de (Cater et al., 2015) y el de (Mainardis et al., 2019) afirman que la bioaumentación (inoculación de microorganismos) y la adición de carbón al proceso digestivo podrían aumentar la concentración de metano.

### 3.3 Caracterización del biol

#### 3.3.1 Parámetros biol obtenido

En la Tabla 9 se presentan los valores tanto de pH como de conductividad, de los bioles resultantes de los de ensayos de BMP realizados a escala batch. Para determinar los valores de conductividad, se tomó el valor de las muestras puras y luego por proporcionalidad directa, se determinó el valor de las diluciones. El valor de pH fue determinado para las concentraciones puras (100%). Se ha utilizado una sola cifra significativa, redondeando al primer decimal.

Tabla 9: pH y Conductividad de bioles resultantes de los ensayos de biodigestión.

Tratamiento	pH bioles	Conductividad bioles (mS/cm)	Material empleado
G (100%)	7,1	13,9	Conductímetro marca Lutron y potenciómetro portátil marca Hannah
C (100%)	5,8	10,5	
B+G (100%)	6,1	12,6	
B+G (10%)	-	1,3	
B+G (5%)	-	0,6	
B+C (100%)	5,0	9,0	
B+C (10%)	-	0,9	
B+C (5%)	-	0,5	

**Fuente:** Determinaciones de pH propias y conductividades realizadas por Laboratorio de Fitoquímica de CCT Mendoza.

El valor de pH de Gallinaza es similar al reportado por (Carhuancho León, 2012) de la granja “La Calera” con un valor correspondiente 7,2 encontrado, mientras que el valor de biol porcino que reporta (Medina, Quipuzco, Juscamaita, 2014) es de 7,89; por lo que difiere al obtenido.

Según (Barbaro, Karlanian, Mata, 2014) un pH propicio para la mayoría de los cultivos ornamentales es de 5,5 a 6,8; pero también hay plantas que requieren valores

menores a 5,5. Estos autores, también afirman que una conductividad recomendada para poder ser utilizada en un compuesto de nutrición vegetal debe ser baja, menor a 1 mS/cm, ya que de este modo se evitan problemas de fitotoxicidad y de fertilización. Es por esto, que los bioles estudiados con un mayor porcentaje de dilución (5 y 10%) poseen características más propicias en cuanto a este parámetro.

### 3.3.2 Fitotoxicidad

La Tabla 10 muestra los valores obtenidos de Índice de Germinación Relativo IG (%), Largo de la Radícula Relativo ER (%) y el Porcentaje de Germinación Relativo GR (%) para diferentes concentraciones de los bioles resultantes de la biodigestión del bagazo de cerveza digerido con estiércol porcino y con estiércol de gallina en diferentes tratamientos a escala batch.

Tabla 10: Porcentaje de Germinación relativo GR (%), Largo de la Radícula Relativo ER (%) y Porcentaje de Germinación IG (%) de los bioles resultantes de los tratamientos B+C (%) y B+G (%) a diferentes concentraciones (5%, 10%, 50% 100%).

	<b>GR (%)</b>	<b>ER (%)</b>	<b>IG (%)</b>	<b>Grado de toxicidad</b>
<b>CONTROL</b>	100%	100%	100%	Toxicidad nula
<b>B+C (100%)</b>	0	0	0	Toxicidad severa
<b>B+C (50%)</b>	0	0	0	Toxicidad severa
<b>B+C (10%)</b>	8,5	13,8	1,2	Toxicidad severa
<b>B+C (5%)</b>	34,0	13,3	4,5	Toxicidad severa
<b>B+G (100%)</b>	0	0	0	Toxicidad severa
<b>B+G (50%)</b>	0	0	0	Toxicidad severa
<b>B+G (10%)</b>	78,7	94,8	74,7	Toxicidad moderada
<b>B+G (5%)</b>	80,9	24,0	19,4	Toxicidad severa

**Fuente:** Elaboración propia basa en metodología detallada por (Sobrero; Ronco, 2004).

De acuerdo a los datos obtenidos de germinación a diferentes concentraciones de biol, se puede observar que es preponderante hacer una disolución de los mismos, ya que solo se obtuvieron germinaciones y elongaciones de radícula para las disoluciones de 5 y 10%. Esto es muy probablemente debido a las grandes concentraciones de sales que poseen los bioles, lo cual puede verse en los resultados de conductividad de la tabla 9.

Analizando los resultados del ensayo para estas diluciones, se puede observar que los bioles procedentes de la digestión de bagazo con guano de gallina (B+G) tienen una mejor respuesta que los digeridos con guano de cerdo (B+C). Posiblemente la biodigestión se ha producido de forma más completa con el inóculo aviar, comparado al porcino, evitando la liberación de gran cantidad de ácidos intermediarios que producirían una disminución del pH.

Con respecto a (B+C), la dilución de 5% favoreció una mayor germinación, visto representado en un mayor GR%, pero sin realizar un cambio significativo, ya que el valor de IG%, no varió de forma considerable, obteniendo toxicidades severas para ambas

concentraciones. Con respecto a (B+G) no sucedió lo mismo, ya que a pesar de que la germinación y elongación de radícula se vio favorecida a concentraciones bajas, de 5 y 10%, puede observarse que la concentración de 10% tuvo un mejor respuesta en términos generales que la de 5%, viéndose representado esto, en el valor de IG%, que fue considerablemente más alto para (B+G) al 10% de disolución que para (B+G) al 5% de dilución, obteniendo un valor de toxicidad moderada (IG=74,7%) y de toxicidad severa (IG=19,4%) respectivamente.

Estos resultados, se condicen con los valores de pH y conductividad de los bioles obtenidos en Tabla 9. Ya que para (B+G), el pH de 6,1 tiende más a la neutralidad que el pH obtenido en (B+C) de 5,0 el cual es ácido. Siendo este último menos propicio para la germinación. Venandy (2012), realiza una corrección del pH antes de iniciar la biodigestión del bagazo de cerveza, utilizando como inóculo, guano fresco vacuno. Pero a pesar de esto, los resultados de fitotoxicidad que se obtienen del sustrato resultante son muy similares (toxicidades severas).

Tabla 11: Estadística descriptiva en base a la elongación de radícula e hipocótilo (mm) en diferentes tratamientos.

Tratamiento	Variable	n	Media (mm)	D.E. (mm)	Var (n) (mm <sup>2</sup> )	Mín. (mm)	Max. (mm)
Control	Largo Radícula	60	7,60	5,51	29,91	0,00	17,00
	Largo Hipocotilo		9,25	6,84	46,02	0,00	19,00
B+C (5%)	Largo Radícula	60	0,37	0,76	0,57	0,00	4,00
	Largo Hipocotilo		0,17	0,56	0,31	0,00	3,00
B+C (10%)	Largo Radícula	60	0,10	0,44	0,19	0,00	3,00
	Largo Hipocotilo		0,03	0,26	0,07	0,00	2,00
B+C (50%)	Largo Radícula	60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Largo Hipocotilo		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B+C (100%)	Largo Radícula	60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Largo Hipocotilo		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B+G (5%)	Largo Radícula	60	1,47	1,58	2,45	0,00	6,00
	Largo Hipocotilo		4,53	5,03	24,85	0,00	17,00
B+G (10%)	Largo Radícula	60	5,70	6,27	38,64	0,00	22,00
	Largo Hipocotilo		6,93	6,56	42,26	0,00	22,00
B+G (50%)	Largo Radícula	60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Largo Hipocotilo		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B+G (100%)	Largo Radícula	60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Largo Hipocotilo		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia basado en metodología propuesta por (Sobrero; Ronco, 2004) utilizando InfoStat.

Según lo observado en la Tabla 11, la elongación tanto radicular como la del hipocótilo en el control negativo, presenta los valores más altos en comparación con las otras diluciones de los bioles ensayados. Con valores medios de 7,60 mm para la radícula y de 9,25 mm para el hipocotilo. Además, puede observarse aquí una gran variabilidad en los resultados reflejados con altos valores de desviación estándar, 5,51mm (radícula) y 6,84 mm (hipocotilo).

En cuanto a los testeos de bioles en sus diferentes concentraciones, puede observarse que la elongación radicular y de hipocotilo que presentó los valores más altos es la que corresponde a la de B+G (10%), con valores promedio de 5,70 mm y 6,93 mm respectivamente, y también con una alta variabilidad reflejada en los grandes valores de desviación estándar (D.E). Esto se condice con la toxicidad moderada que se determinó para dicha dilución.

Mientras que B+G (5%) presenta valores que siguen en orden de magnitud de 1,47mm para la radícula y de 4,53 mm para el hipocotilo, presentando una mayor variabilidad para este último que con la radícula. En las otras diluciones y bioles ensayados, no se observan resultados que propicien altos índices de elongación radicular o del hipocotilo.

### 3.3.3 Dosis-Respuesta en función de la elongación radicular a diferentes concentraciones

Tanto para la Tabla 12 (Dosis-Respuesta radícula) como para la Tabla 13 (Dosis-Respuesta hipocótilo) a continuación, se pueden observar cual es el porcentaje de inhibición a diferentes concentraciones de los bioles. Éstas están relativizadas al control mediante proporcionalidad directa, tomando en cuenta que en éste se tiene la respuesta más óptima (100%), ya que en el mismo se lleva a cabo la germinación de las semillas en agua destilada.

Tabla 12: Largo promedio de radícula a diferentes diluciones de bioles (5%,10%,50%,100%) provenientes de la biodigestión de (B+G) y (B+C) y porcentaje de inhibición relativizados al control.

Datos	Largo Radícula (mm)	Inhibición crecimiento radícula relativizada a la respuesta del control (%)
Control	7,60	0
B+C (100%)	0	100
B+C (50%)	0	100
B+C (10%)	0,1	98,68
B+C (5%)	0,37	95,13
B+G (100%)	0	100,00
B+G (50%)	0	100,00
B+G (10%)	5,70	25
B+G (5%)	1,47	80,66

**Fuente:** Elaboración propia basado en metodología propuesta por (Sobrero, Ronco, 2004).

Tabla 13: Largo promedio de hipocotilos a diferentes concentraciones de biol y porcentaje de inhibición relativizados al control.

Datos	Largo del hipocotilo (mm)	Inhibición crecimiento hipocotilo en base a la respuesta del control (%)
Control	9,25	0
B+C (100%)	0	100,00
B+C (50%)	0	100,00
B+C (10%)	0,03	99,68
B+C (5%)	0,17	98,16
B+G (100%)	0	100,00
B+G (50%)	0	100,00
B+G (10%)	6,93	25,08
B+G (5%)	4,53	51,03

**Fuente:** Elaboración propia basado en metodología propuesta por (Sobrero, Ronco, 2004).

A partir de estos resultados podemos observar que la respuesta más favorable tanto para la elongación radical como del hipocótilo se produce con el biol de (B+G) a un 10% de dilución. Ya que con dicha dilución la inhibición tanto radicular como la del hipocotilo es del 25 %. Todas las otras diluciones no representaron resultados favorables, siendo muy inhibitorias en lo que respecta tanto al crecimiento radical como del hipocótilo.

### 3.4 Análisis de la viabilidad técnica para la implementación de un biodigestor en la cervecería estudiada

#### 3.4.1 Cálculo del volumen de reacción de un biodigestor para tratar la totalidad de residuos generados

Se decidió llevar a cabo el dimensionamiento volumétrico de un biodigestor de mezcla completa, que pueda tratar la totalidad del bagazo que produce la cervecería presentada a continuación. Tomando como referencia los resultados obtenidos de la codigestión (B+G), ya que las características fitotóxicas del biol resultante fueron las más propicias. Esto se hizo en base al esquema productivo que posee (Figura 20), y teniendo en cuenta los meses de mayor producción de verano, cuando la cantidad de residuos es mayor.

Como puede verse en la Figura 19, el terreno cuenta con un predio externo de 90 m<sup>2</sup> y un galpón de 71 m<sup>2</sup>, lugares donde posiblemente se pueda instalar el biodigestor dimensionado para tal propósito.

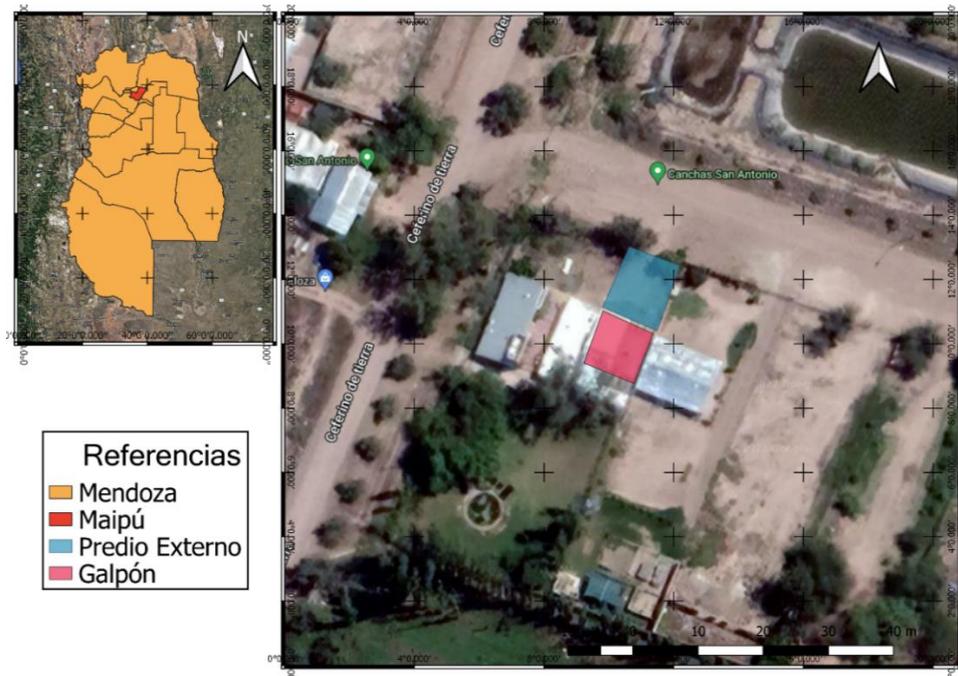


Figura 19: Ubicación de la cervecería artesanal.  
Fuente: Elaboración propia con QGIS 3.2.2.

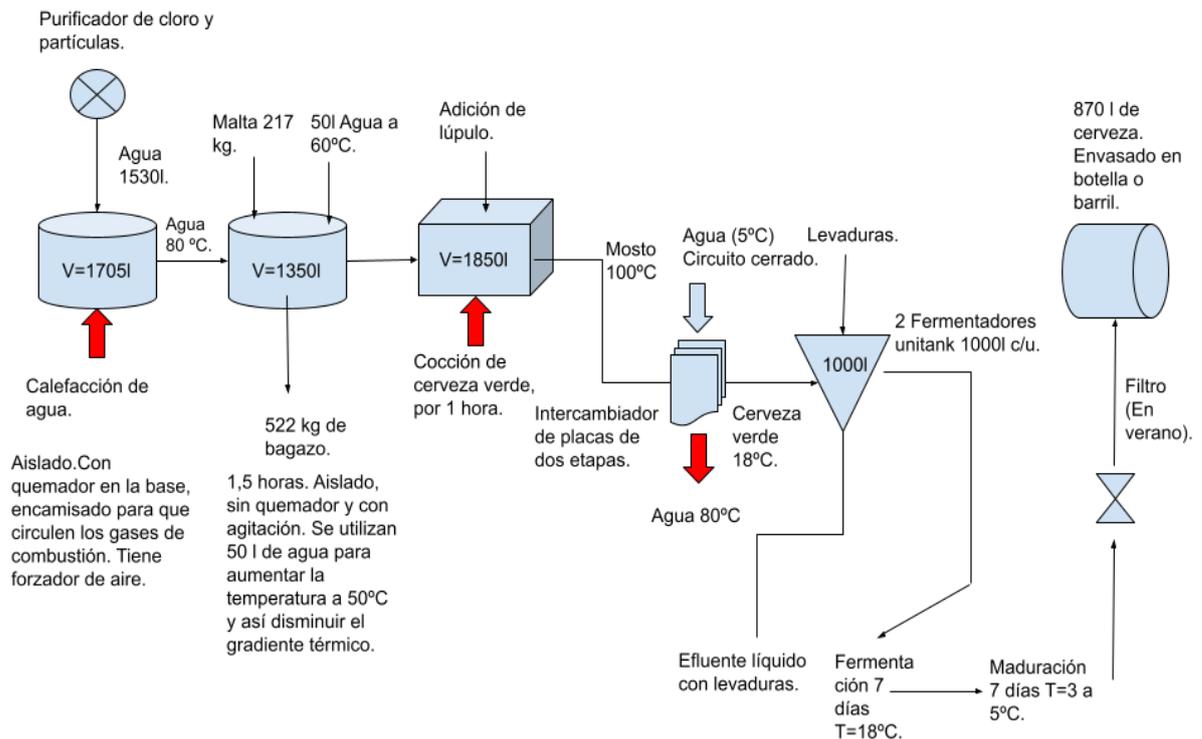


Figura 20: Esquema de producción de cervecería artesanal ubicada en Maipú, Mendoza  
Fuente: Elaboración propia en colaboración con el Instituto de Energía (IDE).

Esta cervecería utiliza 1 tubo de GLP que es cargado con 360 kg de este compuesto. El mismo se agota pasadas las 8 cocciones. Es decir, utiliza 45 kg de GLP por cada cocción. Debido a la variación de demanda estacional propia de la industria, es que se especifican las producciones mensuales relacionadas a las diferentes estaciones del año. Por cocción se produce un total de 870 l de cerveza y a su vez, 522 kg de bagazo húmedo, ya que por cada litro de cerveza se produce 600 g de este subproducto (Martínez, 2020). Según la

estación en la Tabla 14 se especifican las cantidades de cerveza producida y los kilogramos de bagazo generados según la estación del año. Actualmente, el bagazo que produce está siendo destinado a un productor agrario local para alimentación porcina. Esta cervecería, al poseer una producción menor a 1.170.216,5 litros por año, entra en la clasificación de microcervecería (Saullo, Passo, Maydana, 2018).

Tabla 14: Producciones según estación.

Estación del año	Producción mensual de cerveza por estación del año (l)	Bagazo mensual producido por estación del año (kg)
Verano (13 lotes/mes)	11.310	6786 (Ene. – Feb. - Marzo)
Otoño (9 lotes/mes)	7.830	4698 (Abril – Mayo - Junio)
Invierno (7 lotes/mes)	6.090	3654 (Julio – Agosto -Sep.)
Primavera (10 lotes/mes)	8.700	5220 (Oct. – Nov. – Dic.)

Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta los meses de verano, se procedió a determinar cuántos kg de mezcla deberán ser introducidos en el biodigestor de forma diaria.

Ecuación 6: Kilogramos diarios de Sólidos Totales en los meses de verano en una cervecería local

$$6786 \frac{\text{kg bagazo}}{\text{mes de verano}} \times \frac{27 \text{ kg ST bagazo}}{100 \text{ kg bagazo}} \times \frac{1 \text{ mes}}{30 \text{ días}} = 61 \frac{\text{kg ST bagazo}}{\text{día}}$$

Como en escala batch, el total de ST, estaba representada por 1 parte de bagazo y 2 de estiércol de gallina, 61 kg ST bagazo/ día, representa (1/3) del total de ST de la mezcla. Mientras que los otros (2/3) serán los que aporten el estiércol avícola, es decir, 122 kg ST estiércol gallina/ día. Sumados estos valores tendremos un total de 183 kg ST de mezcla/día. Con estos valores de ST, deberán incorporarse 226,2 kg bagazo/día y 406,7 kg de estiércol Gallina/ día.

Al haber trabajado con una dilución del 5% en escala de laboratorio, los 183 kg ST de mezcla/día, representa el 5% de la carga diaria. Por lo que el 100%, es de 3660 kg de mezcla diaria. Al trabajar con una dilución tan grande, se asume que esta carga puede considerarse como de 3660 l de mezcla diarios. Por lo que descontando el agua que ya tienen el bagazo junto con el cosustrato, deberían añadirse 3027,1 l de agua diariamente.

Entonces para saber cuál es el volumen de reacción con el que debemos trabajar, se aplica la siguiente ecuación. A pesar de que el ensayo a escala batch duró 31 días en total, el TRH fue considerado de 20 días, ya que las producciones luego de ese tiempo tendieron a ser muy bajas.

Ecuación 7: Volumen de reacción necesario del biodigestor para tratar la totalidad de residuos producidos.

$$V_{reacción} = \text{carga diaria} * \text{TRH} = 3660 \frac{\text{l}}{\text{día}} * 20 \text{ días} = 73.200 \text{l} = 73,2 \text{ m}^3$$

### 3.4.2 Abastecimiento energético estacional y anual de la cervecería analizada con biodigestión del bagazo producido

Partiendo de que la alimentación total del biodigestor será de 183 (kg ST de mezcla/día). Se procede a determinar cuántos m<sup>3</sup> de biogás se tienen diariamente. En este cálculo, el BMP (B+G) se expresa como la mitad del valor obtenido en laboratorio, para poder transpolar el resultado a condiciones reales, donde se considera un margen de eficacia de 50% de producción, es decir 40,25 (l biogás/ kg ST).

Ecuación 8: Cantidad de biogás (m<sup>3</sup>) que produciría el biodigestor de 73,2 m<sup>3</sup> asumiendo una eficacia del 50% con respecto al ensayo de laboratorio.

$$183 \frac{kg\ ST\ mezcla}{día} \times 40,25 \frac{Nl}{kg\ ST} \times \frac{1m^3}{1000l} = 7,4 \frac{Nm^3\ biogás}{día}$$

A continuación, se analiza la cantidad de energía con la que se cuenta al momento de llevar a cabo cada cocción.

Ecuación 9: Energía en kcal por el biogás obtenido en cada cocción

$$7,4 \frac{Nm^3\ biogás}{día} \times 5500 \frac{kcal}{Nm^3\ biogás} \times 2,3 \frac{días}{cocción\ (verano)} = 93.610 \frac{kcal}{cocción}$$

Contemplando que cada cocción conlleva 528.255 kcal provistas por el GLP. Con dicho valor calculado, en verano se llevará a cabo reemplazo energético de 17,7 % del total de energía requerida por cada vez que produce durante esta estación.

Siguiendo estos mismos cálculos para las otras estaciones del año, se procede a confeccionar la Tabla 15, que expresa en porcentaje el reemplazo energético que produciría el biogás según el esquema productivo ya presentado en la Tabla 14.

Tabla 15: Reemplazo energético del biogás por GLP.

	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
<b>Producciones mensuales</b>	13,0	9,0	7,0	10,0
<b>Días promedio que transcurren por cocción</b>	2,3	3,3	4,3	3,0
<b>Kg de ST de mezcla por día</b>	183	126,4	98,7	141,0
<b>m<sup>3</sup> de biogás diarios</b>	7,4	5,0	4,0	5,7
<b>Energía (Kcal) que provee el biogás para cada cocción</b>	93.610,0	90.750,0	94.600,0	94.050,0
<b>Reemplazo energético (%) de biogás por GLP</b>	17,7	17,2	17,9	17,8

El reemplazo energético que se tiene a lo largo del año, será igual a la sumatoria de los porcentajes obtenidos, dividido por las 4 estaciones, dando un valor de **17,7 %** de reemplazo de energía convencional por renovable.

### 3.4.3 Disminución de GEI por implementación de biogás

Para poder estimar la cantidad de GEI no emanado por el reemplazo energético, simplemente, analizamos la cantidad de GLP que utiliza la cervecería en el lapso de un año y a este valor, lo multiplicamos por el porcentaje de reemplazo que realiza el biogás. Este valor, multiplicado por su factor de emisión, nos expresa la cantidad de CO<sub>2</sub> evitadas por la instalación del biodigestor.

#### Factor de Emisión GLP

1 Terajoule (TJ) de GLP emite 63100 Kg de CO<sub>2EQ</sub>

Ecuación 10: Totalidad de CO<sub>2eq</sub> emanado por el GLP utilizado de forma anual en la cervecería local

$$117 \frac{\text{cocciones}}{\text{año}} \times 528.255 \frac{\text{kcal}}{\text{cocción}} * \frac{1000\text{cal}}{1\text{kcal}} * \frac{1 \text{ Joule}}{0,24 \text{ cal}} * \frac{1 \text{ TJ}}{10^{12}\text{J}} * \frac{63100 \text{ kg } CO_{2eq}}{\text{TJ}}$$

$$= 16.249,8 \text{ kg } CO_{2eq}$$

Multiplicamos este valor por el 17,7 % de reemplazo que realizará el biogás, obtenemos como resultado un total de **2876,2** (kg CO<sub>2EQ</sub>/año). Este valor representa la disminución de CO<sub>eq</sub> emanado en un año, por la utilización del biodigestor que trate el 100% de los residuos generados.

Es preciso aclarar este cálculo no contempla el CO<sub>2EQ</sub> que es evitado también por llevar a cabo un correcto tratamiento de un potencial residuo que puede tener una disposición inapropiada, ya sea en un vertedero o en otro ambiente, liberando gran cantidad de metano. Recordando que éste último posee un potencial de calentamiento atmosférico 21 veces más grande al producido por el CO<sub>2</sub>.

### 3.4.4 Factibilidad económica en la implementación del biodigestor dimensionado en una cervecería de tipo artesanal

#### 3.4.4.1 Inversión inicial

Una posible opción sería la implementación de un biodigestor de tipo tubular para poder tratar los residuos generados en la industria analizada por su bajo costo de materiales y relativamente económica construcción y puesta en marcha. El problema se presenta en que los volúmenes usuales que poseen los mismos suelen ser de 2,2 a 13,5 m<sup>3</sup>, siendo los más comunes los de 6 m<sup>3</sup> (Tauseef, Premalatha, Abbasi, & Abbasi, 2013) en (Arieta, 2016). Mientras que nuestro biodigestor posee un volumen de reacción de 73,2 m<sup>3</sup>, lo que excede ampliamente estos valores.

Por lo que, con un volumen tan considerable, debería llevarse a cabo la instalación de una planta que cuente con un biodigestor de mezcla completa y con un nivel tecnológico mucho más alto al de un biodigestor de tipo tubular. Una tecnología de este tipo, fue

instalada en el Mercado Cooperativo de Guaymallén, en Mendoza donde se realizó la construcción de una planta de 100 m<sup>3</sup> de volumen in situ.

Para llevar a cabo esta obra fueron consultados previamente tres presupuestos, de tres organizaciones del rubro de energías renovables de Argentina, las cuales no serán especificados sus nombres por motivos de confidencialidad. Uno fue de la “organización 1”, en septiembre de 2020, con una cotización de 74.000 USD. El mismo no incluyó la obra civil, en caso de que el terreno no soporte el peso de los equipos. Siendo los principales, un biodigestor de domo de acero de 3m de radio y 3 m de altura, con un domo de membrana. Una cámara de premezcla, dos bombas (3HP y 6HP), una para recirculación de lodos y otra para carga respectivamente, un sistema de agitación (con hélices y 5HP de potencia) y otro de calefacción con serpentina interna, con sus respectivas conexiones eléctricas. También especifica los diferentes cañerías y accesorios de PVC, sistemas de válvulas requeridos y una caldera para que sea calefaccionada con biogás. Por último, un sistema de control sobre nivel y un filtro de Sulfuro de Hidrógeno (H<sub>2</sub>S). Todo esto incluyendo el flete al lugar de montaje de Rosario, Santa Fe a Mendoza, como así también el montaje, la instalación y la puesta en marcha.

Otro presupuesto fue el de “organización 2” en el año 2020, la cual cotizó un biodigestor primario mesofílico de mezcla completa con sistema de agitación y manejo de temperatura por recirculación con intercambiador de calor (energía solar). Éste último tipo Heat Pipe (20 tubos), con controladores de procesos y tanques de asistencia con resistencia eléctrica. También, con un tanque de precarga de 1000 l (con una trituradora), una cámara de premezcla y un gasómetro de 5 m<sup>3</sup>. Añadiendo un tablero de control de procesos con sus respectivos sensores (temperatura, presión, niveles), y un grupo electrógeno para combustionar el biogás y generar energía eléctrica. Además, bombas de cargas y descarga de 3 HP. Todos estos equipos, conectados con sus respectivas tuberías y válvulas de seguridad, junto con su instalación y puesta en marcha, suman un total de 123.800 USD sin IVA incluido. A esto falta sumarle el correspondiente traslado de los equipos desde Buenos Aires a la provincia de Mendoza.

Por último, la “organización 3” presentó un presupuesto en Julio del año 2020. Para un biodigestor de 6,51 m de diámetro, y 3 de altura, con el volumen total de 100 m<sup>3</sup> requerido. Con equipos tales como tres bombas (5 Hp, 2 Hp y 3 Hp), un agitador sumergible de 5,5 Hp, intercambiador de calor de 23.500 kcal/h, un motogenerador eléctrico. Con todas las conexiones necesarias con PVC y PEAD. Contando con un sistema de intercambiador de calor tipo tubo-tubo, una cámara de premezcla de 1000 l y una de descarga de 20.000 l y un sistema de control de nivel. Esta compañía presupuestó 93.847 USD, contemplando flete hasta el lugar desde Entre Ríos, montaje y puesta en marcha. Este presupuesto no tuvo en cuenta los estudios de suelo necesarios, conexiones de agua y tendidos eléctricos pertinentes. Todos estos valores sin incluir IVA correspondiente, y con la posibilidad de adicionar opcionalmente una antorcha para quemar biogás, con un valor de 12.000 USD (sin IVA incluido).

#### 3.4.4.2 ¿Es factible dicha inversión para una microcervecería?

Debido a lo expuesto, la inversión que debería realizar el productor local de la cervecería analizada, estará en el orden de los 100.000 USD. Valor muy por arriba del dinero que podría destinar un productor de cerveza artesanal con un esquema productivo similar al detallado. Esto es así, debido a que además de los costos de inversión detallados,

esta planta implicará costos de operación de diferente índole (directos, indirectos, fijos y variables)

. Donde se tendrán que tener en cuenta la adición de costos de servicios tales como agua y electricidad adicionales de la planta. Costo de los materiales auxiliares (elementos de oficina, material de seguridad y de limpieza), que suele ser de un valor de 0,2 a 1 % del total de inversión, según E.Díaz en Gonzalez (2020), unos 600 USD/año para este caso, tomando el valor medio del porcentaje. También, el mantenimiento de la misma (revisiones, reparaciones y sustituciones de piezas) con costes que varían del 2-10% del total de la inversión (Gonzalez, 2020), unos 6.000 USD/año aplicando la misma metodología. Personal, junto con sus respectivos operarios para la operación de la planta de biogás. Esto podría ser realizado por el personal con el que ya cuenta esta cervecía (dueño y un operario). Además tiene que considerarse los impuestos y tasas por el mismo funcionamiento de la organización, estimado en un 1% del total de la inversión según Alexander (2013) en Gonzalez (2020), este último con un valor de unos 1000 USD/año. Por último, también se debe tener en cuenta los seguros contratados, lo que se estima en un 0,5% del costo total físico de la planta, unos 500 USD/año.

El beneficio económico que tendrá la cervecía analizada estará dado por un valor 17,7 % menos de utilización de GLP de forma anual. Sabiendo que realiza 117 cocciones por año y que en cada cocción utiliza 45 kg de GLP y que a su vez, se utiliza 1 tubo de GLP por cada 8 cocciones (360 kg). Entonces tenemos que por año la cervecía compra un promedio de 14,6 tubos, y con el reemplazo energético por biogás, comprará 2,6 tubos menos al año. Según datos recabados el 18 de Junio de 2019, el productor estaba abonando un precio final de 16.951 AR\$ por cada tubo, pasado al dólar oficial de ese periodo (44,5 AR\$ por USD), el precio es de 381 USD la unidad. Es decir, por año, el ahorro sería sólo de 990,6 USD debido al reemplazo energético realizado. Podría pensarse también en la venta del biol producido por la planta, pero los resultados en cuanto a la fitotoxicidad dados por el ensayo de semilla no fueron muy favorables. Es preciso aclarar también, que el productor deberá adquirir el cosustrato de "Estiercol de Gallina de Corral" para poder biodigerir el bagazo de cerveza, y esto representará un costo adicional para el mismo.

Es por eso que a partir de este análisis, se determina la baja factibilidad en cuanto a una microcervecía de llevar a cabo una planta de tales dimensiones. Gonzalez (2020) realiza un estudio muy similar, pero analizando una cervecía "Antares" en Mar del Plata con un esquema productivo mucho mayor, de 3 millones de litros anuales. Con un predio de 21 mil m<sup>2</sup> de los cuales 8 mil m<sup>2</sup>, están cubiertos. La misma propone llevar a cabo un sistema de biodigestión de 2 etapas, con un reactor de digestión anaerobia de estados sólidos (SS-AD) de 257 m<sup>3</sup> y en la otra etapa, un reactor de tipo UASB de 531 m<sup>3</sup> con un gasómetro aparte de 166 m<sup>3</sup>. A pesar de que esto conlleva una inversión considerable, según el análisis de sensibilidad económico que lleva a cabo, en 7 años es rentable implementar este proyecto de gran magnitud.

## 4 CONCLUSIONES

A partir de los estudios realizados se observa que al tener el bagazo de cerveza una estructura compleja, poder realizar un proceso de biodigestión de forma completa, se presenta como todo un desafío. Pero es de suma importancia encontrar una solución a esto, ya que se generan grandes cantidades de residuos de este producto debido a la industria cervecera que se encuentra cada vez en mayor crecimiento.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos y su discusión, podría decirse que la biometanización es más propicia realizarla con inóculo de gallina ponedora antes que con inóculo porcino, ya que a pesar de tener potenciales de biometanización prácticamente iguales, de 80 ml de biogás/g de ST, el biol obtenido con inóculo aviar al 10% de dilución en agua, resultó poseer una fitotoxicidad moderada. Mientras que los otros bioles, en las demás diluciones, resultaron poseer toxicidades altas.

La cervecería artesanal analizada como caso de estudio, con esta tecnología podría lograr el tratamiento de la totalidad del bagazo producido y abastecer su demanda energética anual en un 17,7 %. Reemplazando parte de la energía de tipo convencional que utiliza actualmente (GLP) por una de tipo renovable, produciendo una disminución de 2876,2 kg de CO<sub>2EQ</sub> de forma anual. Pero esto se ve limitado a la hora de llevar a cabo la construcción de una planta que lo permita, ya que las dimensiones son considerablemente grandes, asemejándose más a una planta de biogás que podría tener una gran industria, que cuente con el capital necesario para llevar a cabo dicha inversión. Resultando esta última en un balance económico inicial muy negativo. Además, se tiene que considerar el gran espacio que se requiere para la misma, y también, que el productor deberá contar con un proveedor de estiércol de gallina para poder utilizarlo como cosustrato.

Por los resultados presentes en este estudio, se puede decir que el tratamiento del bagazo de cerveza mediante biodigestión en cervecerías locales de tipo artesanal con esquema productivos similares al presentado, tendría grandes beneficios ambientales, sobre todo por la gran disminución de gases GEI que se llevaría a cabo y el tratamiento de del total del bagazo producido. Pero esto se ve limitado en cuanto a la inversión que debería llevarse a cabo, la cual es muy alta para un productor de cerveza artesanal.

Por todo esto, se concluye que el tratamiento que actualmente lleva a cabo el productor cervecero (el cual destina el bagazo a un productor porcino para su alimentación) debe mantenerse, debido a que a pesar de que no obtenga rindes de tipo económicos por esto, el bagazo está siendo tratado y utilizado como un producto útil.

## 5 BIBLIOGRAFÍA

- Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca. (2019). Alimentos y bebidas: Una llave maestra. *Alimentos argentinos*(76). Obtenido de [http://www.alimentosargentinos.gob.ar/HomeAlimentos/Publicaciones/Revista/AA\\_76.pdf](http://www.alimentosargentinos.gob.ar/HomeAlimentos/Publicaciones/Revista/AA_76.pdf)
- AEDES. (2006). *Manual de Elaboración de Abono Foliar Biol.* Arequipa.
- Aguilera, E. A. (2017). Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos. *FAREM-Esteli. Medio ambiente, tecnología y desarrollo humano*. Obtenido de <https://www.camjol.info/index.php/FAREM/article/view/5552>
- Aguilera; Castellón. (2019). Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de las excretas de ganado, caballo, cerdo y gallinaza para la generación de biogás. *Medio Ambiente, Tecnología y Desarrollo humano*(31). Obtenido de <https://lamjol.info/index.php/FAREM/article/download/8474/8666?inline=1>
- Alvino, Guillén, Saa Pérez. (2019). ANALISIS DE PURINES DE 3 SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN DE CERDOS DE ENGORDE O CEBA EN EL CANTÓN PEDRO CARBO E ISIDRO AYORA DE LA PROVINCIA DEL GUAYAS. *DELOS*, 12(34). Obtenido de <https://www.eumed.net/rev/delos/34/explotacion-porcina-guayas.pdf>
- Aparcana Robles, Jansen. (2008). *Estudio sobre el valor fertilizante de los productos del proceso "Fermentación anaeróbica" para producción de Biogás*. Perú: German ProfECGmbH. Obtenido de [http://www.german-profec.com/cms/upload/Reports/Estudio%20sobre%20el%20Valor%20Fertilizante%20de%20los%20Productos%20del%20Proceso%20Fermentacion%20Anaerobica%20para%20Produccion%20de%20Biogas\\_ntz.pdf](http://www.german-profec.com/cms/upload/Reports/Estudio%20sobre%20el%20Valor%20Fertilizante%20de%20los%20Productos%20del%20Proceso%20Fermentacion%20Anaerobica%20para%20Produccion%20de%20Biogas_ntz.pdf)
- APHA. (1997). *SOLIDS*. Obtenido de [https://edgeanalytical.com/wp-content/uploads/Inorganic\\_SM2540.pdf](https://edgeanalytical.com/wp-content/uploads/Inorganic_SM2540.pdf)
- Argentina Gobierno. (s.f.). *Argentina.gob.ar*. Obtenido de <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/bosques/convencion-internacional#:~:text=La%20Rep%C3%ABlica%20Argentina%20ha%20suscripto,%C3%A1ridas%20y%20subh%C3%BAmedas%20secas>
- Arieta. (2016). *DISEÑO DE UN BIODIGESTOR DOMÉSTICO PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DEL ESTIÉRCOL DE GANADO*. Tesis de pregrado en Ingeniería Mecánico-Eléctrica, Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería., Piura, Perú. Obtenido de <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/2575>
- Balestrini et Al. (27 de Diciembre de 2006). *InfoLEG*. Obtenido de Ministerio de Justicia y Derechos Humanos: <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/120000-124999/123565/norma.htm>
- Balestrini, Pampuro, Hidalgo, Estrada. (6 de Diciembre de 2006). *Infoleg*. Obtenido de Ministerio de Justicia y Derechos Humanos: <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/120000-124999/123565/norma.htm>
- Balestrini, Scioli, Hidalgo y Estrada. (19 de Abril de 2006). *InfoLEG*. Obtenido de <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/115000-119999/116299/norma.htm>

- Barbaro, Karlanian, Mata. (2014). *Importancia del pH y de la Conductividad Eléctrica en los sustratos para las plantas*. Obtenido de [https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta\\_-\\_importancia\\_del\\_ph\\_y\\_la\\_conductividad\\_elctrica.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_-_importancia_del_ph_y_la_conductividad_elctrica.pdf)
- Barrera. (2011). La diversificación de la matriz energética. *Voces en el fénix: Últimantum a la tierra*, 2(10).
- Bongiovanni ,Marzari ,Amín. (2018). *Uso de digestato como biofertilizante derivado de la generación de biogás*. Tucumán. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/328228615\\_Uso\\_como\\_bioferlizante\\_de\\_digestato\\_derivado\\_de\\_la\\_generacion\\_de\\_biogas](https://www.researchgate.net/publication/328228615_Uso_como_bioferlizante_de_digestato_derivado_de_la_generacion_de_biogas)
- Boudou et al. (15 de Octubre de 2015). *InfoLEG*. Obtenido de Ministerio de Justicia y Derechos Humanos: <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/250000-254999/253626/norma.htm>
- Boudou, Dominguez, Estrada, Chedrese. (23 de Septiembre de 2015). *Infoleg*. Obtenido de <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/250000-254999/253626/norma.htm>
- Bougrier, C. (2018). Anaerobic digestion of Brewery Spent Grains: Trace elements addition requirement. *Bioresource Technology*, 1193-1196. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852417315250>
- Carhuancho León. (2012). *APROVECHAMIENTO DEL ESTIÉRCOL DE GALLINA PARA LA ELABORACIÓN DE BIOL EN BIODIGESTORES TIPO BATCH COMO PROPUESTA AL MANEJO DE RESIDUO AVÍCOLA*. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima. Obtenido de <http://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2013/01/16.pdf>
- Caro, R. R. (2018). <https://slideplayer.es/slide/11829107/>. Obtenido de <https://slideplayer.es/slide/11829107/>
- Castañeda,Céspedes, Madrigal. (2016). Emisión de gases de efecto invernadero por uso combustibles fósiles en Ibagué, Tolima (Colombia). *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 103-112. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/ccta/v18n1/v18n1a06.pdf>
- Castelao Caruana, M. E. (2019). La energía renovable en Argentina como estrategia de política energética e industrial. *Problemas del desarrollo*, 50(197). Obtenido de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0301-70362019000200131](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0301-70362019000200131)
- Cater et Al. (2015). Biogas production from brewery spent grain enhanced by bioaugmentation with hydrolytic anaerobic bacteria. *Bioresource technology*, 261-269. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/273888273\\_Biogas\\_Production\\_from\\_Brewery\\_Spent\\_Grain\\_Enhanced\\_by\\_Bioaugmentation\\_with\\_Hydrolytic\\_Anaerobic\\_Bacteria](https://www.researchgate.net/publication/273888273_Biogas_Production_from_Brewery_Spent_Grain_Enhanced_by_Bioaugmentation_with_Hydrolytic_Anaerobic_Bacteria)
- Cervecería Huáscar. (S.N). *Cerveza Huáscar*. Obtenido de <https://cervezahuascar.wordpress.com/acerca-de/>
- Come. (1970). Les obstacles a la germination. (M. e. editeurs., Ed.) Obtenido de [https://www.persee.fr/doc/linly\\_0366-1326\\_1971\\_num\\_40\\_7\\_13959\\_t2\\_0108\\_0000\\_2#:~:text=franglais%20par%20D.-,Come.,est%20parfois%20un%20obstacle%20majeur](https://www.persee.fr/doc/linly_0366-1326_1971_num_40_7_13959_t2_0108_0000_2#:~:text=franglais%20par%20D.-,Come.,est%20parfois%20un%20obstacle%20majeur)
- Cornejo Arteaga. (s.f.). *Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*. Obtenido de <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa3/n8/m9.html#:~:text=Descarboxilaci%C3%B>

3n%20de%20los%20radicales%20carboxilato, mediante%20la%20reacci%C3%B3n%20de%20Hunsdiecker.

- Cristof Holliger et al. (14 de Diciembre de 2016). Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water, Science and Technology*, 74. Obtenido de <https://iwaponline.com/wst/article/74/11/2515/18930/Towards-a-standardization-of-biomethane-potential>
- Deublein; Steinhauser. (2008). *Biogas from Waste and Renewable Sources*. Weinheim: WILEY-VCH.
- Devesa, L. R. (2014). *Obtención de biogás a partir de codigestión anaerobia de microalgas y fangos de EDAR*. Barcelona. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/22006/PFCfinalLara.pdf>
- D'Imporzano, G. (2007). The contribution of water soluble and water insoluble organic fraction to oxygen uptake rate during high composting. *Biodegradation.*, 18, 103-113. Obtenido de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16477349/>
- EPE. (2010). *Protocolo para la cuantificación de gases de efecto invernadero en actividades de gestión de residuos*. Paris. Obtenido de <https://asegre.com/wp-content/uploads/2017/06/Documento-Protocolo.pdf>
- Escuela Politécnica Nacional. (s.f.). *PODER CALORÍFICO DEL GAS LICUADO DE PETRÓLEO*. Quito.
- Facultad de Ciencias Agrarias. (2009). *Análisis físicos y químicos de la muestra a digerir*. Mendoza.
- FAO. (2008). *Biocombustibles: perspectivas, riesgos y oportunidades*. Roma. Obtenido de <https://www.fao.org/publications/card/en/c/5e4052d8-1130-5756-9da6-f6e52a3995cb/>
- FAO. (2019). *GUÍA TEÓRICO-PRÁCTICA SOBRE EL BIOGÁS Y LOS BIODIGESTORES*. Buenos Aires. Obtenido de <http://www.fao.org/publications/card/es/c/CA5082ES/>
- FAO. (2022). *Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Obtenido de [https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/#:~:text=La%20Capacidad%20de%20Intercambio%20Cati%C3%B3nico,K%2C%20NH4%20etc.\)](https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/#:~:text=La%20Capacidad%20de%20Intercambio%20Cati%C3%B3nico,K%2C%20NH4%20etc.))
- Gerardi, M. H. (2003). *The Microbiology of Anaerobic Digesters*. New Jersey: Wiley Interscience.
- Gobierno de Navarra. (s.f). *Registro de valores y fuentes contaminantes- PRTR*. Navarra. Obtenido de <https://www.navarra.es/NR/rdonlyres/E2575175-56E9-48E5-A44F-7718B5DA5DED/440514/Factoresdeemision2018.pdf>
- GOICOA. (2014). *RELEVAMIENTO NACIONAL DE PLANTAS DE BIOGÁS*. San Luis. Obtenido de <https://inta.gov.ar/documentos/relevamiento-nacional-de-plantas-de-biogas>
- Gonzalez. (2008). *"MARKETING DE GUERRA" IMPLEMENTADO POR LA INDUSTRIA DE LA CERVEZA ARGENTINA*. Buenos Aires: Facultad de Agronomía. Obtenido de <https://1library.co/document/q0p267xz-marketing-de-guerra-implementado-por-industria-cervecera-argentina.html>
- Gonzalez. (2019). *Mendoza: presentan proyecto de incentivo a la producción de cerveza artesanal en Godoy Cruz*. Obtenido de Mundo Cerveza: <https://www.mundocerveza.com/mendoza-presentan-proyecto-de-incentivo-a-la-produccion-de-cerveza-artesanal-en-godoy-cruz/>

- Gonzalez. (2020). *Biogas a partir de bagazo de cerveza*. Facultad de Ingeniería, Mar del Plata. Obtenido de [http://rinfi.fi.mdp.edu.ar/bitstream/handle/123456789/476/BNGonzalez-TFG\\_IQ-2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://rinfi.fi.mdp.edu.ar/bitstream/handle/123456789/476/BNGonzalez-TFG_IQ-2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Gonzalez, Gaza, Urueña. (2007). *Diseño y estudio económico preliminar de una planta productora de biogás utilizando residuos orgánicos de ganado vacuno*. Bogotá: Ingeniería e Investigación. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/643/64327316.pdf>
- Gonzalez-Sánchez et al. (2015). Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia. *Revista argentina de microbiología*. Obtenido de [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0325-75412015000300010#ref](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0325-75412015000300010#ref)
- Gutiérrez, E. E. (2019). *Proyección de la producción de biogás y biofertilizante orgánico a partir de efluentes agroindustriales en biodigestores anaerobios*. Hermosillo.
- Hilbert. (2006). *Manual para la producción de biogás*. Buenos Aires: INTA. Obtenido de [https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manual\\_para\\_la\\_produccion\\_de\\_biogs\\_del\\_iir.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manual_para_la_produccion_de_biogs_del_iir.pdf)
- Homebiogas. (S.N). *TG1B0 SISTEMA DE BIOGÁS TAMAÑO FAMILIAR*.
- IPCC. (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. Francia.
- Lastra; Nougues. (2016). *Plan de negocios: producción y venta de cerveza artesanal. Trabajo final de ingeniería industrial*. Obtenido de <https://repositorio.uca.edu.ar/bitstream/123456789/483/1/plan-produccion-venta-cerveza-artesanal.pdf>
- Ledesma Abdala de Zamora et Al. (4 de Agosto de 2021). *Argentina.gob.ar*. Obtenido de <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-27640-352587/texto>
- León, F. M. (2012). *APROVECHAMIENTO DEL ESTIÉRCOL DE GALLINA PARA LA ELABORACION DE BIOL EN BIODIGESTORES TIPO BATCH COMO PROPUESTA AL MANEJO DEL RESIDUO AGRICOLA*. Lima. Obtenido de <http://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2013/01/16.pdf>
- Lucero, C. (11 de Marzo de 2019). La provincia presentó un proyecto para que los cerveceros artesanales transformen sus residuos en energía. *El departamental*. Obtenido de <https://eldepartamental.com/contenido/935/la-provincia-presento-un-proyecto-para-que-los-cerveceros-artesanales-transforme>
- Mainardis et Al. (2019). Techno-economic analysis of anaerobic digestion implementation in small Italian breweries and evaluation of biochar and granular activated carbon addition effect on methane yield. *Environmental Chemical Engineering*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343719303070>
- Manrique, S. M. (2015). *BIOMASA con fines energéticos*. Buenos Aires: edUTecNe. Obtenido de [http://www.edutecne.utn.edu.ar/biomasa\\_con\\_fines\\_energeticos/biomasa\\_info.html](http://www.edutecne.utn.edu.ar/biomasa_con_fines_energeticos/biomasa_info.html)
- Martí-Herrero, Cipriano. (2012). Design methodology for low cost tubular digesters. *Bioresourc Technology*, 21-27. Obtenido de [https://www.scipedia.com/public/Marti-Herrero\\_Cipriano\\_2012a](https://www.scipedia.com/public/Marti-Herrero_Cipriano_2012a)

- Martina P. et al. (S.N). *PROPUESTA DE UN MÉTODO EXPERIMENTAL ALTERNATIVO PARA LA DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO DEL BIOGÁS*. Facultad de Ingeniería - UNNE, Resistencia - Chaco. Obtenido de <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/88667>
- Martinez. (2020). *Producción de harina de bagazo a partir de un residuo de la industria cervecera*. Universidad Nacional de Córdoba, Ciudad de Córdoba. Obtenido de <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/17114>
- Masse, D. (Noviembre de 2007). The fate of crop nutrient during digestion swine manure in psychrophilic anaerobic sequencing batch reactor. *Bioresourc technology.*, 98, 2819-2823. Obtenido de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17400445/>
- Medina, Quipuzco, Juscamaita. (2014). *EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE BIOL DE SEGUNDA GENERACIÓN DE ESTIÉRCOL DE OVINO PRODUCIDO A TRAVÉS DE BIODIGESTORES*. Lima: Anales científicos. Obtenido de <https://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/acu/article/view/772>
- Mendizabal. (2003). *Evaluación del efecto de biol, bioactivos y fertilización potásica en el rendimiento y calidad del maíz morado*. UNALM., Lima. Obtenido de <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/952/T007370.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Meteored.* (s.f.). Obtenido de [https://www.meteored.com.ar/tiempo-en\\_Mendoza-America+Sur-Argentina-Mendoza-SAME-sactual-16887.html#:~:text=Temperatura%20M%C3%ADnima%20%2D4%20%C2%B0C,Presi%C3%B3n%20m%C3%A1xima%201034%20hPa](https://www.meteored.com.ar/tiempo-en_Mendoza-America+Sur-Argentina-Mendoza-SAME-sactual-16887.html#:~:text=Temperatura%20M%C3%ADnima%20%2D4%20%C2%B0C,Presi%C3%B3n%20m%C3%A1xima%201034%20hPa)
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. (s.f.). *BAGAZO DE CERVEZA*. Obtenido de <http://www.alimentosargentinos.gob.ar/HomeAlimentos/Nutricion/documentos/TendenciaBagazo.pdf>
- Ministerio de Economía. (s.f.). *Argentina.gob.ar*. Obtenido de <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/hidrocarburos/gas-licuado-de-petroleo>
- Ministerio de Economía. (s.f.). *Eficiencia Energética*. Obtenido de Etiqueta vehicular: [https://www.toyota.com.ar/storage/config/Informaci%C3%B3n%20de%20consumo\\_Hilux.pdf-f-XMGiH4cjDV.pdf](https://www.toyota.com.ar/storage/config/Informaci%C3%B3n%20de%20consumo_Hilux.pdf-f-XMGiH4cjDV.pdf)
- Ministerio de Energía . (2012). *Genera tu propia energía*. Obtenido de [https://autoconsumo.minenergia.cl/?page\\_id=524](https://autoconsumo.minenergia.cl/?page_id=524)
- Molina Tirado et Al. (2016). *DETERMINACIÓN A ESCALA LABORATORIO DE LA RELACIÓN SUSTRATO-INOCULO EN LA BIODIGESTIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS EN LA UNIVERSIDAD DE EAFIT*. Medellín, Colombia. Obtenido de <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/993>
- Muñoz, G. (2012). *DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO DE UN BIODIGESTOR TUBULAR. CARAZO - NICARAGUA*. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/30046846.pdf>
- Mussato, S. I. (2013). *Brewer's spent grain: a valuable feedstock for industrial applications*. sci. Obtenido de <https://www.semanticscholar.org/paper/Brewer%27s-spent-grain%3A-a-valuable-feedstock-for-Mussatto/3158bc774d867567054bc6b17b5cb4c7e1dec819>
- Mussatto et al. (2004). *Brewers' spent grain: generation, characteristics and potential applications*. *Journal of Cereal Science*, 1-14. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0733521005000706>

- Naciones Unidas. (s.f.). *Objetivos Desarrollo Sostenible*. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- Orgena, N. M. (2006). *El Sistema Agroalimentario Localizado de la cerveza artesanal de San Carlos de Bariloche, Argentina*. Florida, USA.
- Osinermin. (2012). *El Gas Natural y sus diferencias con el GLP*. Obtenido de <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/hm000661.pdf>
- Panjicko et al. (2017). Biogas production from brewers spend grain as a mono-substrate in a two stage process composed of solid-state anaerobic digestion and granular biomass reactors. *Journal of Cleaner Production*, 519-529. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652617316529>
- Pantoja. (2020). *Determinación del mejor tratamiento de la mezcla de harina de bagazo de cebada de malta con harina de trigo para la aplicación en productos panificados*. Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales. Obtenido de <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/10119/2/03%20EIA%20497%20TRABAJO%20DE%20GRADO.pdf>
- Pedraza, M. M. (S.N). "VALORIZACIÓN DEL BAGAZO DE MALTA PARA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE DIGESTIÓN ANAEROBIA Y COMPARACIÓN CON SU DIGESTATO PARA CULTIVO DE *PLEUROTUS OSTREATUS*". Toluca, Méjico. Obtenido de [https://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/109983/Tesis%20definitiva%20Marlem\\_publico.pdf?sequence=4&isAllowed=y](https://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/109983/Tesis%20definitiva%20Marlem_publico.pdf?sequence=4&isAllowed=y)
- Pierri et Al. (30 de Diciembre de 1993). *InfoLEG*. Obtenido de Ministerio de Justicia y Derechos Humanos: <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/0-4999/699/norma.htm>
- Pierri et al. (18 de Octubre de 1996). *InfoLEG*. Obtenido de Ministerio de Justicia y Derechos Humanos: <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/35000-39999/39912/norma.htm#:~:text=Ley%2024701%20sancionada%20el%2025%2F9%2F96&text=Apru%C3%A9base%20la%20Convenci%C3%B3n%20de%20las,Hecho%3A%20Octubre%2018%20de%201996.>
- Pierri et Al. (25 de Septiembre de 1996). *InfoLEG*. Obtenido de <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/35000-39999/39912/norma.htm>
- Pierri et Al. (18 de Octubre de 1996). *InfoLEG*. Obtenido de Ministerio de Justicia y Derechos Humanos: <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/35000-39999/39912/norma.htm>
- Planas, O. (13 de Abril de 2018). *Energía solar*. Obtenido de <https://solar-energia.net/energias-no-renovables/bicombustibles/generaciones>
- Quintana et al. (2007). RESISTENCIA MECÁNICA EVALUADA EN EL ENSAYO MARSHALL DE MEZCLAS DENSAS EN CALIENTE ELABORADAS CON ASFALTOS MODIFICADOS CON DESECHOS DE POLICLORURO DE VINILO (PVC), POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (PEAD) Y POLIESTIRENO (PS). *Ingenierías*, 6(11). Obtenido de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1692-33242007000200007](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-33242007000200007)
- RAAA. (2004). *Produzcamos biol, abono foliar orgánico, Lima, Perú*.
- Rios, S. (2018). *DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA VALORIZACIÓN DE ÁCIDOS GRASOS VOLÁTILES PROCEDENTES DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DE LA BIOMASA*. Universidad Politécnica de

- Valencia, Valencia. Obtenido de [https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/109877/74369449F\\_TFM\\_1536856699180341571266125644.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=En%20la%20digesti%C3%B3n%20a%C3%B3n%20de,butt%C3%ADrico%20y%20el%20%C3%A1cido%20val%C3%A9rico](https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/109877/74369449F_TFM_1536856699180341571266125644.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=En%20la%20digesti%C3%B3n%20a%C3%B3n%20de,butt%C3%ADrico%20y%20el%20%C3%A1cido%20val%C3%A9rico)
- Rizzo, P. F. (2009). *Análisis integral para el manejo del guano de aves ponedoras: caracterización, bioestabilización y valorización de los productos generados*. Buenos Aires. Obtenido de <http://ri.agro.uba.ar/files/download/tesis/doctorado/2020rizzopedrofederico.pdf>
- Ronco et Al. (2004). *ENSAYOS TOXICOLÓGICOS Y MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE CALIDAD DE AGUAS*. (G. C. Morales, Ed.) Mexico: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Obtenido de [https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/25000/mod\\_resource/content/1/toxicidad%20bioensayos%20idrc.pdf](https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/25000/mod_resource/content/1/toxicidad%20bioensayos%20idrc.pdf)
- Ronco, Baez y Granados. (2004). *Capítulo 1: Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas*. Mexico: Gabriela Castillo Morales.
- Saullo, Passo, Maydana. (2018). *ELABORACIÓN ARTESANAL DE CERVEZA*. XLI CONGRESO ARGENTINO DE PROFESORES UNIVERSITARIO DE COSTOS, Río Cuarto. Obtenido de [file:///C:/Users/ALEJANDRO/Documents/FCA/5to/Tesis/Tesis\\_ultima/saullo-paso-maidana.pdf](file:///C:/Users/ALEJANDRO/Documents/FCA/5to/Tesis/Tesis_ultima/saullo-paso-maidana.pdf)
- Secretaría de Agroindustria. (2019). *Caracterización físico química del guano de gallinas ponedoras de granjas del noreste de la provincia de Buenos Aires*. Buenos Aires. Obtenido de [https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/aves/informes/otros/\\_archivos//190430\\_Valor%20Agronomico%20Guano%20gallina%202019.pdf](https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/aves/informes/otros/_archivos//190430_Valor%20Agronomico%20Guano%20gallina%202019.pdf)
- Secretaría de Gobierno de Ambiente y Desarrollo Sustentable. (22 de Enero de 2019). *Argentina, Energías Renovables*. Obtenido de [https://www.ecofield.net/Legales/Electricidad/res19-19\\_SAyDS.htm](https://www.ecofield.net/Legales/Electricidad/res19-19_SAyDS.htm)
- Sobrero; Ronco. (2004). *Ensayo de toxicidad aguda con semillas de lechuga Lactuca sativa L*. Mexico: Castillo Morales, Gabriela. Obtenido de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/573/cap4.pdf>
- Solano, Vargas y Watson. (2010). Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. *Tecnología en marcha*, 39-46. Obtenido de <file:///C:/Users/ALEJANDRO/Documents/FCA/5to/Tesis/biblio/Dialnet-Biodigestores-4835857.pdf>
- Steinmetz, R. L. (2019). Expresión de resultados de laboratorio: ¿Cómo medir el volumen de biogás? *RedBioLAC*, 27-28. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/431755673/Revista-RedBioLAC-2019>
- Varnero et Al. (2007). ÍNDICES DE FITOTOXICIDAD EN RESIDUOS ORGÁNICOS DURANTE EL COMPOSTAJE. *Ciencia de suelo y nutrición vegetal*, 28-37. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/268516946\\_Indices\\_de\\_fitotoxicidad\\_en\\_residuos\\_organicos\\_durante\\_el\\_compostaje](https://www.researchgate.net/publication/268516946_Indices_de_fitotoxicidad_en_residuos_organicos_durante_el_compostaje)
- Varnero, M. T. (2011). *Manual de biogás*. Santiago de Chile: Proyecto CHI/00/G32. Obtenido de <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- VDI. (2006). *VDI4630*.

- Venandy, C. A. (2012). *Producción de biogás a partir del bagazo cervecero*. Santiago de Chile. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/114955>
- Villanueva, Tovar. (2020). BAGAZO DE MALTA (BSG): BIORRESIDUO CON POTENCIAL APLICACIÓN A NIVEL FUNCIONAL, MATERIAL Y ENERGÉTICO. *19*(1,2021). Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7999816.pdf>
- Winkelman, Colino, Civitaresi. (2019). El Sistema Agroalimentario Localizado de la cerveza artesanal de San Carlos de Bariloche, Argentina. *RIVAR*, 34-58. Obtenido de [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0719-49942019000300034&script=sci\\_arttext&tIng=n](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0719-49942019000300034&script=sci_arttext&tIng=n)
- Zabaleta, Viera y Aldana. (2017). DISEÑO DE UN BIODIGESTOR TUBULAR PARA ZONAS RURALES DE LA REGIÓN PIURA. *XXIV Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente (XXIV- SPES)*, (págs. 13-17). Huaraz. Obtenido de [http://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2017/12/Garcia-Rafael\\_biodigestor.pdf](http://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2017/12/Garcia-Rafael_biodigestor.pdf)

## 6 ANEXOS

### 6.1 Anexo 1: Fitotoxicidad

Las Tablas 16,17,18 y 19 a continuación muestran los resultados de las diluciones que efectivamente tuvieron germinación, ya que las concentraciones máximas de 100% tanto para (B+C) como para (B+G), como así también las de 50%, no presentaron crecimiento radical.

Tabla 16: Cantidad germinada y longitud de radícula e hipocótilo de control.

Tratamiento	Repetición	Detalle	Cantidad germinada															
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Control	1	Hipocotilo (mm)	14	17	15	16	19	14	18	18	12	15	11	16	15	14	13	15
		Radícula (mm)	7	17	9	10	10	12	15	16	15	8	11	10	16	10	10	6
	2	Hipocotilo (mm)	18	17	12	16	12	10	15	12	14	16	12	3	3	3	0	0
		Radícula (mm)	16	15	10	11	10	17	11	6	5	12	13	4	4	2	4	1
	3	Hipocotilo (mm)	17	15	11	12	14	13	12	14	15	10	9	2	4	2	0	
		Radícula (mm)	12	11	11	12	8	9	9	10	10	14	12	7	5	2	1	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17: Cantidad germinada y longitud de radícula e hipocótilo de control B+C (10%).

Tratamiento	Repetición	Detalle	Cantidad germinada			
			1	2	3	4
B+C (10%)	1	Hipocotilo (mm)	0			
		Radícula (mm)	1			
	2	Hipocotilo (mm)	2			
		Radícula (mm)	1			
	3	Hipocotilo (mm)	0	0		
		Radícula (mm)	1	3		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18: Cantidad germinada y longitud de radícula e hipocótilo de control de B+C (5%).

Tratamiento	Repetición	Detalle	Cantidad germinada						
			1	2	3	4	5	6	7
B+C (5%)	1	Hipocotilo (mm)	1	0	0	0	0	1	
		Radícula (mm)	1	1	1	1	1	1	
	2	Hipocotilo (mm)	3	2	1	0	0	2	0
		Radícula (mm)	4	3	1	1	1	2	1
	3	Hipocotilo (mm)	0	0	0				
		Radícula (mm)	1	1	1				

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19: Cantidad germinada y longitud de radícula e hipocótilo de control de B+G (10%).

Tratamiento	Repetición	Detalle	Cantidad germinada													
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
B+G (10%)	1	Hipocotilo (mm)	11	15	14	11	9	15	14	15	16	12	11	9	5	5
		Radícula (mm)	5	10	10	13	12	12	10	10	13	13	10	0	0	4
	2	Hipocotilo (mm)	20	22	17	16	10	7	7	12	5	11				
		Radícula (mm)	13	12	10	15	8	9	7	2	2	5				
	3	Hipocotilo (mm)	9	12	11	13	9	16	11	13	11	13	4	3	2	
		Radícula (mm)	15	7	15	22	10	10	15	17	17	9	0	0	0	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20: Cantidad germinada y longitud de radícula e hipocótilo de control B+G (5%).

Tratamiento	Repetición	Detalle	Cantidad germinada														
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
B+G (5%)	1	Hipocotilo (mm)	14	10	9	10	9	5	13	7	5	3	5	2	3		
		Radícula (mm)	3	2	2	2	2	2	2	4	2	2	1	1	1		
	2	Hipocotilo (mm)	9	10	13	10	10	5	10	6	9	2	0	1	1	2	3
		Radícula (mm)	6	3	5	5	3	2	3	2	2	0	2	2	0	1	1
	3	Hipocotilo (mm)	10	11	13	15	17	9	7	2	1	1					
		Radícula (mm)	5	3	3	3	1	3	4	1	1	1					

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21: Porcentaje de Germinación relativo GR (%), Largo de la Radícula Relativo ER (%) y Porcentaje de Germinación IG (%) de los bioles resultantes de los tratamientos B+C (%) y B+G (%) a diferentes concentraciones (5%, 10%, 50% 100%).

	REPETICION	(GR%)	Media (%)	ER (%)	Media (%)	IG (%)
<b>B+C (10%)</b>	1	6,4	<b>8,5</b>	10,3	<b>13,8</b>	<b>1,2</b>
	2	6,4		10,3		
	3	12,8		20,7		
<b>B+C (5%)</b>	1	38,3	<b>34,0</b>	10,3	<b>13,3</b>	<b>4,5</b>
	2	44,7		19,2		
	3	19,1		10,3		
<b>B+G (10%)</b>	1	89,4	<b>78,7</b>	90,0	<b>94,8</b>	<b>74,7</b>
	2	63,8		85,7		
	3	83,0		108,8		
<b>B+G (5%)</b>	1	83,0	<b>80,9</b>	20,7	<b>24,0</b>	<b>19,4</b>
	2	95,7		25,5		
	3	63,8		25,8		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22: Valor Medio de Semillas Germinadas y de Elongación Radicular en el testigo.

<b>Datos</b>		
	Nro Semillas Germinadas Testigo	Promedio Elongacion Radícula Testigo
Rep 1	16,0	11,4
Rep 2	16,0	8,8
Rep 3	15,0	8,9
<b>Promedio Total</b>	<b>15,7</b>	<b>9,7</b>

Fuente: Elaboración propia

## 6.2 Anexo 2: Ensayo de BMP

Tabla 23: Valores promedio normalizado en ml de biogás obtenidos a lo largo del ensayo de BMP a escala batch.

	Valores en ml de biogás promedio normalizados																				
	Días transcurridos a lo largo del ensayo																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	24	31
C	139,8	156,1	87,2	98,8	66,6	65,9	52,1	32,4	57,6	76,7	73,8	32,3	35,8	23,1	36,5	36,3	49,0	29,3	29,8	11,4	7,4
G	59,9	351,3	310,1	151,4	156,4	105,4	110,8	103,6	124,9	51,1	64,2	58,1	58,5	72,6	66,4	62,6	42,5	46,8	53,1	17,1	16,7
B+G	299,5	175,6	213,2	108,6	59,9	59,3	78,2	48,5	48,0	28,8	24,1	24,2	24,4	34,7	24,9	39,6	39,2	27,3	34,8	8,0	7,5
B+C	299,5	195,1	116,3	125,1	49,9	85,6	58,6	51,8	48,0	32,0	32,1	25,8	29,3	29,7	36,5	33,0	49,0	39,0	39,8	17,0	14,0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24: Valores promedio de biogás normalizado y acumulado en ml a lo largo del tiempo de ensayo de BMP a escala batch

	Valores promedio de biogás normalizado y acumulado en ml																				
	Días transcurridos a lo largo del ensayo																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	24	31
C	139,8	295,9	383,1	481,9	548,4	614,3	666,4	698,8	756,4	833,2	907,0	939,3	975,1	998,2	1034,7	1071,0	1120,0	1149,3	1179,1	1190,5	1198,0
G	59,9	411,2	721,3	872,7	1029,1	1134,5	1245,3	1348,8	1473,7	1524,9	1589,1	1647,2	1705,8	1778,4	1844,8	1907,4	1949,9	1996,7	2049,8	2066,9	2083,7
B+G	299,5	475,2	688,4	797,0	856,9	916,2	994,4	1042,9	1091,0	1119,7	1143,8	1168,0	1192,4	1227,1	1252,0	1291,6	1330,8	1358,1	1392,9	1400,9	1408,4
B+C	299,5	494,7	611,0	736,1	786,0	871,6	930,3	982,1	1030,1	1062,0	1094,2	1120,0	1149,3	1179,0	1215,5	1248,5	1297,5	1336,5	1376,3	1393,3	1407,3

Fuente: Elaboración propia