

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES**



**“PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DE UN BIODIGESTOR  
PARA EL TRATAMIENTO Y REAPROVECHAMIENTO DE  
HECES CANINAS DEL DISTRITO DE CHUPACA”**

**Presentada por:**

**DAVID EDUARDO SEVERO ROMERO**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO  
MAGISTER SCIENTIAE EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**Lima - Perú**

**2024**

# “PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DE UN BIODIGESTOR PARA EL TRATAMIENTO Y REAPROVECHAMIENTO DE HECES CANINAS DEL DISTRITO DE CHUPACA”

## INFORME DE ORIGINALIDAD

11%

INDICE DE SIMILITUD

11%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="https://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	1%
2	<a href="https://pirhua.udep.edu.pe">pirhua.udep.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1%
3	<a href="http://www.ptolomeo.unam.mx:8080">www.ptolomeo.unam.mx:8080</a> Fuente de Internet	<1%
4	<a href="http://www.scribd.com">www.scribd.com</a> Fuente de Internet	<1%
5	<a href="https://repositorio.lamolina.edu.pe">repositorio.lamolina.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1%
6	<a href="https://docslide.us">docslide.us</a> Fuente de Internet	<1%
7	<a href="https://repositorio.continental.edu.pe">repositorio.continental.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1%
8	<a href="https://repositorioacademico.upc.edu.pe">repositorioacademico.upc.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1%

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**“PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DE UN  
BIODIGESTOR PARA EL TRATAMIENTO Y  
REAPROVECHAMIENTO DE HECES CANINAS DEL  
DISTRITO DE CHUPACA”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO  
MAGISTER SCIENTIAE**

**Presentada por:**

**DAVID EDUARDO SEVERO ROMERO**

**Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:**

Lic. Rer. Reg. Victor Aguilar Vidangos  
**PRESIDENTE**

Mg.Sc. Augusto Zingg Rosell  
**ASESOR**

Mg.Sc. Victor Miyashiro Kiyam  
**MIEMBRO**

Ph.D. José Calle Maraví  
**MIEMBRO**

## ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA .....	2
2.1. <i>Canis lupus familiaris</i> .....	2
2.1.1. Población.....	2
2.1.2. Heces caninas y su impacto en la salud pública y ambiental.....	3
2.2. RESIDUOS SÓLIDOS, PROBLEMÁTICA Y CONTEXTO ACTUAL .....	5
2.3. TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE LA FORS .....	5
2.3.1. Biomasa.....	6
2.4. DIGESTIÓN ANAERÓBICA.....	6
2.4.1. Generalidades.....	6
2.4.2. Etapas .....	8
2.4.3. Parámetros de operación y control.....	11
2.4.4. Digestato .....	18
2.4.5. Biodigestor.....	19
2.4.6. Biogás .....	19
III. MATERIALES Y MÉTODOS .....	22
3.1. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE BIOGÁS PRODUCIDO POR BIODIGESTORES ANAEROBIOS A PEQUEÑA ESCALA (BPA).....	22
3.1.1. Determinación de los parámetros del estudio .....	22
3.1.2. Elaboración de los BPA .....	22
3.1.3. Determinación del volumen de carga de los BPA .....	25
3.1.4. Cálculo del volumen de agua.....	27
3.1.5. Determinación de la cantidad de cenizas, sólidos volátiles y sólidos totales	28
3.1.6. Preparación del inóculo.....	30
3.1.7. Determinación del potencial bioquímico de metano (PBM) .....	33
3.2. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS BPA CON PRESENCIA DE BOLSAS PLÁSTICAS.....	37
3.2.1. Caracterización de las bolsas plásticas .....	37
3.2.2. Determinación del PBM con presencia de bolsas plásticas .....	35
3.2.3. Análisis estadístico de las pruebas PBM .....	41

3.3. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN ÓPTIMO DEL BIODIGESTOR PARA EL TRATAMIENTO DE LAS HECES CANINAS DEL DISTRITO DE CHUPACA.....	42
3.3.1. Determinación de la producción anual de heces caninas.....	42
3.3.2. Determinación de los parámetros de funcionamiento del biodigestor.....	43
3.3.3. Dimensionamiento del biodigestor .....	46
3.4. DETERMINACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y SU POTENCIAL ENERGÉTICO .....	48
3.4.1. Determinación del potencial energético.....	48
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	49
4.1. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE BIOGÁS PRODUCIDO POR BIODIGESTORES ANAEROBIOS A PEQUEÑA ESCALA (BPA).....	49
4.1.1. Producción de biogás de las pruebas BH1, BH2 y BH3.....	53
4.1.2. Análisis estadístico.....	55
4.2. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE BIOGÁS PRODUCIDO POR BIODIGESTORES ANAEROBIOS A PEQUEÑA ESCALA (BPA) CON PRESENCIA DE BOLSAS PLÁSTICAS .....	58
4.2.1. Producción de biogás de las pruebas BP1, BP2, BP3 y BP4.....	58
4.2.2. Análisis estadístico.....	66
4.3. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN ÓPTIMO DEL BIODIGESTOR PARA EL TRATAMIENTO DE LAS HECES CANINAS DEL DISTRITO DE CHUPACA.....	70
4.3.1. Producción anual de heces caninas .....	70
4.3.2. Parámetros de funcionamiento del biodigestor.....	72
4.3.3. Dimensionamiento del biodigestor .....	73
4.4. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y SU POTENCIAL ENERGÉTICO.....	75
4.4.1. Producción de biogás .....	75
4.4.2. Potencial energético del biogás.....	77
V. CONCLUSIONES.....	80
VI. RECOMENDACIONES .....	81
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	82
VIII. ANEXOS .....	91

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Rangos de temperatura para la digestión anaeróbica .....	12
Tabla 2:	Rangos de pH óptimos para la digestión anaeróbica .....	13
Tabla 3:	Tiempos de retención en función al tipo de microorganismos del biodigestor .....	13
Tabla 4:	Relación carbono nitrógeno (C/N) de algunos compuestos orgánicos .....	15
Tabla 5:	Composición química de las heces caninas .....	17
Tabla 6:	Composición química del biogás .....	21
Tabla 7:	Rendimiento de biogás registrado para ciertos sustratos orgánicos .....	21
Tabla 8:	Resumen de la carga final para el cálculo del PBM .....	49
Tabla 9:	Resumen de los resultados para los ensayos BH1, BH2 y BH3 .....	54
Tabla 10:	Resumen del modelo de regresión lineal para las pruebas BH1, BH2 y BH3 .....	57
Tabla 11:	Resumen de la carga final para el cálculo del PBM con presencia de bolsas plásticas .....	59
Tabla 12:	Resumen de los resultados para los ensayos BP1, BP2, BP3 y BP4 .....	64
Tabla 13:	Resumen del modelo de regresión lineal para las pruebas BP1, BP2, BP3 y BP4 .....	68
Tabla 14:	Resumen de la producción estimada de heces caninas en el periodo 2018 – 2033 .....	70
Tabla 15:	Parámetros de funcionamiento del biodigestor .....	71
Tabla 16:	Resumen de los parámetros de funcionamiento de diseño del biodigestor para el tratamiento de HC .....	75
Tabla 17:	Estimación de la producción mensual de biogás en m <sup>3</sup> de biogás al mes ...	76
Tabla 18:	Potencial energético del biogás en MJ mensuales .....	78

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Etapas de la digestión anaeróbica .....	8
Figura 2:	Tasa de hidrólisis de la materia orgánica en función a su biodegradabilidad	9
Figura 3:	Esquema químico de la vía acetoclásica .....	10
Figura 4:	Esquema químico de la vía hidrogenotrófica .....	10
Figura 5:	Curva de crecimiento bacteriano dentro de los biodigestores .....	14
Figura 6:	Producción de metano utilizando dos inóculos diferentes .....	16
Figura 7:	Diseño del BPA de carga fija .....	22
Figura 8:	Biodigestor a pequeña escala (BPA) .....	22
Figura 9:	Curvas de los resultados más comunes de las pruebas PBM .....	34
Figura 10:	Bolsas plásticas de tipo I, II, III y IV .....	39
Figura 11:	Sello de certificación “OK COMPOST” presentes en las bolsas de tipo IV	39
Figura 12:	Diseño del biodigestor tipo Gobar .....	47
Figura 13:	Producción diaria, acumulada y rendimiento del ensayo BH1 .....	50
Figura 14:	Producción diaria, acumulada y rendimiento del ensayo BH2 .....	51
Figura 15:	Producción diaria, acumulada y rendimiento del ensayo BH3 .....	52
Figura 16:	Análisis de regresión lineal entre la producción diaria de biogás y la temperatura ambiental para la prueba BH1 .....	55
Figura 17:	Análisis de regresión lineal entre la producción diaria de biogás y la temperatura ambiental para la prueba BH2 .....	56
Figura 18:	Análisis de regresión lineal entre la producción diaria de biogás y la temperatura ambiental para la prueba BH3 .....	56
Figura 19:	Producción diaria, acumulada y rendimiento del ensayo con la bolsa tipo I – BP1 .....	60
Figura 20:	Producción diaria, acumulada y rendimiento del ensayo con la bolsa tipo II – BP2 .....	60
Figura 21:	Producción diaria, acumulada y rendimiento del ensayo con la bolsa tipo III – BP3 .....	61

Figura 22:	Producción diaria, acumulada y rendimiento del ensayo con la bolsa tipo IV – BP4 .....	62
Figura 23:	Análisis de regresión lineal entre la producción diaria de biogás y la temperatura ambiental para la prueba BP1 .....	65
Figura 24:	Análisis de regresión lineal entre la producción diaria de biogás y la temperatura ambiental para la prueba BP2 .....	66
Figura 25:	Análisis de regresión lineal entre la producción diaria de biogás y la temperatura ambiental para la prueba BP3 .....	66
Figura 26:	Análisis de regresión lineal entre la producción diaria de biogás y la temperatura ambiental para la prueba BP4 .....	67
Figura 27:	Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema de tratamiento .....	74
Figura 28:	Vista del biodigestor tipo Gobar para el tratamiento de HC .....	75

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1:	Carta de autorización de la municipalidad de Chupaca .....	91
Anexo 2:	Comunidades microbianas presentes la digestión anaeróbica .....	92
Anexo 3:	Concentración inhibitoria de la digestión anaeróbica de ciertos compuestos comunes .....	95
Anexo 4:	Caracterización de los envases PET según su forma y capacidad de almacenamiento de líquidos .....	96
Anexo 5:	Formato para el cálculo del volumen teórico de los envases PET .....	97
Anexo 6:	Formato para la determinación del volumen de los envases PET utilizando instrumentos de medida .....	98
Anexo 7:	Resumen de los volúmenes calculados para los envases utilizados como BAP .....	99
Anexo 8:	Desgasificación del inóculo .....	100
Anexo 9:	Determinación del volumen del inóculo, agua y sustrato para la prueba PBM .....	102
Anexo 10:	Cálculo del potencial bioquímico de metano (PBM) del sustrato .....	104
Anexo 11:	Análisis de regresión lineal de la prueba BH1 .....	110
Anexo 12:	Análisis de regresión lineal de la prueba BH2 .....	113
Anexo 13:	Análisis de regresión lineal de la prueba BH3 .....	116
Anexo 14:	Determinación del volumen del inóculo, agua y sustrato para la prueba PBM con presencia de bolsas plásticas .....	119
Anexo 15:	Cálculo del potencial bioquímico de metano (PBM) del sustrato con la presencia de bolsa de plástico .....	120
Anexo 16:	Resumen del análisis de regresión lineal de las pruebas BP1, BP2, BP3 y BP4 .....	128
Anexo 17:	Preparación de la trampa de CO <sub>2</sub> .....	130
Anexo 18:	Definiciones .....	131
Anexo 19:	Unidades y abreviaturas .....	137

## RESUMEN

*Canis lupus familiaris* ha sido una especie que ha acompañado a los humanos durante muchos años. Sin embargo, sus heces (HC) se han convertido en un problema debido a que ha contribuido con el aumento de residuos sólidos orgánicos. Además de la deficiencia estructural de plantas de tratamiento de este tipo de residuos. Por lo que, puede ser considerado como un residuo potencialmente peligroso a la salud pública y ambiental. Una alternativa para su tratamiento es mediante la digestión anaeróbica, la cual representa una opción viable debido a su bajo costo de implementación y mantenimiento. Además de brindar como subproducto biogás y digestato. El objetivo del presente trabajo fue presentar una propuesta de implementación de un biodigestor para el tratamiento y reaprovechamiento de las HC del distrito de Chupaca. Se determinó el rendimiento del biogás en biodigestores a pequeña escala (BPA) utilizando HC como sustrato donde se encontró que la prueba BH1 fue la que obtuvo el mayor rendimiento con 11.43 ml de biogás / gr HC. En las pruebas con presencia de bolsas plásticas se encontraron que la producción de biogás es inversamente proporcional al grosor de la bolsa plástica utilizada. Siendo la prueba BP1 la que obtuvo mayor rendimiento con 8.62 ml de biogás / gr HC. Así mismo se estimó que la generación de la cantidad de HC en el distrito de Chupaca es de 599.4 ton HC/año (para el año quince) y el volumen óptimo del biodigestor para su tratamiento de 300 m<sup>3</sup>. Finalmente se estimó la producción de biogás del biodigestor, siendo 563 m<sup>3</sup> la máxima cantidad de biogás (capacidad óptima). Esto representa un potencial energético de 12951.53 MJ. Los hallazgos del presente trabajo demostraron la viabilidad de la implementación de un biodigestor que opere y reaproveche las HC generadas en el distrito de Chupaca.

Palabras claves: Biodigestor, digestión anaeróbica, *Canis lupus familiaris*, heces caninas

## ABSTRACT

*Canis lupus familiaris* has been a specie that has accompanied humans for many years. However, its feces have become a problem because it has contributed to the increase of organic solid waste, in addition to the structural deficiency of treatment plants for this type of waste. Therefore, it can be considered a potentially dangerous waste for public and environmental health. An alternative for its treatment is through anaerobic digestion, which represents a viable option due to its low cost of implementation and maintenance with biogas and digestate as a by-product. The objective of this work was to present a proposal for the implementation of a biodigester for the treatment and reuse canine feces in the Chupaca district. Biogas yield was determined in small-scale biodigesters (BPA) using canine feces as substrate. In this study was found that the BH1 test was the one that obtained the highest yield with 11.43 ml of biogas/gr of canine feces. In the tests with the presence of plastic bags, it was found that the production of biogas is inversely proportional to the thickness of the plastic bag used. Being the BP1 test the one that obtained the highest yield with 8.62 ml of biogas/gr of canine feces. Likewise, it was estimated that the generation of the quantity of HC in the district of Chupaca is 599.4 tons of canine feces for year (fifteenth year) and the optimal volume of the biodigester for its treatment is 300 m<sup>3</sup>. Finally, the biogas production of the biodigester was estimated, with 563 m<sup>3</sup> being the maximum amount of biogas (optimal capacity of biodigester) what represents 12951.53 MJ of energy potential. The results of this work demonstrated the feasibility of implementing a biodigester that operates and reuses the HC generated in the Chupaca district.

Keywords: Biodigester, anaerobic digestion, *Canis lupus familiaris*, canine feces.

## I. INTRODUCCIÓN

*Canis lupus familiaris* o mejor conocido como perro doméstico, es una especie que a lo largo de los años ha logrado desarrollar una fuerte relación con los humanos, la cual le ha permitido incrementar su tasa de supervivencia y mejorar su éxito reproductivo. Esto se puede ver reflejado en que en la actualidad esta especie puede ser encontrada en todos los continentes, excepto en la Antártida. Sin embargo, al ser una especie con una población numerosa, generan desechos que si no son tratados adecuadamente pueden llegar a convertirse en un problema para el medio ambiente y la salud pública. En el país existe una deficiencia estructural de plantas de tratamiento de residuos sólidos, lo cual significa que la totalidad de desechos generados no son tratados de forma adecuada. Si nos centramos sólo en las heces caninas, los estudios sobre su tratamiento, potencial energético o su posible reaprovechamiento son escasos. Una alternativa para tratar la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales es mediante la descomposición biológica de la materia orgánica utilizando la digestión anaerobia. Esta es una opción altamente viable debido a su bajo costo de implementación y mantenimiento. Además, se puede obtener como subproducto metano en forma de biogás y un resto de materia orgánica sólida estabilizada conocida como digestato, la cual puede ser utilizada como fertilizante. El distrito de Chupaca, donde se llevó a cabo el estudio, no se encuentra ajeno a este problema, por lo tanto, el objetivo de la presente investigación fue proponer una alternativa para la implementación de un biodigestor para el tratamiento y reaprovechamiento de heces caninas en el distrito de Chupaca, provincia de Chupaca, región Junín. Así mismo, los objetivos específicos que se desarrollaron fueron los siguientes:

- Determinar el rendimiento del biogás producido por biodigestores a pequeña escala que funcionen con heces caninas para su tratamiento mediante digestión anaeróbica.
- Determinar el rendimiento del biogás producido por los biodigestores a pequeña escala con la presencia de bolsas de plástico.
- Estimar la cantidad de heces caninas generadas en el distrito de Chupaca y determinar el volumen óptimo del biodigestor para su tratamiento.
- Estimar la producción de biogás del biodigestor y su potencial energético.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

Los humanos desde sus orígenes han coexistido con otras especies dentro de un área común. Esto ha provocado que se desarrollen diversos tipos de relaciones interespecíficas, algunas de carácter mutualista, que han contribuido con la supervivencia y el éxito reproductivo de estas especies. Podemos considerar como una de las relaciones más importantes al vínculo formando entre los humanos y *Canis lupus familiaris*.

### 2.1. *Canis lupus familiaris*

*Canis lupus familiaris* o mejor conocido como perro doméstico (PD), es un animal mamífero perteneciente a la familia *Canidae*. Su principal ancestro es el lobo (*Canis lupus*), aunque, dentro de su código genético aún se encuentran genes de coyotes y chacales (Vilà *et al.* 2012). Los PD se separaron de sus ancestros hace 100.000 años y su relación con los humanos comenzó a ser más estrecha hace 15.000 años aproximadamente (Wayne and Bridgett 2012). Estos vínculos se afianzaron al momento en que los humanos cambiaron sus hábitos de supervivencia, pasando de ser cazadores recolectores a ser sociedades establecidas en un solo lugar donde su principal actividad era la agricultura (Bentosela and Mustaca 2007). A partir de esta época, modificaron su comportamiento para convivir de manera armónica con los humanos, desarrollando habilidades comunicativas que les permitieron estrechar sus vínculos (Kubinyi *et al.* 2011). En algunas culturas antiguas se han encontrado tumbas de emperadores que al momento de ser enterrados eran acompañados de sus pertenencias, sirvientes e incluso mascotas (Morey 2006). Esta estrecha relación ha permitido que el PD se convierta en una parte importante en la conformación familiar de la sociedad moderna.

#### 2.1.1. Población

Desde finales del pleistoceno, el PD ha acompañado a los seres humanos en distintas regiones geográficas distribuidas a nivel mundial, con excepción de la Antártida (Koscinczuk 2017). Gran parte del éxito reproductivo de los PD se debe principalmente a la

relación mutualista con los humanos, la que ha permitido que pueda sobrevivir exitosamente y establecerse en diversas regiones.

En la actualidad es complicado estimar la población real de PD, mucho más si consideramos a los que son salvajes o callejeros. Según The New York Times, en el 2016 el número de PD en el mundo eran aproximadamente 250 millones. Sin embargo, si en la suma se considera a los perros callejeros, de vida libre o de zonas rurales la población estimada se encontraría entre los 750 y 1000 millones (Roston and Ramos 2016). Según The American Veterinary Medical Association, entre el 2017 y 2018 el número de PD en Estados Unidos era alrededor de 83 millones. The European Pet Food Industry, indicaba que la población de PD en Europa para el 2019 superaba los 85 millones (FEDIAF 2019). Aunque, estas cifras estaban basadas en la venta de alimento canino por lo que no contempla a los PD que no son alimentados con comida casera o a los callejeros. En América del sur solo se tienen reportes de Colombia, Argentina y Brasil, donde el número estimado de PD es de 5, 6.5 y 30 millones, respectivamente (Atitwa 2019). Con respecto a nuestro país, la encuestadora (Compañía peruana de estudios de mercados y opinión pública 2018) indicaba que el 62 por ciento de los hogares urbanos a nivel nacional contaban con al menos una mascota. Por otra parte, Álvarez (2014) señalaba que, para la ciudad de Lima, el 58 por ciento de las familias contaban con al menos una mascota, siendo el PD la mascota más popular. Si tenemos en cuenta los datos obtenidos por la misma encuestadora en los años 1995 donde el número de mascotas por familia era de 52 por ciento y en el 2005 de 55 por ciento, se evidencia un aumento en su población (Álvarez 2014). Si bien estas estimaciones son variables, podemos afirmar que la población de PD en nuestra sociedad es numerosa, lo cual nos hace preguntarnos cuál es el impacto de las HC que son generadas diariamente. Por lo tanto, la búsqueda de nuevas alternativas que contribuyan a que las HC sean dispuestas adecuadamente se ha convertido en una necesidad para minimizar sus impactos en el medioambiente.

### **2.1.2. Heces caninas y su impacto en la salud pública y ambiental**

Los espacios destinados para las viviendas son cada vez más reducidos en las ciudades contemporáneas. Esta situación obliga a muchas familias que poseen mascotas a sacarlas fuera de sus viviendas para que defequen, siendo muy pocos los municipios que habiliten contenedores especiales para que estos residuos sean dispuestos de forma separada. Por otra

parte, para las familias que sí tienen espacio dentro de sus hogares, las heces de sus mascotas son desechadas en la basura común. Estas heces se convierten en nuevos residuos sólidos (RS) que deben ser recogidas y dispuestas por los municipios.

Las heces caninas (HC) que se encuentran expuestas al aire libre también representan un problema a la salud pública. Estas se solidifican y degradan parcialmente por efecto de la temperatura. Las partículas son transportadas con la ayuda del viento contaminando el aire y las fuentes de agua. Algunas de estas partículas pueden alcanzar alimentos o ser respiradas por los seres humanos. Además, si consideramos que existe una mala manipulación de estos residuos, la probabilidad de adquirir enfermedades como toxocariasis, larva migrans, gnathostomiasis o hidatidosis aumenta (Zúñiga and Caro 2020). Además, hay que tener en cuenta que no todos los residuos sólidos municipales (RSM) llegan a ser dispuestos adecuadamente. Una alta fracción de los RSM termina en botaderos que permiten que sean consumidas por otros PD e incluso por otros animales. Esto ocasiona que estos parásitos sigan propagándose, incrementando su impacto ambiental y sanitario (Guevara and Zaldúa 2018). Por otra parte, si consideramos que las personas que recogen y disponen las HC, lo hacen utilizando bolsas de plástico (Guevara and Zaldúa 2018). Este material dificulta su tratamiento debido a que no se degrada, solo se descompone en partes más pequeñas generando microplásticos, incrementando su impacto en la salud pública y en el medio ambiente (Hale *et al.* 2020).

En países desarrollados se estima que entre el 60 a 80 por ciento de los desechos generados por los PD son recogidos por sus dueños principalmente (a) para evitar pisarlas, (b) por ser correcto moralmente, (c) por razones de salud, (d) ambientales o (e) simplemente dejar la zona libre de contaminantes. Mientras que entre los motivos por las que no son recogidas tenemos que (a) están en un área donde no serán encontradas (b) son consideradas como un abono natural (fertilizante), (c) no tienen como recogerlas, (d) sienten vergüenza o (e) disgusto de cargar con las heces (Typhina and Yan 2014). Lastimosamente en nuestro país estas cifras no son ni siquiera cercanas en zonas donde por lo general no se tiene una cultura de recoger las HC, por lo que la búsqueda de alternativas que contemplen su adecuada disposición es necesaria.

## **2.2. RESIDUOS SÓLIDOS, PROBLEMÁTICA Y CONTEXTO ACTUAL**

El tratamiento de los residuos sólidos (RS) es considerado uno de los principales problemas de las sociedades contemporáneas. La generación de RS viene aumentando año tras año, por lo que la búsqueda de nuevas alternativas para su tratamiento se ha convertido en una necesidad para la sociedad (Chasnyk *et al.* 2015). En el mundo se genera alrededor de 2.01 billones de toneladas al año de RS, lo cual significa que aproximadamente 1.6 billones de toneladas de  $CO_2$  son emitidos hacia la atmósfera (Kaza *et al.* 2018). Gran parte del  $CO_2$  es generado por la mala disposición de los RS en vertederos al aire libre o vertederos que no cuentan con un sistema de recolección de gases (Wilson *et al.* 2015). La generación per cápita de RS a nivel mundial varía entre 0.11 y 4.54 kg. En nuestro país el promedio de RS generados per cápita es de 0.82 kg lo que representa que cada habitante genera aproximadamente 300 kg al año. De los RSU, solo el 53 por ciento son dispuestos adecuadamente, lo cual nos muestra que existe un déficit en la cantidad de plantas e infraestructura para su tratamiento y correcta disposición (Portal Regional SINIA n.d.).

## **2.3. TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE LA FORS**

El tratamiento biológico de los RS brinda múltiples ventajas que representan una oportunidad para que los municipios aprovechen la fracción orgánica de los residuos sólidos (FORS) que se generan diariamente. Desde finales del siglo pasado ha existido un acelerado avance de las tecnologías asociadas al tratamiento biológico de los RS. Esto ha sido posible gracias a su abaratamiento y a la información disponible que se tiene sobre las mismas. Además, significan una fuente importante de empleo, desarrollo, reducción de la generación de  $CO_2$  atmosférico y contribuye a enfrentar los problemas ambientales, energéticos y de salud pública (Karpenstein 2001). La característica biológica más importante que tienen los residuos sólidos orgánicos (RSO) es que prácticamente todos sus componentes son susceptibles al tratamiento biológico (De Baere and Mattheeuws 2008). El resultado de este tratamiento es un residuo estabilizado, con un contenido bajo de patógenos y que puede ser utilizado como fertilizante. Así como un subproducto gaseoso que es el resultado de la degradación llevada a cabo por microorganismos en ausencia de oxígeno conocido como biogás.

Es necesario que en el país las autoridades locales busquen invertir en plantas de tratamiento

de los RSO. Si los municipios decidieran comercializar los subproductos como el biogás o el digestato generado, podrían obtener ganancias económicas que recuperen la inversión inicial. Esta inversión puede ser recuperada entre 20 y 50 por ciento al año, dependiendo del tamaño de la planta (Pullen 2015). Estas son cifras importantes en comparación con otras opciones de generación energética como la fotovoltaica o la eólica, donde la recuperación anual de la inversión inicial es de 12 y 25 por ciento respectivamente. Por lo tanto, podemos afirmar que la reutilización de desechos orgánicos como las HC puede representar una alternativa económicamente viable para ser implementada por los municipios a nivel nacional. Sin embargo, para que pueda ser aprovechado, debe ser accesible y económico (Horan *et al.* 2018).

### **2.3.1. Biomasa**

Se conoce como biomasa a toda sustancia orgánica renovable que tiene origen animal o vegetal, la cual ha venido siendo utilizada como fuente energética probablemente desde que se descubrió el fuego. Luego de la revolución industrial, su uso pasó a un segundo plano por detrás de los combustibles fósiles. En la actualidad debido al costo elevado que representa este tipo de combustibles, se ha vuelto a poner la mirada sobre el uso de la biomasa como alternativa energética (Steinhauser and Deublein 2011). Además, de ser una opción económica y no representa una amenaza significativa al medio ambiente.

## **2.4. DIGESTIÓN ANAERÓBICA**

### **2.4.1. Generalidades**

La DA es un proceso bioquímico espontáneo dentro del ciclo biológico. Los microorganismos fermentadores pueden encontrarse en todos los lugares donde haya presencia de materia orgánica (MO) y el oxígeno esté ausente. Bajo estas condiciones obtienen gas compuesto por metano, dióxido de carbono, agua y pequeñas concentraciones de sulfuro de hidrógeno.

En la actualidad la DA se ha convertido en una opción para el tratamiento de diversos residuos orgánicos provenientes de la agricultura, comida, aguas residuales, así como para la fracción orgánica de los residuos municipales (Li *et al.* 2011). Cuando este tipo de sustrato

“convencional” no es tomado en cuenta, el uso de las heces animales se convierte en una alternativa (Avcioglu and Türker 2012). Sin embargo, definir un protocolo estándar para desarrollar el proceso de la DA es complicado, debido a que es un proceso complejo y altamente dinámico donde los aspectos biológicos, físicos y químicos están muy relacionados entre sí (Angelidaki *et al.* 2009).

Entre las ventajas de la DA podemos considerar las siguientes (Horan *et al.* 2018):

- Tiene un efecto de pasteurización, por lo tanto, una gran cantidad de patógenos y microorganismos fecales son eliminados.
- Disminuye el nivel de contaminantes.
- El biogás puede ser usado para generar energía.
- Reduce las emisiones de  $CO_2$ , minimizando su impacto en el calentamiento global.
- El digestato es un buen fertilizante.
- Estabiliza los residuos orgánicos, evitando su descomposición descontrolada reduciendo la contaminación.

Puede clasificarse en dos tipos, según la composición y el estado físico del sustrato en el biodigestor (Tabatabaei and Ghanavati 2018):

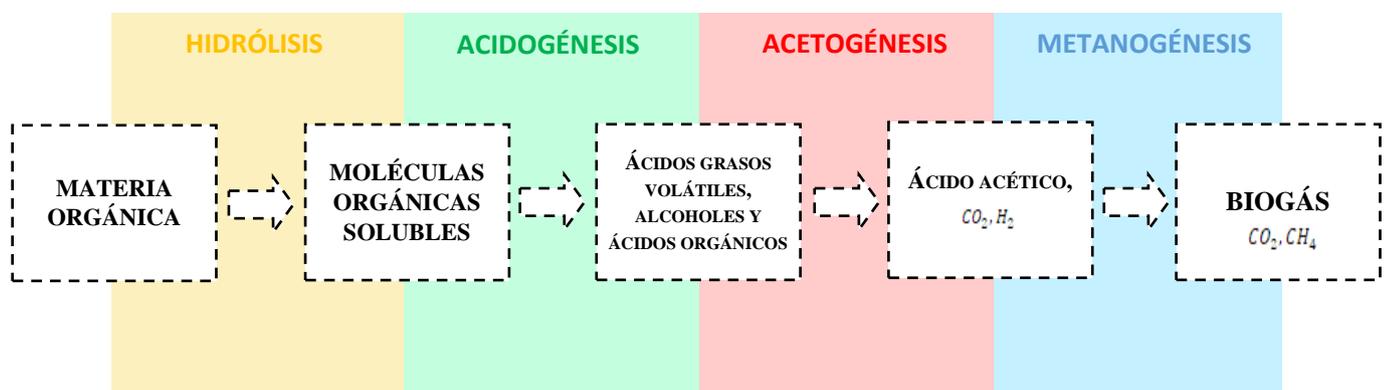
- **Digestión anaeróbica húmeda:** Si el sustrato tiene un porcentaje menor al 15 por ciento de residuos sólidos secos.
- **Digestión anaeróbica sólida:** Si el sustrato supera el 15 por ciento de residuos sólidos secos.

Los desechos ideales para ser utilizados como sustrato de los biodigestores son aquellos residuos orgánicos como los de origen agrícola, industrial, doméstico y excretas humanas o animales (Rivas *et al.* 2010). Diversos estudios han encontrado que combinar diferentes sustratos puede facilitar la DA (Phetyim *et al.* 2015). A esta mezcla de dos o más sustratos se le conoce como codigestión, la cual puede ayudar a mejorar el rendimiento de la DA y reducir los costos de producción. Si bien la codigestión representa una buena alternativa, para que se obtengan los resultados esperados se necesita que los sustratos sean escogidos cuidadosamente y de ser posible, que hayan sido previamente estudiados (Yadvika *et al.* 2004).

La DA no es un proceso exclusivo para sectores que generan altas cantidades de residuos orgánicos. Se tiene la creencia que para que la DA sea rentable y exitosa se necesita una inversión considerable en tecnología o una gran cantidad de sustrato. Sin embargo, esto está alejado de la realidad, ya que la DA nos brinda diversas alternativas para el tratamiento de residuos orgánicos, desde los generados en una casa hasta los grandes volúmenes de la fracción orgánica de los residuos municipales (Pullen 2015).

#### 2.4.2. Etapas

La DA es el resultado de la acción en serie de microorganismos a través de etapas sucesivas, cada una dando paso a la siguiente (Figura 1) (Corrales *et al.* 2015).



**Figura 1: Etapas de la digestión anaeróbica**

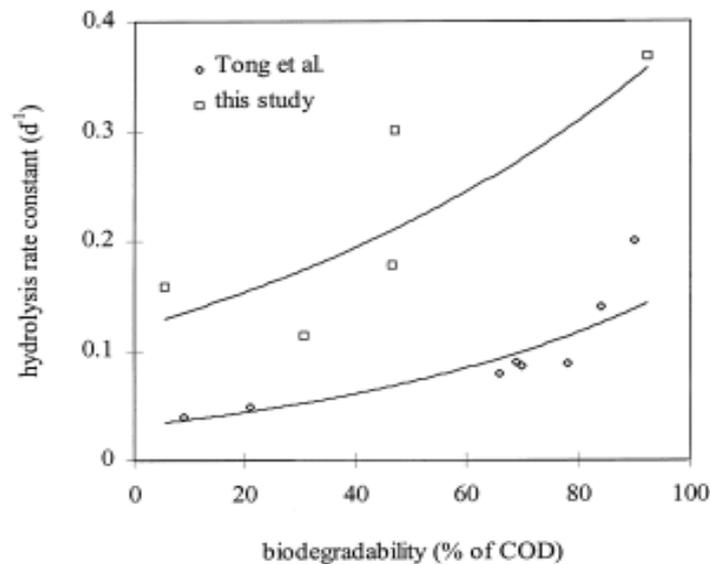
Fuente: Elaboración propia

##### a. Hidrólisis

Los polímeros orgánicos (hidratos de carbono, proteínas, lípidos, celulosa, etc.) de la MO no pueden ser utilizados directamente por los microorganismos encargados de la DA. Las bacterias hidrolíticas son las responsables de convertir los polímeros orgánicos en dímeros o monómeros por medio de hidrolasas. Estas enzimas, con la ayuda del medio acuoso, tienen la capacidad de solubilizar y romper enlaces específicos de la MO (Corrales *et al.* 2015), para que puedan atravesar la membrana celular y ser asimilados. De esta forma la MO compleja es degradada en materia orgánica soluble (azúcares, aminoácidos y ácidos grasos) para que sirva como materia prima en la acidogénesis (Li *et al.* 2011).

La tasa de hidrólisis está relacionada directamente con la biodegradabilidad del sustrato, es

decir, esta aumenta cuando la MO es más biodegradable (Figura 2) (Veecken and Hamelers 1999). Por lo tanto, la hidrólisis es una etapa crítica en la velocidad que determina la conversión de la MO en biogás (Christ *et al.* 2000). Sin embargo, el rendimiento puede mejorar si se reduce el tamaño de las partículas del sustrato, aumentando la superficie específica e incrementando su degradación (Akunna 2018).



**Figura 2: Tasa de hidrólisis de la materia orgánica en función a su biodegradabilidad**

Fuente: Tomado de Veecken y Hamelers (1999) : 253

Las proteínas no solo son fuente de carbono y energía, al ser hidrolizadas en péptidos y aminoácidos una parte es utilizada para sintetizar nuevo material celular de los microorganismos. Los lípidos son degradados por las lipasas en glicerol y ácidos grasos de cadena larga. En cuanto los materiales lignocelulósicos (celulosa, lignina y hemicelulosa), su degradación es lenta por lo que puede representar la etapa limitante de la hidrólisis (Varnero 2012).

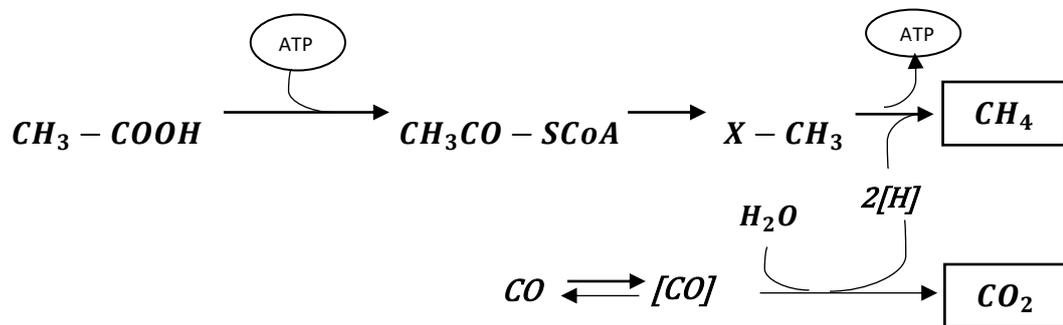
#### **b. Acidogénesis y acetogénesis**

En la etapa acidogénica se lleva a cabo la fermentación de la MO soluble (compuestos como acético, fórmico e hidrógeno) para que puedan ser utilizadas posteriormente en la metanogénesis o compuestos como el láctico, valérico, propiónico, butírico o etanol para su oxidación por las bacterias acetogénicas. No todos los productos de la etapa acidogénica pueden ser utilizados por los microorganismos metanogénicos, por lo que deben ser transformados en compuestos más sencillos como  $H_2$ ,  $CO_2$  o  $CH_3COO^-$  por las bacterias

acetogénicas (Casanovas *et al.* 2019). Esta es considerada la etapa más rápida y fundamental, la cual debe estar controlada para evitar la acumulación de compuestos que puedan acidificar el medio y afectar el proceso final. Además, su importancia radica en la eliminación de cualquier rastro de oxígeno presente en el sistema (Varnero 2012).

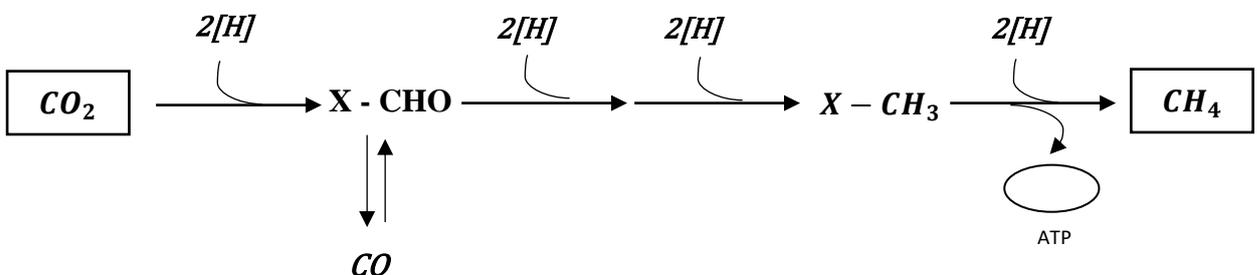
### c. Metanogénesis

Esta es la etapa final del proceso de la DA, la cual es llevada a cabo por arqueas que son anaerobias estrictas. Pueden utilizar dos vías metabólicas diferentes: la vía acetoclástica (Figura 3) que utiliza el ácido acético o la vía hidrogenotrófica (Figura 4) que utiliza  $H_2$  para producir  $CH_4$  y  $CO_2$ . Las cuales aportan aproximadamente un 70 y 30 por ciento de  $CH_4$  respectivamente (Corrales *et al.* 2015). El medio comienza a disminuir su pH ( $< 6$ ), lo que provoca que las bacterias metanogénicas disminuyan su metabolismo y reproducción, por lo que el biodigestor deja de producir biogás (Casanovas *et al.* 2019). La cantidad de biogás generado está relacionado directamente con el crecimiento de las bacterias metanogénicas (Umar and Ismail 2014).



**Figura 3: Esquema químico de la vía acetoclástica**

Fuente: Tomado de Schlegel y Zaborosch (1997) :354



**Figura 4: Esquema químico de la vía hidrogenotrófica**

Fuente: Tomado de Schlegel y Zaborosch (1997) :355

Las bacterias metanogénicas poseen una estrecha relación con las bacterias productoras de  $H_2$ . El  $H_2$  del medio es captado rápidamente por las bacterias metanogénicas debido a que bajo estas condiciones es difícil encontrar este elemento en forma libre. El exceso de hidrógeno libre también afecta a las bacterias productora de  $H_2$  (Schlegel and Zaborosch 1997).

### **2.4.3. Parámetros de operación y control**

Existen ciertos parámetros que, de no estar controlados, pueden causar un desequilibrio en los procesos bioquímicos de los microorganismos anaerobios que llevan a cabo la DA, provocando el mal funcionamiento de los biodigestores y una baja producción de biogás. Entre los factores más importantes para asegurar el éxito de la DA tenemos los siguientes:

#### **a. Temperatura**

Las reacciones bioquímicas que se presentan en la DA pueden producirse en temperaturas que van desde los 5°C hasta más de 60°C. La principal diferencia es la velocidad a la que estas reacciones se llevan a cabo. Dentro de la DA, las bacterias metanogénicas son las más susceptibles a los cambios de temperatura, debido a que su crecimiento es más lento. El aumento de temperatura en algunos grados puede beneficiar la producción de biogás, pero si pasa lo contrario, pueden acumularse compuestos ácidos que provoquen un retraso o inhibición en la producción de biogás. Para que el proceso de la DA sea eficiente, la temperatura del biodigestor debe mantenerse constante (Rivas *et al.* 2010). De acuerdo con la temperatura a la que trabaje el biodigestor, el crecimiento de cierto tipo de microorganismos se ve favorecido o inhibido (Ciotola *et al.* 2013). Por ejemplo, si el biodigestor trabaja a 10°C, las bacterias psicrófilas son las que crecen, pero, si aumenta la temperatura a más de 25°C estas se inhiben y crecen bacterias mesófilas (Tabla 1) (Llamas Redondo 2015).

La temperatura también afecta a los procesos fisicoquímicos. Por ejemplo, tiene una relación directa con la solubilidad de los nutrientes del sustrato lo cual hace que sean más accesibles para los microorganismos. Sin embargo, también son más accesibles los compuestos tóxicos. Por lo tanto, esto también afecta en las especies bacterianas responsables de llevar a cabo la DA (Anexo 2). Además, puede disminuir la solubilidad de los gases como el  $CO_2$ , lo que

puede aumentar el pH, generando una elevada concentración de amoníaco (Casanovas *et al.* 2019).

**Tabla 1: Rangos de temperatura para la digestión anaeróbica**

	Psicrófilos	Mesófilos	Termófilos	Referencia
<b>Temperatura (°C)</b>	10 - 25	25 - 40	20 - 40	Alcayaga <i>et al.</i> (1999)
	< 20	40 - 60	> 40	Hilbert (2003)
	< 30	30 - 40	50 - 60	Yadvika <i>et al.</i> (2004)
	4 - 25	25 - 45	45 - 90	Chasnyk <i>et al.</i> (2015)
	10 - 15	30 - 37	50 - 80	Corrales <i>et al.</i> (2015)

Fuente: Elaborado con base en Alcayaga *et al.* (1999), Hilbert (2003), Yadvika *et al.* (2004), Corrales *et al.* (2015) y Chasnyk *et al.* (2015)

## b. pH

La digestión de la materia orgánica es un delicado balance entre la tasa de hidrólisis y la tasa de metanogénesis. Las bacterias hidrolíticas, acidogénicas y acetogénicas pueden provocar una caída de pH como consecuencia de sus subproductos metabólicos. Por lo tanto, si la tasa de acidogénesis y acetogénesis es mayor que la tasa de metanogénesis, esta última etapa puede verse afectada debido a que estas bacterias son más sensibles a los cambios de pH y a la aglomeración de ácidos grasos volátiles (Veeken and Hamelers 1999). En la Tabla 2 se pueden observar los rangos de pH que son considerados óptimos para llevar a cabo el proceso de la DA.

La disociación de las moléculas de agua en iones hidróxidos e iones hidrógeno provoca que se generen condiciones ácidas o básicas en el medio, las cuales afectan a los microorganismos encargados de la DA. Las bacterias metanogénicas trabajan mejor cuando el pH se encuentra entre 7 y 7.2, aunque algunos autores lo consideran hasta 7.3 (Veeken and Hamelers 1999). Si el pH se acidifica por debajo de 6.6, los microorganismos se inhiben y por debajo de 6.2 se mueren. El pH también puede afectar las concentraciones de los ácidos grasos ionizados y sin ionizar o las reacciones que precipitan a las sustancias tóxicas provocando que aumente a niveles dañinos para la población bacteriana (Alcayaga *et al.* 1999).

### c. Tiempo de retención

Es el periodo de tiempo en que el sustrato se encuentra dentro del biodigestor hasta que es degradado (Olaya and González 2009). Si el tiempo de retención no es el adecuado, es probable que no se llegue a digerir completamente la MO del sustrato, afectando la producción de biogás (Alcayaga *et al.* 1999). Algunos autores consideran que el tiempo de retención para degradar el 80 por ciento de sustratos orgánicos como hojas, cortezas de árbol, pasto, etc., está entre los 6 y 16 días (Veeken and Hamelers 1999). En la Tabla 3 podemos observar el tiempo de retención en días, que el sustrato debe encontrarse dentro del biodigestor. La etapa inicial o de arranque es la más inestable y crítica de todo el proceso de la DA. Esta etapa se caracteriza por tener una baja actividad biológica, debido a que los microorganismos presentes crecen como biomasa dispersa y adherida. Por lo tanto, debe compensarse con tiempos de retención más prolongados con contenidos de carga orgánica bajos para asegurar la asimilación del sustrato. Aunque el contenido de sustrato puede incrementarse paulatinamente a medida que el biodigestor se estabiliza (Torres and Perez 2010).

**Tabla 2: Rangos de pH óptimos para la digestión anaeróbica**

pH	Efecto
7 – 7.2	Óptimo
Mayor o igual a 6.2	Retarda la acidificación
Menor o igual a 7.6	Retarda la amonización

Fuente: Tomado de Saico (2003):22

**Tabla 3: Tiempos de retención en función al tipo de microorganismos del biodigestor.**

	Psicrófilos	Mesófilos	Termófilos	Referencia
Tiempo de retención (días)	100	30 - 40	8	Alcayaga <i>et al.</i> (1999)
	> 100	30 - 60	10 - 16	Saico (2003)
	> 40	10 a 40	< 10	Olaya y González (2009)
	50 – 120	25 - 50	15 - 25	Casanovas <i>et al.</i> (2019)

Fuente: Elaborado con base en Alcayaga *et al.* (1999), Saico (2003), Olaya y González (2009) y Casanovas *et al.* (2019)

#### d. Contenido de carga orgánica

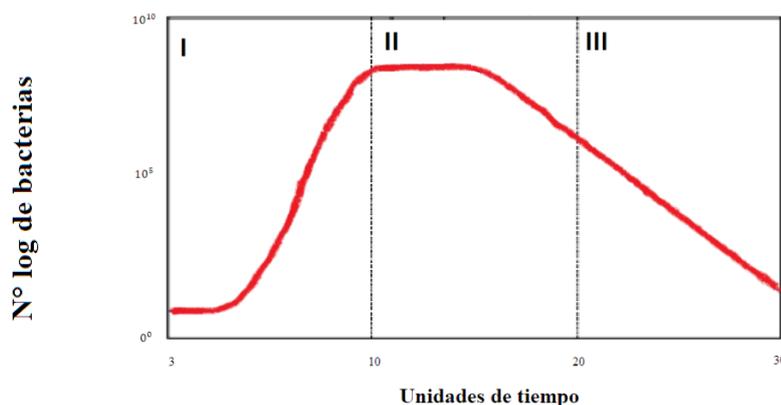
El tipo de sustrato que es utilizado y su cantidad afecta directamente el rendimiento de los biodigestores. Por lo que se debe procurar que exista un balance entre los nutrientes de la MO (Veeken and Hamelers 1999). A bajas concentraciones puede tener el mismo efecto de tiempos de retención cortos y en altas concentraciones puede volverse tóxico para los microorganismos (Guebitz *et al.* 2015) (Anexo 3).

#### e. Potencial redox

Las bacterias metanogénicas desempeñan mejor su actividad en un medio reductor, por lo que el potencial redox debe encontrarse entre  $-370$  y  $-220$  mV a pH 7.0 (Casanovas *et al.* 2019).

#### f. Cantidad de inóculo

Mientras mayor sea la cantidad del inóculo, mayor es la tasa de consumo del sustrato (Silva *et al.* 2004). Esto se debe a que el uso de inóculos altamente activos logra reducir el tiempo de cada etapa de la DA. El crecimiento bacteriano dentro de los biodigestores se puede dividir en tres etapas: (I) Arranque, (II) Estabilización y (III) Declinación (Figura 5).



**Figura 5: Curva de crecimiento bacteriano dentro de los biodigestores**

Fuente: Adaptado de Varnero (2012)

#### g. Relación carbono nitrógeno (C/N)

Es un indicador de la proporción de carbono y nitrógeno que posee un sustrato orgánico. La biomasa está compuesta principalmente por C y N, elementos claves para la vida y están

presentes en todos los procesos biológicos directa o indirectamente. Mientras el C es la fuente de energía, el N sirve para la regeneración y crecimiento celular de los microorganismos. Ambos son fundamentales para la actividad microbiana dentro del biodigestor (Lin and Lay 2004).

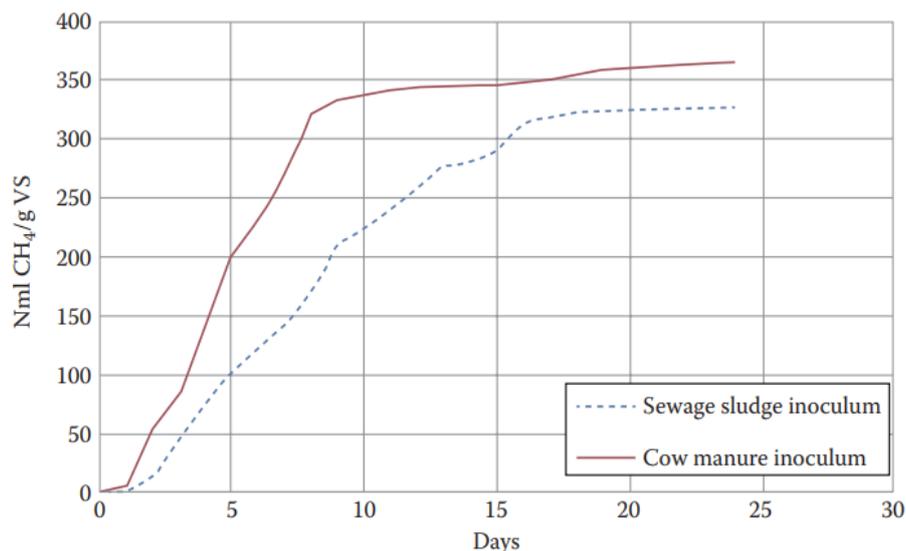
Los microorganismos encargados de realizar la DA consumen el C entre 25 y 30 veces más que el N (Yadvika *et al.* 2004). Es aceptable que los biodigestores funcionen en los rangos de 20:1 hasta 30:1 (Akunna 2018). Si la cantidad de N es mayor puede provocar el incremento de la concentración de amonio a niveles tóxicos, disminuyendo el rendimiento de los biodigestores. Los niveles de N pueden aumentar como consecuencia de la degradación de proteínas o la urea presente en el sustrato utilizado (Rivas *et al.* 2010). En la Tabla 4 podemos observar la relación C/N de algunos compuestos utilizados comúnmente como sustrato dentro de los biodigestores y la relación C/N de las HC. La Tabla 4 ha sido elaborada considerando la bibliografía consultada en base a lo reportado por distintos autores.

**Tabla 4: Relación carbono nitrógeno (C/N) de algunos compuestos orgánicos**

Sustrato	C/N	Referencia
Estiércol de perro	17	Okoroigwe, <i>et al.</i> (2014)
Estiércol bovino	17-25	Casanovas <i>et al.</i> (2019)
Estiércol equino	25 – 50	Olaya y González (2009)
Estiércol ovino	29 – 35	Olaya y González (2009)
Estiércol porcino	13 – 16	Olaya y González (2009)
Estiércol vacuno	18 – 20	Olaya y González (2009)
Estiércol de aves	32	Olaya y González (2009)
Estiércol de gallina	5 – 9.6	Rosato (2017)
Estiércol de conejo	13	Varnero (2012)
Estiércol caprino	30 - 40	Varnero (2012)
Comida para perros	10	Xu y Li (2012)

Fuente: Elaborado con base en Olaya y González (2009), Varnero (2012), Xu y Li (2012), Okoroigwe *et al.* (2014), Rosato (2017) y Casanovas *et al.* (2019)

El rendimiento del biodigestor es óptimo cuando la cantidad de inóculo representa el 20 por ciento del sustrato. Aunque, esto puede variar en función a la calidad y tipo de sustrato utilizado (Forster-Carneiro *et al.* 2008). Es recomendable agregar inóculos con capacidad conocida, debido a la presencia de microorganismos adecuados que mejoren el arranque de la producción del biogás (Figura 6). La etapa de arranque está caracterizada por ser un periodo con inestabilidad transitoria, la cual puede mejorarse si se utiliza inóculos de otros biodigestores que ya se encuentren en funcionamiento o inóculos provenientes de lodos residuales (De Lemos 2007). Sin embargo, tenemos otras alternativas como el rumen de vaca o su estiércol, el cual es un sustrato ampliamente utilizado para mejorar la etapa de arranque y rendimiento de la producción de biogás dentro de los biodigestores (Gerardi 2003) (Figura 6).



**Figura 6: Producción de metano utilizando dos inóculos diferentes**

Fuente: Tomado de Rosato (2017) :105

#### **h. Relación inóculo - sustrato (I/S)**

Para garantizar una adecuada producción de biogás, se debe definir la relación entre la cantidad de organismos vivos y el alimento que tienen disponible (I/S). Para esto es importante conocer la cantidad de sólidos volátiles (SV) del sustrato, el cual nos indica su fracción biodegradable. Por lo general la relación I/S de SV entre el inóculo y el sustrato es de 1.6 a 3, de esta forma nos aseguramos de que los microorganismos tengan suficiente alimento. Una relación menor puede significar que la producción de biogás se debe más al inóculo que al sustrato, lo cual ocurre generalmente cuando el inóculo no ha sido

previamente “desgasificado” (Rosato 2017).

### i. Composición química del sustrato

Algunos elementos cuando se encuentran en concentraciones elevadas pueden convertirse en inhibidores (Anexo 3). Sin embargo, no deben estar ausentes del todo. Debido a que la presencia de metales traza como el Fe, Co, Mo, Se, Ca, Mg, Zn, Cu, Mn, W, B, Cr y Ni son elementos esenciales para los microorganismos y pueden estimular la producción de metano (Yadvika *et al.* 2004). Se ha reportado que la combinación de elementos como el Na y K o Na y Mg incrementa en diez por ciento la producción de  $CH_4$ , en comparación de que si solo se tuviera la presencia de Na. Aunque, su presencia en exceso puede ocasionar que las células de los microorganismos se deshidraten debido al gradiente osmótico (Chen *et al.* 2008). Por lo tanto, es importante conocer la composición química del sustrato que se está utilizando, para así poder prevenir posibles fallos en el funcionamiento de los biodigestores. En la Tabla 5 podemos observar la composición química de las HC reportada por Okoroigwe en el 2009 y 2014.

Los microorganismos que se encargan de la DA pueden acostumbrarse a una concentración de compuestos que al inicio resultan ser tóxicos y posteriormente pueden retomar la producción de  $CH_4$ . Sin embargo, si su concentración es demasiado elevada, el proceso se inhibe completamente. En el Anexo 3 se puede observar la concentración inhibitoria de ciertos compuestos químicos reportados en la bibliografía.

**Tabla 5: Composición química de las heces caninas**

Parámetros	Heces caninas	Parámetros	Heces caninas
Humedad	47.8 % - 98.5 %	K	1.5 %
Ceniza	1.5 %	Ca	0.006 %
Proteína	2.19 %	Mg	0.32 %
Grasas	0.15 %	P	0.48 mg/100g
Fibra	0.55 %	C	2.98 %
Sólidos totales	25.2 %	N	0.175 %
Sólidos volátiles	20.5 %	Relación C/N	17
Tiempo de combustión	20 días		

Fuente: Elaborado con base en Okoroigwe *et al.* (2009) y Okoroigwe *et al.* (2014)

#### **j. Niveles de amoníaco**

La degradación de la materia orgánica genera amoníaco, principalmente en forma de urea y proteínas. Puede presentarse como  $NH_4^+$  o como  $NH_3$  en un medio acuoso y su presencia puede ser considerada como uno de los principales inhibidores de la DA. El amoníaco es una molécula que es permeable a la membrana de los microorganismos, lo cual genera que ingrese de forma pasiva hacia la célula provocando un desequilibrio químico y/o deficiencia de potasio (Chen *et al.* 2008).

#### **k. Antibióticos:**

Los antibióticos que son utilizados para el tratamiento de ciertas enfermedades, así como las campañas de desparasitación de PD pueden afectar el rendimiento de los biodigestores (Miller and Wolin 2001). Sin embargo, se conoce que algunos microorganismos metanogénicos tienen su pared celular formada por ácidos urónicos, azúcares neutros y aminoazúcares, que los protegen de algunos antibióticos como la penicilina (Schlegel and Zaborosch 1997).

#### **l. Alimentación de los perros domésticos:**

Los alimentos pueden influir directamente sobre la generación de biogás, ya que su composición influye en la relación C/N. Sin embargo, los microorganismos anaerobios no solo necesitan fuentes de C y N, también necesitan otro tipo de nutrientes como K, Zn, S, P, Mo, Ca, Fe, Mn, Mg, Co, Se, W, Ni y otros elementos traza. Por lo tanto, la alimentación debe ser variada para garantizar la presencia de estos elementos para el adecuado rendimiento de los biodigestores. Las heces de los animales generalmente tienen estos nutrientes, aunque su presencia y concentración depende principalmente de su alimentación (Hilbert 2003).

#### **2.4.4. Digestato**

Las transformaciones físicas y químicas a la que está sometida la MO durante el proceso de la DA no solo genera biogás, sino también un residuo estabilizado conocido como digestato. Este residuo se caracteriza porque contiene un bajo índice de coliformes totales y otros parásitos (Ardila and Parada 2016). Además, contiene nutrientes como N, P, K y otros

minerales, por lo que puede ser utilizado como fertilizante por las plantas para su crecimiento y desarrollo (Varnero 2012). La cantidad de digestato que se genera es equivalente a la cantidad de sustrato inicial dentro del biodigestor, aunque esto puede variar dependiendo del tipo de sustrato y su contenido de MO (Horan *et al.* 2018). Una ventaja del digestato es que gracias a la DA, los nutrientes presentes tienen una mayor biodisponibilidad para las plantas en comparación con otro tipo de fertilizantes orgánicos (Pullen 2015).

#### **2.4.5. Biodigestor**

Es el lugar donde se produce la DA, donde los microorganismos anaerobios digieren la MO convirtiéndola en biogás y digestato. Este es el componente central o corazón de un sistema anaerobio constituido principalmente por un tanque cerrado herméticamente que puede ser fabricado de diversos materiales según su escala. Los materiales más comunes utilizados a gran escala son el cemento, metal o fibra de vidrio. Mientras que para los biodigestores a pequeña escala construidos para las pruebas en los laboratorios es común utilizar vidrio o plástico (Pullen 2015).

Los biodigestores se diferencian principalmente por el método de carga que utilizan. Si bien existen muchas variantes, para el presente estudio solo nos centraremos los biodigestores de carga fija o también conocidos como de tipo “Batch”. Estos son cargados una sola vez y luego quedan cerrados hasta que la producción de biogás se detenga. Este tipo de biodigestores generalmente son a pequeña escala y permiten determinar el potencial bioquímico de metano (PBM) de un sustrato orgánico, la cantidad de biogás que produce y el tiempo que se demora en hacerlo (Rivas *et al.* 2010). Se caracterizan porque al inicio del proceso tienen una alta carga orgánica, pero con poca presencia de bacterias y al final del proceso esta relación se invierte (Wellinger *et al.* 2013).

#### **2.4.6. Biogás**

Es obtenido como resultado de la degradación de la MO llevada a cabo por microorganismos en ausencia de oxígeno mediante la DA. Puede provenir de una gran variedad de compuestos orgánicos como: (a) cultivos energéticos, (b) residuos de cocina, (c) residuos cloacales o (d) estiércol de animales (Li *et al.* 2011). La cantidad que se genera depende principalmente del

sustrato. Cuando este es altamente biodegradable se puede obtener hasta  $0.5 \text{ m}^3$  de biogás por kg de sustrato (Olaya and González 2009). Una característica importante del biogás es que su combustión no contribuye significativamente al incremento de gases de efecto invernadero en la atmósfera. A diferencia de que estos residuos fueran dispuestos en un relleno sanitario o incinerados (Severiche and Acevedo 2013). El rendimiento es calculado en metros cúbicos por cada tonelada, pero la cantidad de energía que produce no necesariamente es la misma, esta depende de la composición del biogás (Shen *et al.* 2015).

### **A. Composición**

El biogás está compuesto principalmente por  $CH_4$  y  $CO_2$  pero también puede encontrarse la presencia de otros compuestos en concentraciones que varían de acuerdo con el sustrato utilizado (Tabla 6). Si el contenido de  $CH_4$  es superior al 45 por ciento, el biogás es inflamable.

### **B. Propiedades**

Al igual que cualquier otro gas está sujeto a las leyes elementales de los gases de Boyle y de Charles. Por lo tanto, se puede afirmar que el biogás cambiará su volumen, valor calorífico y contenido de vapor cuando la temperatura y presión de su entorno cambie (Saico 2003).

### **C. Rendimiento**

El rendimiento del biogás puede variar en función al sustrato utilizado, su contenido de MO, la energía que contiene, el tiempo que se mantiene dentro del biodigestor, el tipo de biodigestor y las condiciones en las que trabaja (Pullen 2015). En la Tabla 7 se puede observar el rendimiento de los sustratos más comunes utilizados para la producción de biogás, reportados en la bibliografía.

**Tabla 6: Composición química del biogás**

$CH_4$ (%)	$CO_2$ (%)	$H_2O$ (%)	$H_2S$	Sil <sup>1</sup>	VOC (%)	$NH_3$	$O_2$ (%)	CO (%)	$N_2$ (%)	$H_2$	Referencia
35 – 75	15 – 60	5 – 10	0.005 – 2 %	0 – 0,02 %	< 0.6	< 1 %	0 – 1	< 0.6	0 – 2	NM	Arellano <i>et al.</i> (2017)
60 – 70	30 – 40	NM	0.1 %	NM	NM	NM	0.1	0.1	0.5	1 %	Botero y Preston (1987)
45 – 70	25 – 45	NM	5000 - 50 000 ppm	< 0.5 ppm	NM	NM	< 5	NM	< 5	5000 ppm	Casanovas <i>et al.</i> (2019)
60 – 70	30 – 40	1 – 5	0 – 4000 ppm	NM	NM	100 ppm	0 - 1	NM	0 - 0.2	0 – 3 %	Sun <i>et al.</i> (2015)

NM: Elemento no mencionado

Fuente: Elaborado con base en Botero y Preston (1987), Sun *et al.* (2015), Arellano *et al.* (2017) y Casanovas *et al.* (2019)

**Tabla 7: Rendimiento de biogás registrado para ciertos sustratos orgánicos**

Sustrato orgánico	Rendimiento de metano (1/kg SV*)
Residuos sólidos municipales	200 – 530
Residuos de frutas y vegetales	420
Residuos de frutas, hortalizas y aguas residuales de mataderos	850
Estiércol porcino	337
Lixiviado de residuos alimenticios	294
Pajilla de arroz	350
Ensilado de maíz y paja	312
Residuos de molinos de aceite de palma	610
Residuos domésticos	350
Residuos orgánicos ricos en lignina	200
Estiércol porcino y aguas residuales	348
Residuos de alimentos	396

Fuente: Tomado de Khalid *et al.* (2011):1740

<sup>1</sup> Siloxanos: Grupo de compuestos que contienen silicio, oxígeno e hidrógeno

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE BIOGÁS PRODUCIDO POR BIODIGESTORES ANAEROBIOS A PEQUEÑA ESCALA (BPA)**

##### **3.1.1. Determinación de los parámetros del estudio**

###### **a. Ubicación del estudio**

El presente estudio se realizó en el distrito de Chupaca, provincia de Chupaca, departamento de Junín. El cual cuenta con una altura aproximada de 3263 m.s.n.m., latitud sur de 12°03'43.7'' y longitud oeste 75°13'13.6''.

###### **b. Condiciones climáticas**

La zona se caracteriza por tener un clima lluvioso frío con un promedio de precipitaciones anuales de 700 mm y temperatura media anual de 12°C. Los inviernos son secos con presencia de heladas y los veranos son lluviosos (SENAMHI - Junín s.f.).

###### **c. Duración del estudio**

El estudio se dividió en tres etapas (desgasificación del inóculo, producción de biogás en los BPAs y producción de biogás con presencia de bolsas plásticas). Cada etapa tuvo una duración de 60 días, por lo que la parte experimental del estudio fue de seis meses.

##### **3.1.2. Elaboración de los BPA**

###### **a. Fundamento del método**

Las moléculas de un gas están en movimiento constante, colisionando unas con otras y con la superficie del recipiente que lo contiene, dando como resultado una fuerza de presión sobre las paredes de la superficie. La presión es definida como la fuerza ejercida por unidad de área, es decir, una fuerza dividida por el área sobre la que se distribuye la fuerza. Sin embargo, medir la fuerza producida por las moléculas de un gas no es sencillo. Esta presión se puede calcular de forma indirecta al compararla con la presión que ejerce sobre un líquido.

Para poder comprobar esta afirmación consideraremos un líquido con densidad ( $\rho$ ) que se encuentra en un envase cilíndrico cuya base tiene un área ( $A$ ) y alcanza una altura ( $h$ ) determinada. Así mismo, debemos tener en consideración que el peso ( $W$ ) es una fuerza y el peso ( $g$ ) y la masa ( $m$ ) son proporcionales:

$$W = g * m \quad \text{(Fórmula 1)}$$

La masa ( $m$ ) del líquido es el producto de su volumen ( $V$ ) y su densidad ( $\rho$ ):

$$m = V * \rho \quad \text{(Fórmula 2)}$$

El volumen del recipiente cilíndrico ( $V$ ) es producto de su altura ( $h$ ) por el área ( $A$ ) de su base:

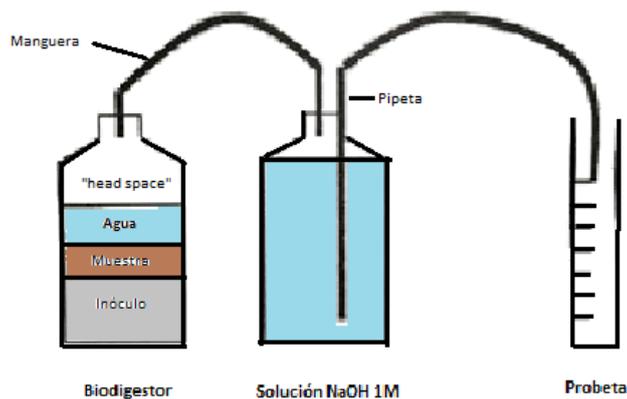
$$V = h * A \quad \text{(Fórmula 3)}$$

Si combinamos estas ideas (fórmulas 1, 2 y 3) obtendremos la siguiente ecuación:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{W}{A} = \frac{g * m}{A} = \frac{g * V * \rho}{A} = \frac{g * V * A * \rho}{A} = g * h * \rho \quad \text{(Fórmula 4)}$$

La cual nos indica que la masa ( $g$ ) es una constante, por lo tanto, ***la presión del líquido es directamente proporcional a la densidad y altura del líquido.***

El método empleado por Saico (2003) consiste en construir un BPA basándose en un sistema de desplazamiento del volumen de agua como consecuencia de la presión ejercida por el gas generado en los biodigestores (Figura 7 y 8). Cada BAP está conectado a un envase que contiene una solución de NaOH 1.0 M mediante una manguera de 1mm diámetro. La solución de NaOH 1.0 M se combina con las moléculas de  $CO_2$  (componente del biogás) atrapándolas. Por lo tanto, la cantidad de agua desplazada nos indica la cantidad de  $CH_4$  generado por el biodigestor y así ser cuantificado. Los BPA deben tener al menos una capacidad de 500 ml para que pueda ser cargado con una muestra representativa (Rosato 2017).



**Figura 7: Diseño del BPA de carga fija**

Fuente: Adaptado de Saico (2003)



**Figura 8: Biodigestor a pequeña escala (BPA) construido para el estudio**

**b. Insumos requeridos**

- **Equipos:** Taladro, pistola de silicona y compresora de aire.
- **Materiales:** Botellas de plástico, tapas de plástico, mangueras de plástico ( $\varnothing = 1\text{mm}$ ), plástico negro, probeta, silicona, cinta adhesiva, marcadores y tijeras.

**c. Condiciones previas**

- **Caracterización de las botellas de plástico PET:** Para la construcción de los BAP se utilizaron botellas de plástico PET de diferentes volúmenes. Por lo que se tuvo que estandarizar la cantidad de sustrato para cada BPA en base al volumen de carga de acuerdo con el tipo de envase utilizado (Anexo 4).

**d. Documentos utilizados**

- DSR-FOR-01 (Anexo 4)

**e. Procedimiento**

- Perforar las tapas de plástico utilizando el taladro con un diámetro aproximado de 1mm.
- Unir las tapas de plástico a la manguera de plástico y asegurarlo con silicona.
- Forrar los envases PET con plástico negro y cinta adhesiva.
- Tapar los envases PET y asegurarlos con silicona.
- Comprobar que no se presenten fugas sumergiendo los BAP en un envase lleno de agua e ingresar aire por medio de una compresora.
- Verificar que no se formen burbujas.

**3.1.3. Determinación del volumen de carga de los BPA**

**a. Fundamento del método**

Se determinó el volumen de carga de los BPA en base a tres indicadores de su capacidad de almacenamiento: (a) tomando como referencia el volumen indicado en la etiqueta de los envases, (b) calculando el volumen de forma teórica del envase y (c) calculando el volumen de los envases por medio del uso de instrumentos de medida.

**b. Insumos requeridos**

- **Materiales:** 1 Probeta de 10, 1 probeta de 100, 1 probeta de 500 ml, 1 probeta de 1000ml, regla, envase rectangular y los BPA que serán medidos.
- **Reactivos:** Agua y colorantes.

**c. Documentos utilizados**

- DSR-FOR-02 (Anexo 5)
- DSR-FOR-03 (Anexo 6)

**d. Procedimiento**

- **Cálculo de volumen teórico**
  - Llenar los BPA con agua hasta el tope.
  - Vaciar el agua en un envase rectangular y agregar colorante.
  - Con una regla medir: (a) largo, (b) ancho y (c) alto del agua que ocupa el envase.
  - Anotar los resultados.

- **Cálculo del volumen por instrumentos de medida**

- Llenar los BPA con agua hasta el tope.
- Vaciar completamente el agua en cada probeta de 1000, 500, 100 y 10 respectivamente.
- Repetir este paso tres veces.
- Anotar los resultados.

**e. Tratamiento y obtención de resultados**

- **Volumen teórico**

- El volumen fue calculado mediante la siguiente fórmula:

$$V = l * h * p \quad \text{(Fórmula 5)}$$

**Donde:**

<b>V</b>	:	Volumen
<b>p</b>	:	Profundidad
<b>h</b>	:	Ancho
<b>l</b>	:	Largo

- Se calculó el error mediante la siguiente fórmula:

$$dV = l * h * dp \quad \text{(Fórmula 6)}$$

**Donde:**

<b>dp</b>	:	Error
-----------	---	-------

- **Volumen por instrumentos de medida**

- Un instrumento es confiable cuando se mide en diferentes oportunidades y los resultados obtenidos son similares para obtener validez de este. Por lo tanto, se realizó la medida por triplicado utilizando probetas de 1000, 500, 100 y 10 mililitros.
- Se midieron los volúmenes determinados en las probetas.
- Los resultados fueron promediados y se determinó un volumen final en mililitros para cada BPA.
- El resumen de los volúmenes calculados se puede observar en el Anexo 7.

### 3.1.4. Cálculo del volumen de agua

#### a. Fundamento del método

La movilidad de los microorganismos dentro del sustrato puede verse afectada si la cantidad de agua dentro del biodigestor no es suficiente, lo cual limita su rendimiento. Los digestores no deben superar entre el 8 y 12 por ciento de sólidos totales (Olaya and González 2009). Para incrementar y mantener un adecuado rendimiento del biodigestor, la cantidad de sólidos totales debe ser diluido hasta llegar al cinco por ciento (Varnero 2012).

#### b. Insumos requeridos

- **Materiales:** Probetas de 50 y 100 ml.

#### c. Condiciones previas

- El valor de la densidad promedio de las heces es de  $1000 \text{ kg} / \text{m}^3$  (Ardila y Parada 2016). Para uniformizar las unidades de medida, estas fueron convertidas de  $\text{kg}/\text{m}^3$  a  $\text{mg}/\text{ml}$ .
  - Si la densidad se expresa con la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{(Fórmula 7)}$$

Donde:

$\rho$	:	Densidad
$m$	:	Masa
$V$	:	Volumen

- Como ejemplo, si utilizamos 70 ml, tendremos:

$$1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \frac{m(\text{gr})}{70(\text{ml})}$$

$$1000 \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) * 70 \text{ ml} = m(\text{gr})$$

$$1000 \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) * \left( \frac{1000 \text{ gr}}{1 \text{ kg}} \right) * \left( \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \right) * \left( \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ ml}} \right) * 70 (\text{ml}) = m(\text{gr})$$

$$1000 \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) * \left( \frac{1000 \text{ gr}}{1 \text{ kg}} \right) * \left( \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \right) * \left( \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ ml}} \right) * 70 (\text{ml}) = m(\text{gr})$$

$$m(\text{gr}) = 70(\text{gr})$$

#### d. Procedimiento

- Para encontrar la relación adecuada que nos otorgue una dilución del sustrato del cinco por ciento se utilizó la siguiente fórmula según el Manual del biogás (Varnero 2012):

$$\% ST (\text{carga diluida}) = \frac{1 \text{ kg HC} * \% S.T. \text{ Sustrato}}{1 \text{ kg Sustrato} + H_2O} \quad (\text{Fórmula 8})$$

Donde:

ST : Sólidos totales

$$0.05 = \frac{1 \text{ kg} * 0.252}{1 \text{ kg} + H_2O}$$

$$0.05 + 0.05 * H_2O = 0.252$$

$$H_2O = \frac{0.202}{0.05}$$

$$H_2O = 4.04 \text{ L/kg Sustrato}$$

**Este resultado nos da una relación de 4:1**

#### e. Tratamiento y obtención de resultados

- El valor de la densidad promedio de las heces ( $1000 \text{ kg} / m^3$ ) nos ayudó a tener una equivalencia en los experimentos. Por lo tanto, cada miligramo de HC es equivalente a un mililitro de agua.
- La relación 4:1 nos indica que, por cada miligramo de materia seca del sustrato que se agregó al BPA, se adicionó cuatro mililitros de agua para mantener la dilución del sustrato al cinco por ciento.

### 3.1.5. Determinación de la cantidad de cenizas, sólidos volátiles y sólidos totales

#### a. Fundamento de la técnica

La humedad no contribuye con la producción de biogás, por lo que el contenido de materia seca influye directamente en la calidad del sustrato. Por lo tanto, es importante conocer la cantidad de SV para optimizar el proceso de la DA. Los SV nos indican la fracción digestible del sustrato, lo que representa a la fracción orgánica que es transformada en biogás. Además, la tasa de SV del sustrato y del digestato es un indicador de la eficiencia en la conversión de

la biomasa en metano (Rosato 2017).

**b. Insumos requeridos**

- **Equipos:** Horno de secado y balanza.
- **Materiales:** Plato de loza y heces caninas.

**c. Procedimiento**

- **Cálculo del contenido de humedad del sustrato**
  - Tomar la muestra del sustrato (heces caninas).
  - Pesar el plato para calibrar la balanza, luego pesarla con la muestra.
  - Anotar los datos obtenidos.
  - Colocar la muestra en el horno de secado.
  - Llevar hasta una temperatura de 105 °C de forma progresiva para evitar que el agua hierva.
  - Una vez terminado el desecado, pesar nuevamente la muestra mientras el envase aún está caliente para evitar que al enfriarse la muestra absorba la humedad del ambiente.
  - Anotar los datos obtenidos.
- **Cálculo del contenido de cenizas y sólidos volátiles**
  - Determinar la cantidad de ST.
  - Colocar la muestra en el horno de secado.
  - Llevar hasta una temperatura de 500 °C y mantenerla hasta su completa calcinación (generalmente cuatro horas).
  - Pesar la muestra mientras aún se encuentra caliente.
  - Anotar los datos obtenidos.

**d. Tratamiento de datos y obtención de resultados**

- **Contenido de humedad**
  - La diferencia entre el peso húmedo y el peso seco de la muestra, nos indica el contenido original de agua.
  - Para calcular los ST se utilizó la siguiente fórmula:

$$ST = ww - Hu \quad \text{(Fórmula 9)}$$

**Donde:**

**ww** : Peso de la muestra  
**Hu** : Contenido de humedad

- El porcentaje de ST fue calculado en función al peso de la muestra.

$$ST (\%) = \frac{ST}{ww} \quad (\text{Fórmula 10})$$

- **Contenido de cenizas y sólidos volátiles**

- Las cenizas son menores al 10 por ciento de la materia seca (entre 2 y 5 por ciento).
- El porcentaje de SV fue calculado utilizando la siguiente fórmula:

$$SV (\%) = \frac{ST - c}{ww} \quad (\text{Fórmula 11})$$

**Donde:**

**SV** : Sólidos volátiles  
**c** : Cenizas

### 3.1.6. Preparación del inóculo

#### a. fundamento de la técnica

Cuando se realizan pruebas de DA, es importante considerar la especificidad del inóculo. Los inóculos usados en los estudios científicos generalmente provienen de lodos y/o digestato de diferentes plantas en funcionamiento. Estos inóculos contienen una comunidad microbiana mucho más amplia (Anexo 2), lo cual les permite que se puedan adaptar mejor y más rápido a cualquier sustrato. Lo cual permite que se obtengan resultados con mejor rendimiento en comparación de los que se obtienen en plantas pequeñas o en las pruebas de laboratorio. Para los experimentos realizados en el presente trabajo, el inóculo no fue proveniente de otra planta de DA. En cambio, se utilizaron heces bovinas, un inóculo ampliamente estudiado, del cual se ha reportado su gran contribución en el inicio de un sistema anaerobio (Gerardi 2003) (Figura 6).

Para reducir al mínimo los errores de los ensayos para conocer el potencial bioquímico de

metano (PBM) se utilizó una técnica conocida como “degassing” o desgaseado del inóculo. Esta técnica descrita por (Rosato 2017), elimina el gas generado por el inóculo, evitando que sea cuantificado y que posteriormente sea confundido con la cantidad de gas producido por el sustrato. Para realizarla, es necesario pre incubar el inóculo para eliminar su fracción orgánica y así obtener resultados más exactos.

**b. Insumos requeridos**

- **Reactivos:** Solución de  $NaOH$  1.0 M,  $NaHCO_3$  y  $CH_3COOH$ .
- **Materiales:** Biodigestor con capacidad de 5000 ml, probetas de 50 y 100 ml, heces bovinas (inóculo).

**c. Condiciones previas**

- Preparar la solución de  $NaOH$  1.0 M, agregando 40g de NaOH por cada 1000 ml de  $H_2O$ .
- Determinar el contenido de cenizas, SV y ST del inóculo (heces bovinas).
- Construir un biodigestor (5000 ml de capacidad) usando los mismos pasos para la construcción de los BPA.
- Para determinar las cantidades de inóculo y agua tomando como referencia una relación 4:1, se tomó en cuenta lo siguiente:
  - Si la capacidad del biodigestor es de 5000 ml, el “head space” mínimo recomendado es de 20 por ciento, por lo tanto:

$$V_T = V_{ino} + V_{H_2O} \quad \text{(Fórmula 12)}$$

**Donde:**

- $V_T$  : Volumen total
- $V_{ino}$  : Volumen del inóculo
- $V_{H_2O}$  : Volumen de agua

$$4000 \text{ ml} = V_{ino} + V_{H_2O}$$

$$V_{H_2O} = 4V_{ino} \quad \text{(Fórmula 13)}$$

- Reemplazando la fórmula 13 en 12:

$$4000 \text{ ml} = V_{ino} + 4V_{ino}$$

$$4000 \text{ ml} = 5V_{ino}$$

**Entonces:**

$$V_{ino} = 800 \text{ mg}$$

$$V_{H_2O} = 3200 \text{ ml}$$

- La duración del experimento fue por 60 días. Este es el tiempo de retención en el que el inóculo se encontró dentro del biodigestor.

**d. Documentos utilizados**

- DSR-FOR-04 (Anexo 8)

**e. Procedimiento**

- Preparar la mixtura inóculo y agua:
  - Tomar la muestra de inóculo.
  - Pesar el inóculo (800 mg).
  - Homogenizar la muestra de heces bovinas agregando los 3200 ml de agua.
  - Medir el pH.
- Agregar la mezcla (inóculo + agua) dentro del biodigestor.
- Incubar (mismas condiciones que con los BPA)
- Antes de cerrar el biodigestor, burbujear el volumen libre con  $CO_2$  (proveniente de la combinación entre  $NaHCO_3$  y  $CH_3COOH$ ) para generar condiciones anaerobias.
- Conectar el biodigestor a la solución de  $NaOH$  1.0 M y a la probeta de 500 ml, la cual midió la cantidad de agua desplazada (sistema mostrado en la Figura 7).
- Observar y medir la producción diaria de biogás.
- Anotar los resultados en el formato DSR-FOR-04.

**f. Tratamiento de datos**

- Los valores de la producción diaria de biogás del inóculo fueron anotados hasta que se observó que la curva de producción de biogás se detuvo (producción constante por al menos tres días).

**g. Interpretación de resultados**

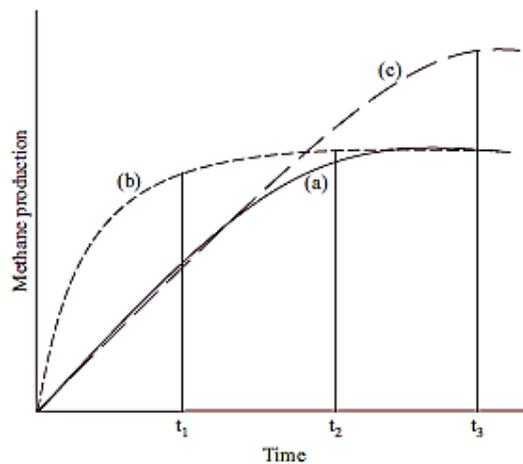
- La producción neta de metano del inóculo debe ser menor al uno por ciento del volumen total acumulado desde el inicio de la prueba (día cero) hasta que esta se detenga o se mantenga constante por tres días para afirmar que este se ha desgasificado.
- El detalle de los resultados obtenidos se puede observar en el Anexo 8.

**3.1.7. Determinación del potencial bioquímico de metano (PBM)**

**a. Fundamento del método**

Este método se utiliza para determinar la biodegradabilidad anaerobia y garantizar la máxima producción de  $CH_4$  de distintos sustratos orgánicos en forma líquida o sólida. Los resultados nos ayudan a estimar el rendimiento que se podría obtener con las mismas condiciones de trabajo en una planta a gran escala de biogás. El ensayo se realiza generalmente en reactores tipo batch cuyo volumen puede variar entre los 100 ml y 2000 ml cargados por una mezcla compuesta de sustrato orgánico, agua y un inóculo anaerobio en condiciones experimentales y operacionales definidas. Entre las condiciones experimentales a considerar tenemos: (a) temperatura, (b) sustrato utilizado, (c) cantidad de inóculo, (d) pH, (e) tiempo de retención, etc. Este método es importante para (a) verificar la cantidad de metano residual, (b) medir el “estado de salud” de las bacterias anaerobias, (c) evaluar diferentes estrategias de operación o (d) evaluar la efectividad de tratamientos previos que nos ayuden a tomar decisiones sobre el funcionamiento de la planta de biogás. La duración del ensayo está sujeto a la biodegradabilidad del sustrato, por lo que no se puede establecer un periodo fijo. Sin embargo, en la bibliografía se reporta que a los 30 días inicia la fase de estabilización y la producción teórica empieza entre los 30 y 60 días posteriores. En esta etapa se estima que se genera aproximadamente el 90 por ciento de la producción teórica (Angelidaki and Sanders 2004, Angelidaki *et al.* 2009). La literatura indica que el PBM se expresa en términos de SV o DQO para estandarizar los resultados, debido a que el sustrato utilizado puede tener un mayor o menor contenido de humedad (Rosato 2017). Los resultados obtenidos en las pruebas de PBM dependen principalmente de: (a) el sustrato utilizado, (b) los tiempos de experimentación y (c) el pretratamiento del inóculo (desgaseado).

Se han identificado tres tipos de gráficos para los resultados de los PBM (Figura 9). La curva (a) es el resultado de que el pretratamiento no se ha realizado o no trae beneficios adicionales a la prueba. La curva (b) nos indica que el pretratamiento incrementa la tasa de biodegradación del sustrato lo cual puede traer como beneficios una reducción en el tamaño del biodigestor o una mayor cantidad de entrada de sustrato. Finalmente, en la curva (c) el pretratamiento ocasiona que se incremente la producción de biogás durante un periodo de tiempo más prolongado.



**Figura 9: Curvas de los resultados más comunes de las pruebas PBM**

Fuente: Tomado de Akunna (2018):70

Si la muestra es muy heterogénea tenemos dos opciones: (a) diseñar una prueba que pueda recibir una gran cantidad de sustrato o de lo contrario para mejorar la representatividad (b) realizar varias pruebas de laboratorio independientes cuyos resultados sean analizados estadísticamente (promedio y dispersión de los valores de BMP, etc.)

#### **b. Condiciones previas**

- Determinar el contenido de cenizas, SV y ST del sustrato.
- Pre incubar o desgasificar el inóculo.
- Homogenizar la muestra, debido a la naturaleza heterogénea del sustrato.
- El agua utilizada fue la misma para todos los ensayos, lo cual garantiza que todos estén afectados por la misma variación externa.
- La duración del experimento fue por 60 días, valor del tiempo de retención que el sustrato se encontró dentro de los BPA.

- Determinar la cantidad de agua.
- Determinar la cantidad de inóculo (la cantidad fue la misma en todos los ensayos para reducir el error estadístico) (Anexo 9).
- Los ensayos fueron por triplicado y los blancos por duplicado.
- Los blancos o controles fueron cargados con el inóculo desgasificado y agua.
- Determinar la cantidad del sustrato:
  - La cantidad de sustrato e inóculo que fue cargado a cada BPA fue calculado tomando como referencia el ejemplo que se muestra a continuación (Varnero 2012):
    - Si la capacidad del BPA es de 500 ml, se tiene que dejar un espacio donde se colecta el biogás producido por el sustrato llamado “head space”. Este espacio puede variar entre 20 y 50 por ciento del volumen del BPA (Angelidaki et al. 2009).
    - Por lo tanto, la mezcla entre el sustrato + inóculo + agua es de 250 ml (50 por ciento).

$$SV_{sus} \rightarrow 32\% SV = 0.32$$

$$SV_{ino} \rightarrow 7\% SV = 0.07$$

**Donde:**

$SV_{sus}$  : Sólidos volátiles del sustrato

$SV_{ino}$  : Sólidos volátiles del inóculo

$$\frac{Q_{ino}}{Q_{sus}} = 3 = \frac{V_{ino} * SV_{ino}}{V_{sus} * SV_{sus}} \quad \text{(Fórmula 14)}$$

**Donde:**

$Q_{ino}$  : Cantidad de inóculo

$Q_{sus}$  : Cantidad de sustrato

$V_{ino}$  : Volumen de inóculo

$V_{sus}$  : Volumen de sustrato

**Si:**

$$V_{ino} + V_{sus} = 500 \text{ ml} \quad \text{(Fórmula 15)}$$

**Entonces:**

$$V_{sus} = 500 \text{ ml} - V_{ino} \quad (\text{Fórmula 16})$$

- Reemplazando la fórmula 16 en 14:

$$3 = \frac{V_{ino} * SV_{ino}}{500 \text{ ml} - V_{ino}}$$

$$3 * (500 \text{ ml} - V_{ino}) * SV_{sus} = V_{ino} * SV_{ino}$$

$$3 * 500 \text{ ml} * SV_{sus} = V_{ino} * SV_{ino} + 3V_{ino} * SV_{sus}$$

$$V_{ino} = \frac{3 * 500 \text{ ml} * SV_{sus}}{SV_{ino} + 3SV_{sus}} \quad (\text{Fórmula 17})$$

- Reemplazando  $V_{sus}$  y  $V_{ino}$  en la fórmula 14:

$$V_{ino} = \frac{3 * 500 \text{ ml} * 0.32}{0.07 + 3(0.32)}$$

**Entonces:**

$$V_{ino} = 466 \text{ ml}$$

$$V_{sus} = 34 \text{ ml}$$

- La determinación del inóculo, agua y sustrato y la carga final de los BAP se muestra en el Anexo 9.

**c. Insumos requeridos**

- **Reactivos:** Solución de  $NaOH$  1.0 M,  $NaHCO_3$  y  $CH_3COOH$ .
- **Materiales:** Probetas de 50 ml y 100 ml, balanza, bagueta, embudo, heces caninas y los BPA.

**d. Documentos utilizados**

- DSR-FOR-05 (Anexo 10)

**e. Procedimiento**

- Tomar la muestra de HC y homogeneizarla agregando agua en una relación 4:1.
- Agregar la mezcla de sustrato, agua e inóculo en los BPA según las cantidades determinadas para cada BPA (Anexo 9).

- Medir el pH
- Agitar la mezcla con una varilla.
- Cerrar herméticamente los BPA.
- Antes de cerrar el biodigestor, burbujear el volumen libre con  $CO_2$  (proveniente de la combinación entre  $NaHCO_3$  y  $CH_3COOH$ ) para generar condiciones anaerobias.
- Tomar la medida del agua desplazada todos los días (figura 7 y 8) a la misma hora durante el tiempo que duren los ensayos.
- Anotar los datos de la temperatura ambiental diaria.
- Copiar los datos en una hoja de cálculo.

**f. Tratamiento de datos y obtención de resultados**

- Los valores de la producción diaria de biogás del inóculo fueron anotados en el formato DSR-FOR-05 durante 60 días.
- Para el cálculo del PBM se utilizó la siguiente fórmula:

$$PBM = \frac{(PM - PB)}{SV} \quad \text{(Fórmula 18)}$$

**Donde:**

**PM** : Promedio de las muestras  
**PB** : Promedio de los blancos

- Los valores obtenidos fueron graficados y mostrados en los resultados.

### **3.2. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS BPA CON PRESENCIA DE BOLSAS PLÁSTICAS**

#### **3.2.1. Caracterización de las bolsas plásticas**

##### **a. Fundamento**

Las bolsas plásticas presentan ciertas características como: (a) ligereza, (b) posibilidad de reutilizarlas, (c) capacidad de cargar objetos pesados e (d) impermeabilidad. Estas características les han permitido ser utilizadas como envases y embalajes tanto a nivel doméstico como industrial. Las bolsas plásticas cumplen la función de transportar, proteger y conservar su contenido. Esto también ha permitido que sean utilizadas para la disposición

de los RS. Sin embargo, posteriormente son colocadas dentro de los residuos comunes representando una barrera para la biodegradación de la MO, aunque esto depende principalmente de su grosor, tamaño y tipo de plástico.

**b. Condiciones previas**

- Determinar las bolsas plásticas más comunes que son utilizadas para la disposición de RS de origen doméstico en el distrito de Chupaca.

**c. Insumos requeridos**

- **Materiales:** Cámara, bolsas de plástico.

**d. Procedimiento**

- Seleccionar cuatro tipos de bolsas plásticas que sean las más utilizadas para la disposición de RS.
- Dividirlas en cuatro categorías (Figura 10):
  - **Bolsa de plástico tipo I:** Bolsa de plástico rectangular simple de un solo uso. Este tipo de bolsa es utilizada comúnmente para el recojo las heces caninas.
  - **Bolsa de plástico tipo II:** Bolsa plástica de asa de color blanca utilizada comúnmente para contener y transportar distintos productos.
  - **Bolsa de plástico tipo III:** Bolsa plástica gruesa para basura de color negro, utilizada principalmente para la disposición de la basura doméstica.
  - **Bolsa de plástico tipo IV:** Bolsa de asa auto categorizada como de plástico compostable, dispensada en distintas tiendas comerciales. Este tipo de bolsa plástica según las normas internacionales, al menos el 90% de la parte orgánica debe convertirse en CO<sub>2</sub> (Sanchez and Sanz 2019).

**e. Tratamiento de datos**

- Estas categorías (creadas por el autor del presente trabajo con la finalidad de facilitar el desarrollo de los ensayos) fueron utilizadas para diferenciar las bolsas utilizadas en los ensayos de PBM.

**Tipo I**



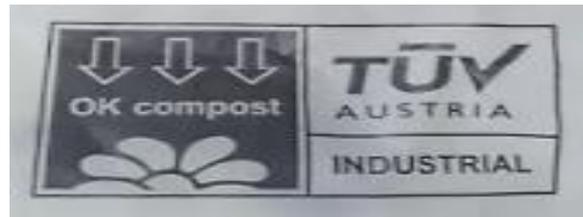
**Tipo II**



**Tipo III**



**Figura 10: Bolsas plásticas de tipo I, II, III y IV**



**Figura 11: Sello de certificación “OK COMPOST” presentes en las bolsas de tipo IV**

### **3.2.2. Determinación del PBM con presencia de bolsas plásticas**

#### **a. Fundamento del método**

En la actualidad existen diferentes tipos de bolsas de plástico. Las diferencias principalmente se caracterizan por presentar diferente grosor, composición y cantidad de plástico. Estas características propias de las bolsas plásticas pueden afectar la biodegradabilidad del sustrato dentro de los biodigestores. Por lo tanto, para conocer el impacto sobre la producción de biogás, es necesario evaluar su PBM. Para esto, se utilizó la misma metodología empleada en la sección 3.1.7 con la diferencia de que en esta oportunidad el PBM fue calculado con la presencia de bolsas plásticas.

#### **b. Condiciones previas**

- Construir los BPA donde para realizar los ensayos.

- Categorizar las bolsas de plástico en los tipos I, II, III y IV.
- Conocer el PBM de las heces caninas (resultados de los ensayos de la sección 3.1.7.)
- Pre incubar o desgasificar el inóculo.
- Determinar la carga de sustrato, inóculo y agua que fueron cargados en los BPA.
- Los blancos o controles fueron aquellos ensayos en los que no se ejerció presión mecánica con la bagueta o varilla.
- Las series fueron por triplicado y los blancos por duplicado.
- La determinación del inóculo, agua y sustrato y la carga final de los BAP se muestra en el Anexo 14.
- Utilizar las mismas condiciones físicas y químicas que en el experimento de la sección 3.1.7.
- Duración del ensayo: 60 días.

**c. Insumos requeridos**

- **Reactivos:** Solución de  $NaOH$  1.0 M,  $NaHCO_3$  y  $CH_3COOH$ .
- **Materiales:** Probetas de 50 ml y 100 ml, balanza, bolsas de plástico (Tipo I, II, III y IV), bagueta, embudo, heces caninas y BPA.

**d. Documentos utilizados**

- DSR-FOR-06 (Anexo 15)

**e. Procedimiento**

- Tomar la muestra de HC y homogeneizarla agregando agua en una relación 4:1.
- Colocar el sustrato homogeneizado en una bolsa plástica teniendo en consideración la categorización de estas (Bolsa de plástico tipo I, II, III y IV).
- Agregar la mezcla de sustrato + agua + bolsa plástica en los BPA según las cantidades determinadas en el Anexo 14.
- Agregar el inóculo según las cantidades determinadas en el Anexo 14.
- Con una bagueta o varilla agitar la mezcla produciendo presión mecánica para rasgar las bolsas plásticas dentro del BPA.
- Antes de cerrar los BPA, se burbujeó el volumen libre con  $CO_2$  (proveniente de la combinación entre  $NaHCO_3$  y  $CH_3COOH$ ) para generar las condiciones

anaerobias.

- Cerrar herméticamente los BPA.

**f. Tratamiento de datos y obtención de resultados**

- Los valores de la producción diaria de biogás fueron anotados en el formato DSR-FOR-06 durante 60 días.
- Se utilizó la Fórmula 18 para calcular el PBM.
- Los valores obtenidos fueron graficados y mostrados en los resultados.

**3.2.3. Análisis estadístico de las pruebas PBM**

**a. Fundamento**

El análisis de regresión lineal es una herramienta estadística que busca encontrar la asociación entre una variable dependiente y una independiente. Esto significa que esta prueba estadística mide la respuesta de la variable dependiente a los cambios de la variable independiente dando como resultado una ecuación que describe la asociación estadística entre estas dos variables. Para el presente trabajo se buscó conocer como la temperatura ambiental (variable independiente) puede afectar la producción diaria de biogás (variable dependiente), utilizando los resultados obtenidos en las secciones 3.1.7 y 3.2.2. El análisis de regresión lineal se desarrolló en el programa R statistics © versión 4.1.1.

**b. Condiciones previas**

- Determinar la producción diaria de biogás de las pruebas de PBM en los BPAs.

**c. Procedimiento**

- Definir las variables:
  - Variable dependiente – Producción diaria de biogás
  - Variable independiente – Temperatura ambiental promedio
- Importar los datos de producción diaria de biogás y temperatura promedio de Microsoft Excel ® versión 2016 (Anexo 10 y 15) al programa R statistics © versión 4.1.1.
- Crear un diagrama de dispersión utilizando la biblioteca “ggplot2”.
- Calcular la correlación entre las variables utilizando “cor”

- Crear el modelo de regresión lineal con la función “lm”.

**d. Tratamiento y obtención de resultados**

- Los valores de la asociación entre las variables se muestran en las secciones 4.1.2 y 4.2.2 de resultados.
- Los resúmenes de los modelos de regresión lineal para las pruebas BH1, BH2, BH3, BP1, BP2, BP3 y BP4 se muestran en las Tablas 10 y 12.

### **3.3. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN ÓPTIMO DEL BIODIGESTOR PARA EL TRATAMIENTO DE LAS HECES CANINAS DEL DISTRITO DE CHUPACA**

#### **3.3.1. Determinación de la producción anual de heces caninas**

**a. Fundamento**

Según el último censo realizado por el (Instituto Nacional de Estadística e Informática 2018), se determinó que la población de la provincia de Chupaca era de 52988 habitantes. Para el distrito de Chupaca, donde se propone instalar el biodigestor, la población era de 16024 habitantes, de los cuales 11813 pertenecían a la población urbana en 3875 viviendas particulares. En el distrito de Chupaca no se tiene un registro de la cantidad de PD, sin embargo, se puede hacer una estimación de su población en base a los datos estadísticos asumiendo que esta tendencia se mantiene. Además, se tuvo en consideración que un perro de mediano tamaño genera aproximadamente 600 gr/heces/día, representando 18 kg/heces/mes (Zúñiga and Caro 2020). En función a estos datos se puede determinar la producción diaria de sustrato.

**b. Tipo de muestra**

- **Determinación de la población canina**
  - La estimación de la población de PD se tomó en base a los datos obtenidos en las encuestas realizadas por Compañía peruana de estudios de mercados y opinión pública 2018, IPSOS 2014 y al censo nacional del 2018.
    - **Viviendas particulares:** 3875.
    - **Probabilidad de presencia de animal en vivienda:**  $p = 0.62$
    - **Probabilidad de que la mascota sea un perro:**  $p = 0.79$

- **Tasa de crecimiento intercensal (2005 – 2014):**  $p = 0.03$

- El año 2018 fue considerado como el año cero en función de los resultados censales. A partir de este año se calculó la población de PD durante un periodo de tiempo de quince años (2018 – 2033) con una tasa de crecimiento del tres por ciento anual.

**c. Procedimiento**

- Crear una base de datos en Microsoft Excel ® versión 2016.
- Determinar la población estimada de PD en base a las viviendas urbanas.
- Usar la población de PD en el periodo de tiempo 2018 – 2033 y multiplicarla por la generación de heces promedio por cada PD.
- Una vez que se tiene la generación per cápita diaria, calcular la generación de residuos total y anual.

**d. Tratamiento de datos y obtención de resultados**

- Los resultados obtenidos fueron resumidos en una tabla (Tabla 14), en la que se muestra la información proyectada para cada año de funcionamiento del biodigestor.

**3.3.2. Determinación de los parámetros de funcionamiento del biodigestor**

**a. Fundamento**

Para el diseño del biodigestor donde se desarrolla el proceso de la DA, se tienen que determinar ciertos parámetros que aseguren su adecuado rendimiento. Estos fueron determinados en base a la población de PD calculados en la sección 3.3.1 para el año 15 (2033). Su diseño fue considerando un aumento en la población de PD proporcionalmente al paso del tiempo ( $p = 0.03$ ). Debido a que la población no es estática y mientras no se tenga un plan de control de la población canina, se asumió que esta sigue aumentando con el paso de los años.

**b. Condiciones previas**

- Los parámetros de diseño se basaron en los datos calculados para el año 15 (2033) mostrados en la Tabla 14.

**c. Procedimiento**

- **Cálculo del volumen de agua**

- Como se mencionó previamente, la cantidad de agua que se adiciona al biodigestor es importante para mantener la movilidad de los microorganismos y así asegurar un rendimiento adecuado dentro del biodigestor. Para esto se tomó en consideración la densidad promedio de las heces ( $1000 \text{ kg} / \text{m}^3$ ) y la relación 4:1 considerada en la sección 3.1.4.

- **Volumen de carga diaria (VCD)**

- Cuando se conoce la cantidad estimada de HC (sustrato) que se genera diariamente y la cantidad de agua necesaria para su procesamiento, se puede calcular cuánto representa la mezcla de agua y sustrato que es cargado al biodigestor diariamente utilizando la siguiente fórmula:

$$VCD = V_{HC (diaria)} + V_{H_2O} \quad \text{(Fórmula 19)}$$

**Donde:**

$V_{HC (diaria)}$  : Volumen de HC que se genera diariamente

$V_{H_2O}$  : Volumen de agua

- **Volumen de carga orgánica (CO)**

- Esta media representa la cantidad de MO o carga orgánica de SV que ingresan al biodigestor diariamente. Esta se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$CO = VCD * ST * SV \quad \text{(Fórmula 20)}$$

**Donde:**

**ST** : Porcentaje de sólidos totales del sustrato

**SV** : Porcentaje de sólidos volátiles del sustrato

- **Volumen del biodigestor ( $V_{dig}$ )**

- El tiempo mínimo recomendado que el sustrato debe encontrarse dentro del biodigestor (considerando las condiciones ambientales donde se desarrollan los experimentos) es de 30 días (Akunna 2018). Por lo tanto, se determinó un

volumen estimado en base al VCD del año 15 (producción máxima) utilizando la siguiente fórmula:

$$V_{dig} (m^3) = VCD (m^3 / día) * t (día) \quad (\text{Fórmula 21})$$

**Donde:**

**t** : Tiempo de retención mínimo en días

- **Velocidad de carga orgánica (VCO)**

- La VCO nos indica la fracción orgánica que es degradada, la cual está expresada en los SV agregados diariamente por unidad de volumen del biodigestor. Se calculó en base a la siguiente fórmula (Akunna 2018):

$$VCO (kg SV / m^3 día) = \frac{CO (kg SV / día)}{V (m^3)} \quad (\text{Fórmula 22})$$

**Donde:**

**V** : Volumen del biodigestor en m<sup>3</sup>

- **Volumen líquido del biodigestor ( $V_{liq}$ )**

- El volumen líquido del biodigestor representa la mezcla del sustrato + agua. Para representarlo, se utilizó la siguiente fórmula (Rosato 2017):

$$V_{liq} (m^3) = \frac{CO (kg SV / día)}{VCO (kg SV / m^3 día)} \quad (\text{Fórmula 23})$$

- El volumen calculado fue utilizado para elaborar el diseño del biodigestor.

- **Cálculo del tiempo de retención hidráulico (TRH)**

- Para determinar el tiempo de retención hidráulico se utilizó la siguiente fórmula (Rosato 2017):

$$TRH = \frac{V_{liq} (m^3)}{VCD (m^3 / día)} \quad (\text{Fórmula 24})$$

- **Temperatura**

- La temperatura media anual en el distrito de Chupaca es de 12 °C. Por lo tanto, el biodigestor es psicrófilo (entre 10 °C a 20 °C).

**d. Tratamiento de datos y obtención de resultados**

- Los datos obtenidos son presentados en los resultados. Estos nos indican la información de entrada y salida del funcionamiento del biodigestor.

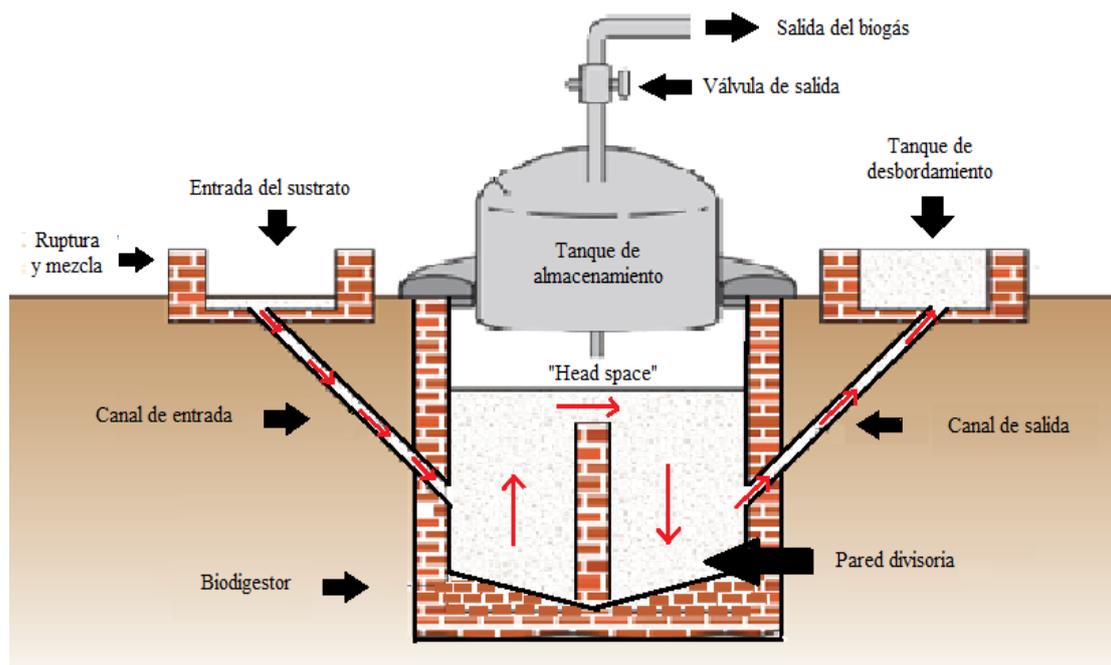
### **3.3.3. Dimensionamiento del biodigestor**

**a. Fundamento**

En esta etapa se eligió una propuesta de diseño del biodigestor y las medidas necesarias para procesar la cantidad de HC estimadas de la información obtenida en las secciones 3.3.1 y 3.3.2. El tipo y diseño de biodigestor utilizado fue determinado en base al tipo de sustrato utilizado. El flujo del sustrato es vertical, lo cual significa que el biodigestor es cargado en la parte superior y se va depositando al fondo a medida que este es digerido. Si bien este sistema es más económico y simple, a diferencia de un biodigestor de flujo horizontal, el sustrato no necesariamente se mantiene la cantidad de tiempo adecuada para su digestión, disminuyendo su rendimiento (Martí-Herrero 2008). El diseño del biodigestor es de tipo Gobar (Figura 12). Este tipo de biodigestor tiene un diseño simple y puede ser adaptado desde niveles básicos y económicos a sistemas más sofisticados y de mayor volumen. El biogás es almacenado en la parte superior del biodigestor por la presión que ejerce el gas en la zona del “head space”. Para su construcción solo es necesario tener personal que sepa de albañilería y excavación (Pullen 2015).

**b. Condiciones previas**

- Determinar los parámetros de funcionamiento mínimo y máximo del biodigestor:
  - Determinar la producción diaria de HC.
  - Determinar el volumen de agua.
  - Determinar el volumen de carga diaria.
  - Determinar el volumen de carga orgánica.
  - Determinar el volumen líquido del biodigestor.
  - Determinar el tiempo de retención.



**Figura 12: Diseño del biodigestor tipo Gobar**

Fuente: Adaptado de Pullen (2015)

**c. Procedimiento**

- Calcular la capacidad máxima del biodigestor y otros factores para su funcionamiento.
- Determinar las longitudes para el dimensionamiento del biodigestor.
- Graficar el diseño del biodigestor con las medidas calculadas.

**d. Tratamiento de datos y obtención de resultados**

- El diseño y las medidas de la propuesta para la construcción del biodigestor de tipo Gobar son presentados en los resultados.

**3.4. DETERMINACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y SU POTENCIAL ENERGÉTICO**

**3.4.1. Determinación del potencial energético**

**a. Fundamento**

La producción mensual de biogás que es generado por el biodigestor puede ser estimado en base a los resultados de los ensayos donde se determinó el PBM de las HC con presencia de

las bolsas de plástico. Este rendimiento por lo general es calculado en base a los metros cúbicos de gas que genera cada tonelada de sustrato. Sin embargo, la cantidad de biogás generado no necesariamente produce la misma cantidad de energía, debido a que la composición del biogás varía en función al sustrato utilizado (Shen *et al.* 2015). Sin embargo, se asumió que el potencial calorífico del biogás es de 23 000 KJ o 23 MJ por cada metro cúbico (Akunna 2018).

**b. Condiciones previas**

- Determinar la producción mensual de HC.
- Determinar el contenido de humedad de las HC.
- Determinar el contenido de SV y ST de las HC.
- Determinar el PBM de las HC.

**c. Procedimiento**

- **Determinación de la producción mensual de biogás**
  - En base a los resultados obtenidos de la sección 3.1.7, 3.2.2 y 3.3.2, estimar la producción de biogás para:
    - HC (“head space” 20%, 35% y 50%)
    - HC + bolsa de plástico tipo I
    - HC + bolsa de plástico tipo II
    - HC + bolsa de plástico tipo III
    - HC + bolsa de plástico tipo IV
- **Determinación del potencial energético**
  - Una vez obtenida la producción mensual de biogás, se multiplicó por el potencial calorífico de biogás 23 MJ/  $m^3$ .

**d. Tratamiento de datos y obtención de resultados**

- Los resultados de la estimación de la producción mensual del biogás se presentan en la Tabla 17 y la determinación del potencial energético en la Tabla 18.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE BIOGÁS PRODUCIDO POR BIODIGESTORES ANAEROBIOS A PEQUEÑA ESCALA (BPA)

En esta sección se muestran los resultados de los ensayos para determinar el PBM del sustrato (heces caninas) en los BPA con distintos volúmenes de carga (Tabla 8). Los ensayos BH1, BH2 y BH3 tuvieron un 50, 35 y 20 por ciento de “head space” del volumen total del BPA respectivamente.

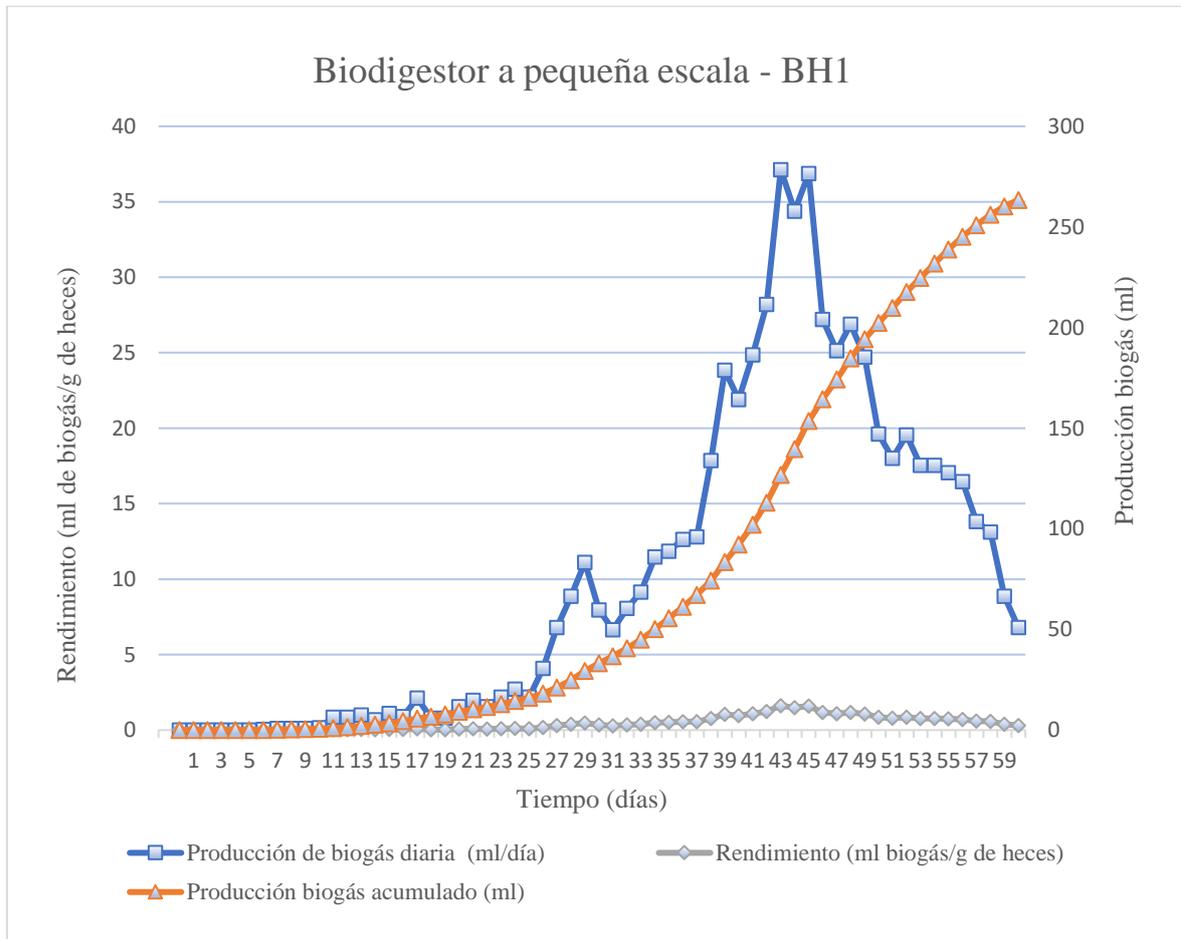
**Tabla 8: Resumen de la carga final para el cálculo del PBM**

Potencial bioquímico de metano (BPM)		Tipo de BPA utilizado	Volumen inóculo	Volumen sustrato	Agua	Carga total del BPA
<b>BH1</b>	Rep 1	5	34.45	23.04	229.96	287.45
	Rep 2	5	34.45	23.04	229.96	287.45
	Rep 3	5	34.45	23.04	229.96	287.45
<b>Controles</b>	Rep 1	5	34.45	0.00	137.79	172.24
	Rep 2	5	34.45	0.00	137.79	172.24
<b>BH2</b>	Rep 1	4	27.62	38.48	264.39	330.49
	Rep 2	4	27.62	38.48	264.39	330.49
	Rep 3	4	27.62	38.48	264.39	330.49
<b>Controles</b>	Rep 1	4	33.11	0.00	132.44	165.55
	Rep 2	4	33.11	0.00	132.44	165.55
<b>BH3</b>	Rep 1	2	42.11	68.17	441.10	551.37
	Rep 2	2	42.11	68.17	441.10	551.37
	Rep 3	2	42.11	68.17	441.10	551.37
<b>Controles</b>	Rep 1	2	42.11	0.00	168.43	210.53
	Rep 2	2	42.11	0.00	168.43	210.53

Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.1. Producción de biogás de las pruebas BH1, BH2 y BH3

En la Figura 13 se grafican las curvas correspondientes al resultado promedio de la producción diaria, la producción acumulada y rendimiento del biogás obtenido tras los ensayos de la prueba BH1.



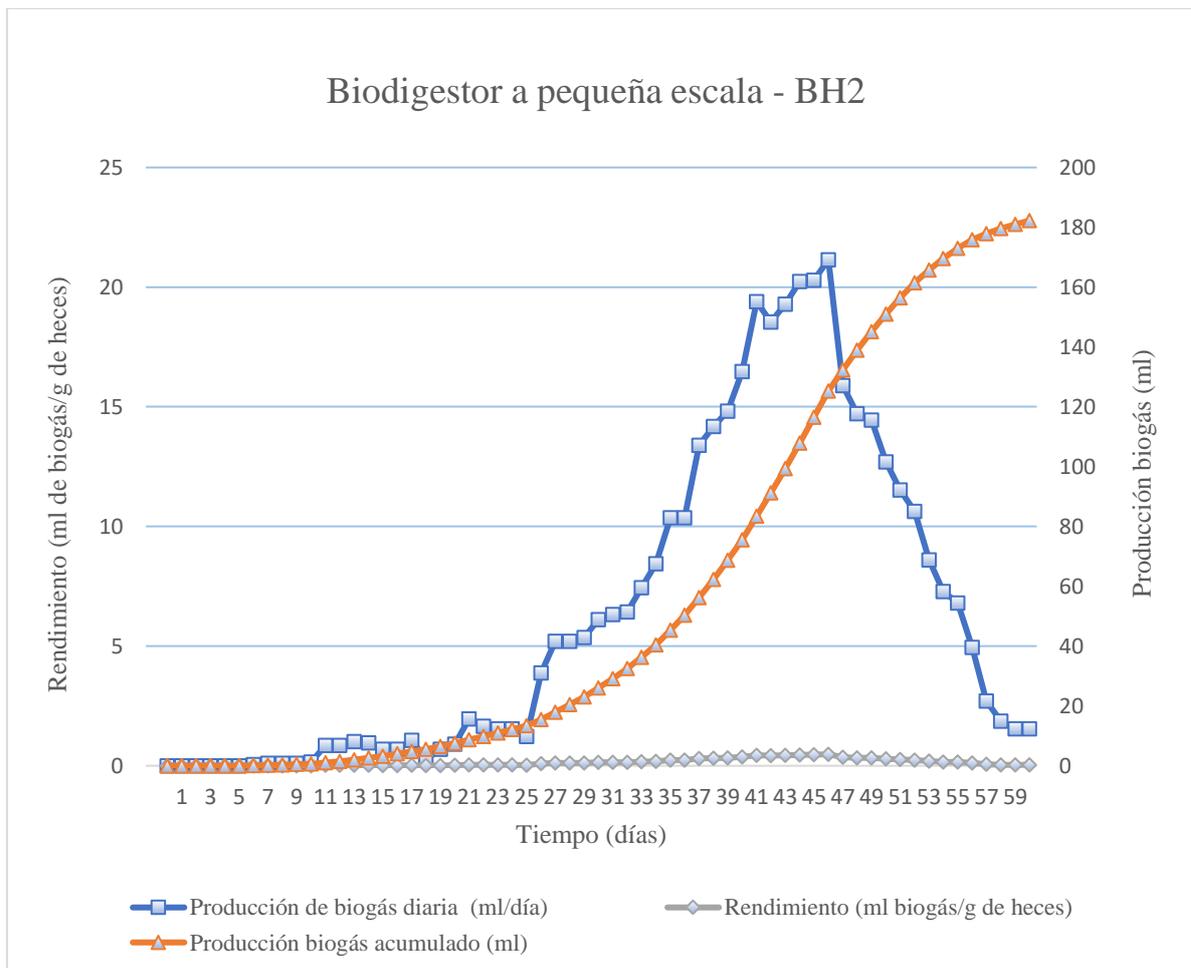
**Figura 13: Producción diaria, acumulada y rendimiento del ensayo BH1**

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 13 se observa que la producción máxima acumulada para este ensayo fue de 263.47 ml de biogás. Así mismo, se muestra que la producción máxima de biogás para esta prueba se produjo entre los días 39 y 49. La producción diaria máxima de biogás fue de 37.13 ml de biogás y el rendimiento máximo fue de 1.61 ml de biogás por cada gr de heces caninas, el cual fue alcanzado el día 43. El promedio de rendimiento diario fue de 0.45 ml de biogás / gr heces caninas / día. Se puede observar que tiene una etapa de arranque y adaptación hasta el séptimo día donde inicia la producción del biogás. La parte inicial de la curva de producción de biogás se asemeja a la curva (b) de la Figura 9. Sin embargo, el

crecimiento no es continuo, posiblemente por los cambios de temperatura ambiental registrados durante los días en que se llevó a cabo el experimento, aunque posteriormente se reanuda. Esto indica que el pretratamiento ayuda a mejorar la producción de biogás que para este ensayo.

En la Figura 14 se grafican las curvas correspondientes al resultado promedio de la producción diaria, la producción acumulada y rendimiento del biogás obtenido tras los ensayos de la prueba BH2.



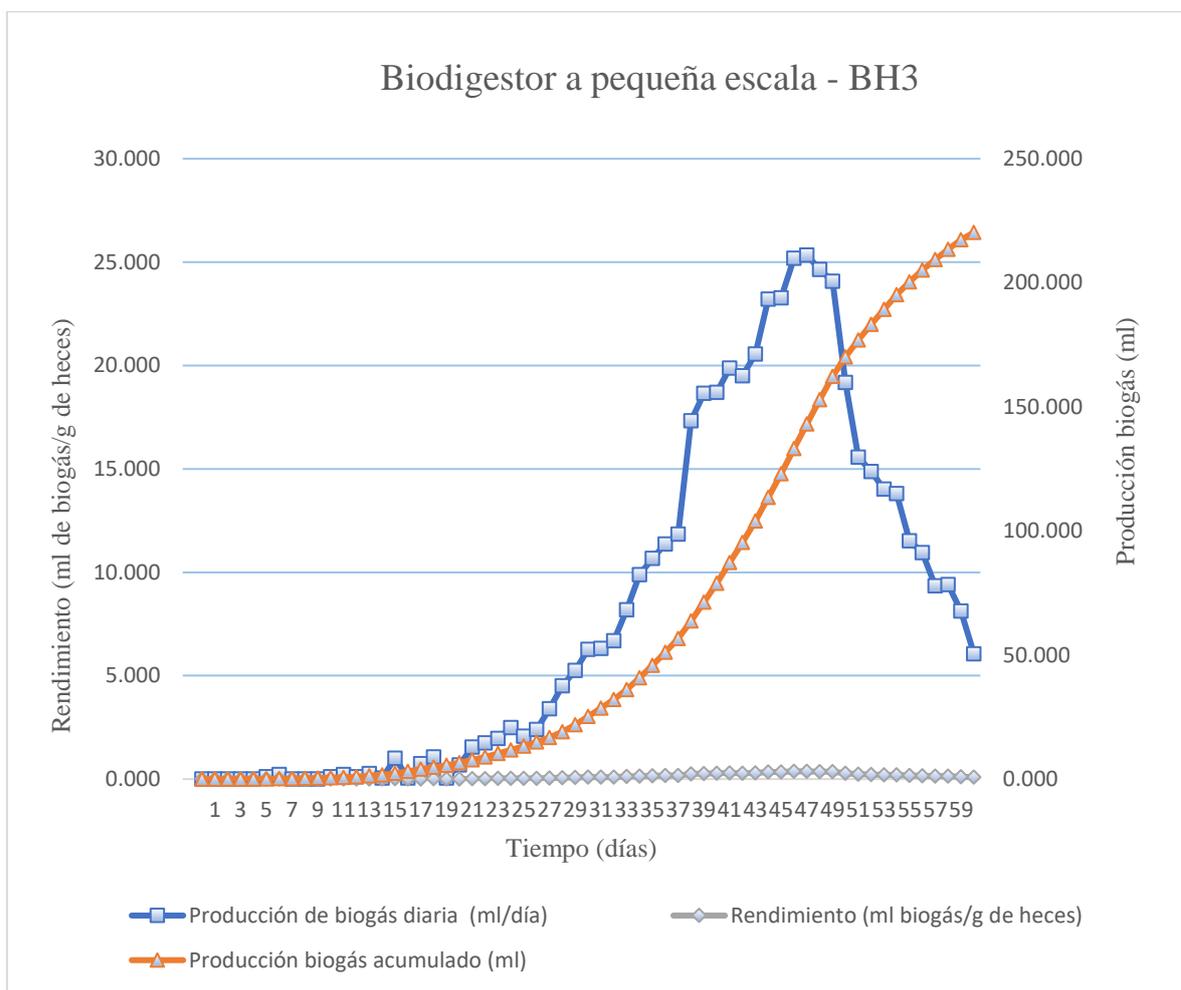
**Figura 14: Producción diaria, acumulada y rendimiento del ensayo BH2**

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 14 se observa que la producción máxima acumulada para este ensayo fue de 182.27 ml de biogás. Así mismo, se muestra que la producción máxima de biogás para esta prueba se produjo entre los días 40 y 46. La producción diaria máxima de biogás fue de 21.14 ml de biogás y el rendimiento máximo fue de 0.48 ml de biogás por cada gramo de

heces caninas, el cual fue alcanzado el día 46. El promedio de rendimiento diario fue de 0.14 ml de biogás / gr heces caninas / día. Se puede observar que tiene una etapa de arranque y adaptación hasta el octavo día donde inicia la producción del biogás. La curva de producción de biogás se asemeja a la curva (b) de la Figura 9, lo cual nos indica que el pretratamiento ayuda a mejorar la producción de biogás para este ensayo.

En la Figura 15 se grafican las curvas correspondientes al resultado promedio de la producción diaria, la producción acumulada y rendimiento del biogás obtenido tras los ensayos de la prueba BH3.



**Figura 15: Producción diaria, acumulada y rendimiento del ensayo BH3**

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 15 se observa que la producción máxima acumulada para este ensayo fue de 220.33 ml de biogás. Así mismo, se muestra que la producción máxima de biogás para esta

prueba se produjo entre los días 41 y 50. La producción diaria máxima de biogás fue de 25.34 ml de biogás y el rendimiento máximo fue de 0.37 ml de biogás por cada gr heces caninas, el cual fue alcanzado el día 47. El promedio de rendimiento diario fue de 0.12 ml de biogás / gr heces caninas / día. Se puede observar que tiene una etapa de arranque y adaptación hasta séptimo día donde inicia la producción del biogás. La curva de producción de biogás no se asemeja necesariamente a la curva (a) o a la curva (b) de la Figura 9. Por lo tanto, no se puede afirmar que el pretratamiento contribuye en mejorar la producción de biogás para este ensayo.

Para los experimentos realizados en la primera parte, donde la diferencia entre los ensayos BH1, BH2 y BH3 fue el volumen de espacio disponible en el que se almacena el biogás producido o también conocido como “head space”. Se puede observar que en todas las pruebas no hay producción de biogás los primeros días. A partir del día cuatro (BH3) y día cinco (BH1 y BH2) el biogás empieza a producirse, esto gracias a la desgasificación previa del inóculo que permitió que los tiempos para la estabilización de los microorganismos responsables de la DA sean cortos. Sin embargo, durante los días posteriores la producción es mínima, probablemente porque los experimentos se realizaron en la estación en la que se dan los picos de temperatura ambiental más bajos del año. La mayor producción de biogás para los ensayos BH1, BH2 y BH3 empezó alrededor del día 25 donde el incremento del rendimiento se dio de forma exponencial hasta día 43 para la prueba BH1 y el día 46 para la prueba BH2 y BH3. Durante estos días los microorganismos presentes utilizaron la mayor cantidad del sustrato, por lo que en los días posteriores la producción empieza a decaer hasta el día 70 donde finaliza el experimento.

Las curvas de producción diaria de biogás de las pruebas BH1, BH2 y BH3 tienen un patrón similar a la curva (a) de la Figura 9. En términos generales esto nos puede indicar que el tratamiento previo realizado al inóculo (desgaseado de heces bovinas) no ha contribuido a mejorar la producción de biogás. Sin embargo, teniendo en cuenta que la bibliografía (Angelidaki and Sanders 2004, Angelidaki *et al.* 2009) indica que la etapa de arranque y estabilización se produce durante los primeros 30 días, se pudo observar que la producción de biogás de los tres tratamientos inició alrededor del día 11. Por lo tanto, podemos indicar que para este estudio el tratamiento previo sí ayudó en disminuir los tiempos de arranque y adaptación de los microorganismos para la producción de biogás.

La Tabla 9 resume los resultados obtenidos para la producción diaria máxima, rendimiento máximo, promedio de rendimiento diario, producción máxima acumulada y rendimiento total del biogás producido en los ensayos BH1, BH2 y BH3. El detalle de los datos obtenidos puede observarse en el Anexo 10. En la Tabla 9 se puede observar que la producción diaria máxima (37.13 ml de biogás), rendimiento máximo (1.61 ml biogás / gr de HC), promedio de rendimiento diario (0.45 ml biogás / gr de HC / día), producción máxima acumulada (263.47 ml) y rendimiento total (11.43 ml biogás / gr de HC) del biogás se obtuvieron en la prueba BH1. Esto significa que la mayor producción de biogás se generó cuando se utilizó el 50 por ciento de la capacidad total del BPA. En función a estos resultados se consideraron las medidas y pesos utilizados en la prueba BH1 para continuar con la siguiente etapa de los experimentos con la presencia de las bolsas plásticas.

**Tabla 9: Resumen de los resultados para los ensayos BH1, BH2 y BH3**

Ensayo	Producción máxima de biogás diaria (ml biogás)	Rendimiento máximo (ml biogás /gr de heces)	Promedio de rendimiento diario (ml biogás / gr de heces /día)	Producción máxima acumulada (ml biogás)	Rendimiento total (ml biogás /gr de heces)
<b>BH1</b>	37.13	1.61	0.45	263.47	11.43
<b>BH2</b>	21.14	0.48	0.14	182.27	4.12
<b>BH3</b>	25.34	0.37	0.12	220.33	3.23

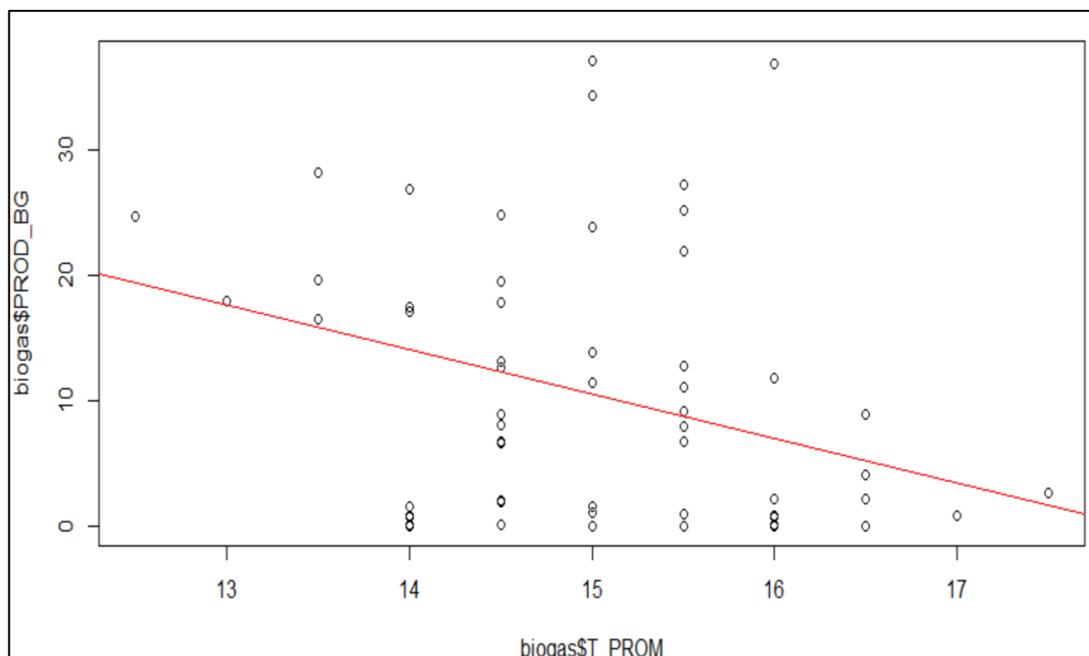
Fuente: Elaboración propia

Si comparamos los resultados obtenidos en el presente trabajo con otros estudios similares podemos mencionar que: (a) Okoroigwe *et al.* en el 2009 y en el (b) 2014 utilizaron las HC como sustrato en biodigestores de 50 litros de capacidad. En el 2009 sus resultados mostraron que siete kg de HC generaron 178 litros de biogás, lo cual significa que cada kilo de HC generó 25.42 litros de biogás. Mientras que en el estudio del 2014 el rendimiento fue de 28.57 litros de biogás por cada kilo de HC. (c) Abarza en el 2014 obtuvo un rendimiento de 32.03 litros de biogás por cada kilogramo de HC en un periodo de 97 días. Estos valores fueron muy superiores a los reportados en el presente estudio, donde el rendimiento máximo fue de 11.43 litros de biogás por cada kilogramo de HC. El autor considera que la principal diferencia entre los resultados mostrados en el presente estudio y los presentados por Okoroigwe *et al.* (2009) y Okoroigwe, *et al.* (2014) se debe a que las condiciones climáticas en las que se desarrollaron los estudios fueron diferentes. La temperatura media anual de

Nsukka es de alrededor de 30°C, a diferencia de los 12°C de Chupaca. Mientras que Abarza (2014) utilizó una resistencia eléctrica que mantuvo la temperatura de los biodigestores cercanas a los 30 °C. Esto representa que estos ensayos fueron desarrollados bajo condiciones mesófilas (Tabla 1), lo cual hizo que se beneficie la producción de biogás total. Por otra parte (d) Rodríguez y García en el 2017, en condiciones ambientales similares a las empleadas en el presente estudio (ambiente 1 a temperatura de 14 °C) obtuvo un rendimiento de 4.21 litros de biogás por cada kilogramo de HC. El autor considera que la principal diferencia es que Rodríguez y García no utilizaron un inóculo rico en microorganismos metanogénicos que faciliten el proceso de la DA. Otro punto importante a tener en cuenta es que en estos estudios no se utilizó una trampa de  $CO_2$  (Anexo 16), lo cual probablemente hubiera disminuido la cuantificación de biogás total.

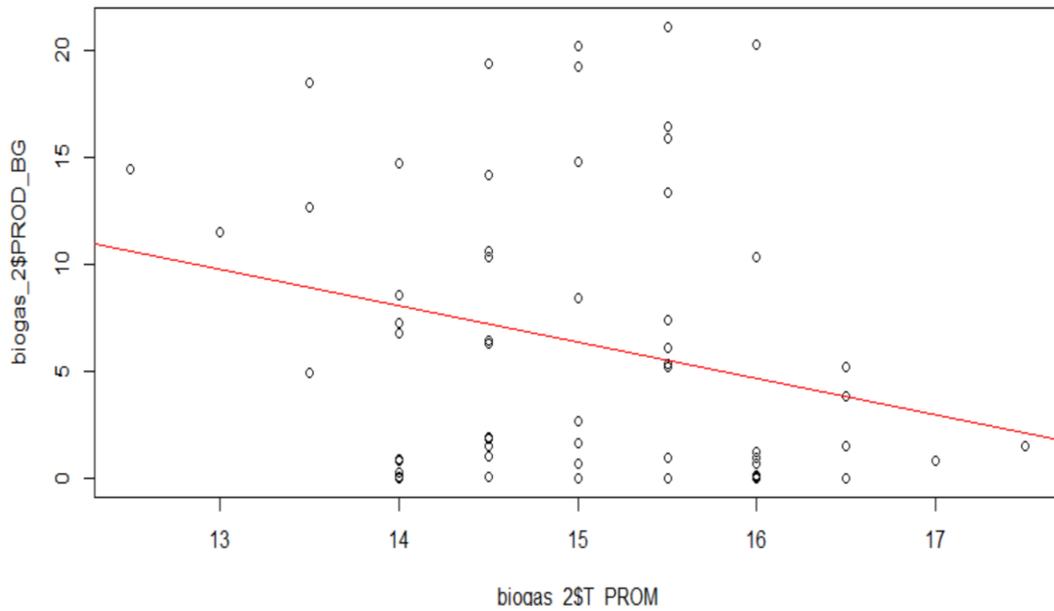
#### 4.1.2. Análisis estadístico

La finalidad de realizar el análisis de regresión lineal fue de examinar la relación entre la temperatura ambiental (variable independiente) y la producción diaria de biogás (variable dependiente). Los resultados nos muestran como interactúan ambas variables, los cuales se muestran en las Figuras 16, 17 y 18.



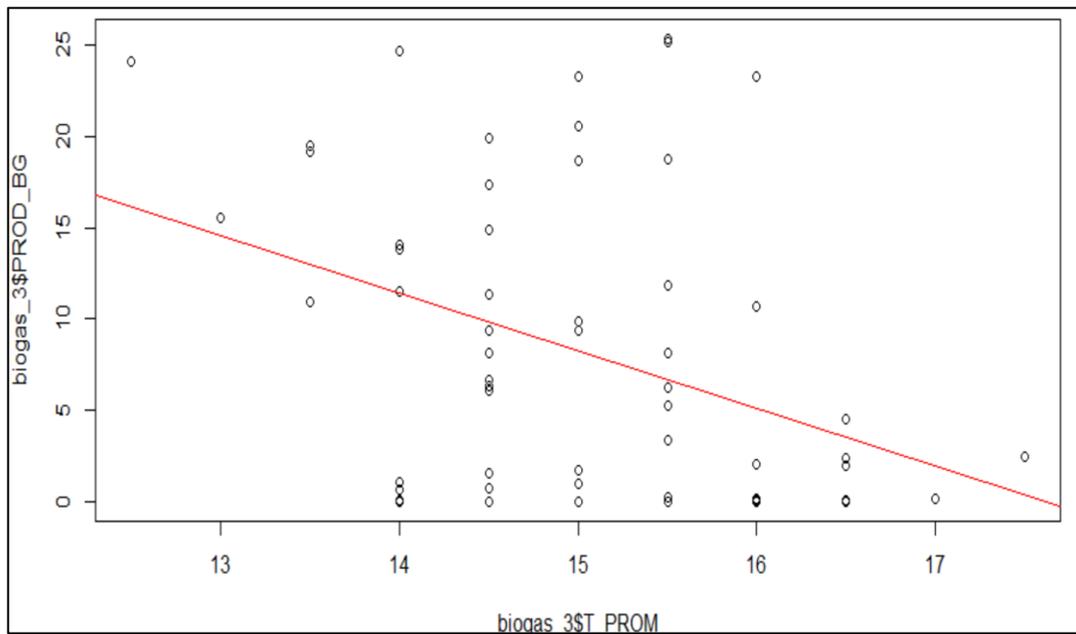
**Figura 16: Análisis de regresión lineal entre la producción diaria de biogás y la temperatura ambiental para la prueba BH1**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 17: Análisis de regresión lineal entre la producción diaria de biogás y la temperatura ambiental para la prueba BH2**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 18: Análisis de regresión lineal entre la producción diaria de biogás y la temperatura ambiental para la prueba BH3**

Fuente: Elaboración propia

Es necesario mencionar que en las Figuras 16, 17 y 18 se pueden observar que los datos se encuentran de forma dispersa con la presencia de valores atípicos u “outliers”. Por lo tanto,

con el modelo de regresión lineal se buscó ajustar estos valores y encontrar la asociación entre la producción diaria de biogás y la temperatura ambiental promedio. Los resultados se pueden observar en la Tabla 10.

**Tabla 10: Resumen del modelo de regresión lineal para las pruebas BH1, BH2 y BH3**

	<b>BH1</b>	<b>BH2</b>	<b>BH3</b>
$\beta_0$	63.61	32.05	55.57
$\beta_1$	-3.54	-1.71	-3.15
<b>Error</b>	1.27	0.82	0.98
<b>Valor prueba t</b>	2.78	2.08	3.19
<b>p</b>	0.007	0.04	0.002
<b>Coef. de determinación (<math>R^2</math>)</b>	0.11	0.06	0.14

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 10 podemos observar los resultados del análisis de regresión lineal, llevado a cabo en el programa R statistics © versión 4.1.1. para las pruebas BH1, BH2 y BH3. En la prueba BH1 podemos observar que el valor de la pendiente fue de -3.54 con un error de 1.27. Esto nos indica que el cambio de un grado de la temperatura ambiental significó un cambio promedio de 3.54 ml en la producción de biogás. Mientras que para las pruebas BH2 y BH3 la pendiente fue de -1.71 y -3.15 con un error de 2.08 y 3.19 respectivamente. La relación de las pruebas BH1, BH2 y BH3 resultó ser estadísticamente significativa debido a que los valores de p fueron menores a 0.05. Por lo tanto, se puede afirmar la temperatura ambiental tiene una gran asociación con la producción diaria de biogás. Los resultados detallados del análisis de regresión lineal, así como los supuestos que debían cumplir se pueden observar en los Anexos 11, 12 y 13.

El autor considera que los valores atípicos u “outliers” no influyeron en el modelo de regresión lineal debido a que se presentaron durante dos etapas distintas: a) Etapa de arranque, donde a pesar de que la temperatura del día de lectura hubiera sido alta (con relación a la temperatura ambiental promedio) y hubiera favorecido la producción de biogás, al ser una etapa de aclimatación de los microorganismos, la producción siempre es baja. b)

Etapa de funcionamiento (etapas de estabilización y declinación), donde el biodigestor ya se encuentra en funcionamiento. Esto ayuda a que el impacto de la temperatura ambiental no sea tan severo, precisamente por ya pasó por una etapa de aclimatación. Sin embargo, los resultados del análisis lineal nos mostraron que existe asociación entre la producción diaria de biogás y la temperatura ambiental. Aunque específicamente su impacto fue negativo cuando se generaron picos de temperatura, es decir, cuando en el día la temperatura era elevada y por las noches esta descendía a niveles muy bajos, Por lo que podemos afirmar que la producción de biogás durante la etapa experimental se vio favorecida cuando la temperatura promedio durante el día fue más alta y en su defecto se vio afectada cuando la temperatura ambiental disminuyó.

#### **4.2. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE BIOGÁS PRODUCIDO POR BIODIGESTORES ANAEROBIOS A PEQUEÑA ESCALA (BPA) CON PRESENCIA DE BOLSAS PLÁSTICAS**

En esta sección se muestran los resultados de los ensayos para determinar el PBM del sustrato (heces caninas) en los BPA con presencia de bolsas plásticas (tipo I, II, III, IV) (Tabla 11). Los ensayos fueron separados de acuerdo con el tipo de bolsa plástica que fue utilizada (caracterizadas en la sección 3.2.1). En esta sección se agregó una cantidad de sustrato (heces caninas) + agua + inóculo que aseguró un volumen de carga y “head space” del 50 por ciento.

##### **4.2.1. Producción de biogás de las pruebas BP1, BP2, BP3 y BP4**

En la Figura 19 se grafican las curvas correspondientes al resultado promedio de la producción diaria, la producción acumulada y rendimiento del biogás obtenido tras los ensayos de la prueba con la bolsa tipo I – BP1.

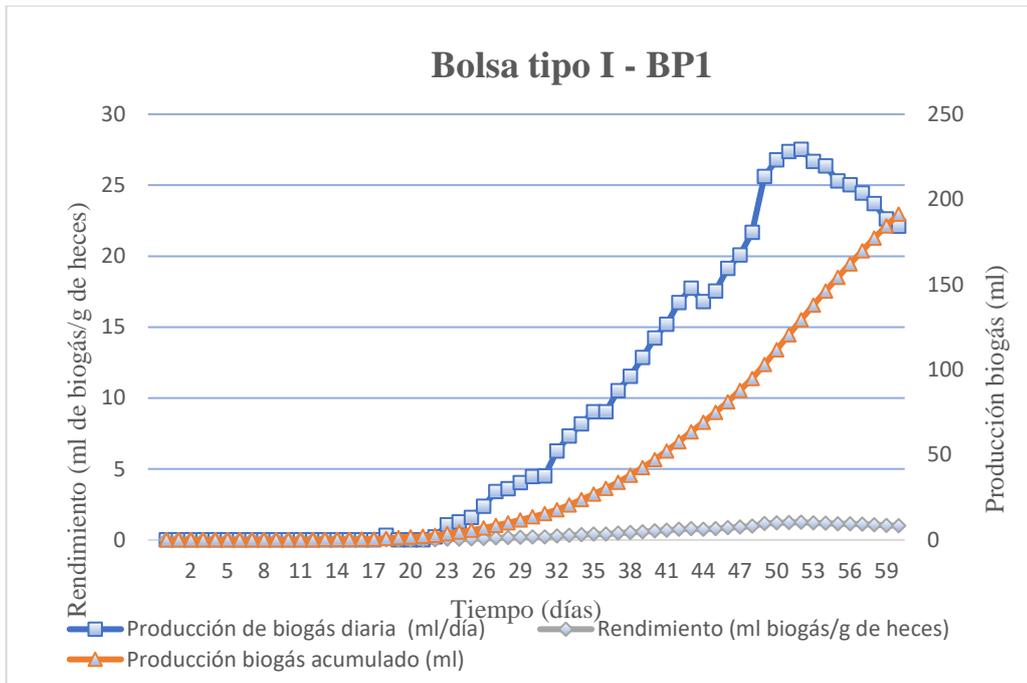
En la Figura 19 se observa que la producción máxima acumulada para este ensayo fue de 191.25 ml de biogás. Así mismo se muestra que la producción máxima de biogás para esta prueba se produjo entre los días 49 y 58. La producción diaria máxima de biogás fue de 27.52 ml de biogás y el rendimiento máximo fue de 1.24 ml de biogás por cada gr de heces caninas, el cual fue alcanzado el día 52. El promedio de rendimiento diario fue de 0.41 ml de biogás por cada gr de heces caninas al día. Se puede observar que tiene una etapa de arranque y adaptación hasta el día 15 donde inicia la producción del biogás.

**Tabla 11: Resumen de la carga final para el cálculo del PBM con presencia de bolsas plásticas**

Potencial bioquímico de metano (BPM)		Tipo de BPA utilizado	Volumen inóculo	Volumen sustrato	Agua	Carga total del BPA
<b>Bolsa de plástico Tipo I</b>	Rep #1	3	33.16	22.18	221.37	276.71
	Rep #2	3	33.16	22.18	221.37	276.71
	Rep #3	3	33.16	22.18	221.37	276.71
<b>Controles</b>	Rep #1	3	33.16	22.18	221.37	276.71
	Rep #2	3	33.16	22.18	221.37	276.71
<b>Bolsa de plástico Tipo II</b>	Rep #1	4	33.11	22.15	381.04	436.30
	Rep #2	4	33.11	22.15	381.04	436.30
	Rep #3	4	33.11	22.15	381.04	436.30
<b>Controles</b>	Rep #1	4	33.11	22.15	381.04	436.30
	Rep #2	4	33.11	22.15	381.04	436.30
<b>Bolsa de plástico Tipo III</b>	Rep #1	5	34.45	23.04	229.96	287.45
	Rep #2	5	34.45	23.04	229.96	287.45
	Rep #3	5	34.45	23.04	229.96	287.45
<b>Controles</b>	Rep #1	5	34.45	23.04	229.96	287.45
	Rep #2	5	34.45	23.04	229.96	287.45
<b>Bolsa de plástico Tipo IV</b>	Rep #1	1	41.76	27.93	278.77	348.46
	Rep #2	1	41.76	27.93	278.77	348.46
	Rep #3	1	41.76	27.93	278.77	348.46
<b>Controles</b>	Rep #1	1	41.76	27.93	278.77	348.46
	Rep #2	1	41.76	27.93	278.77	348.46

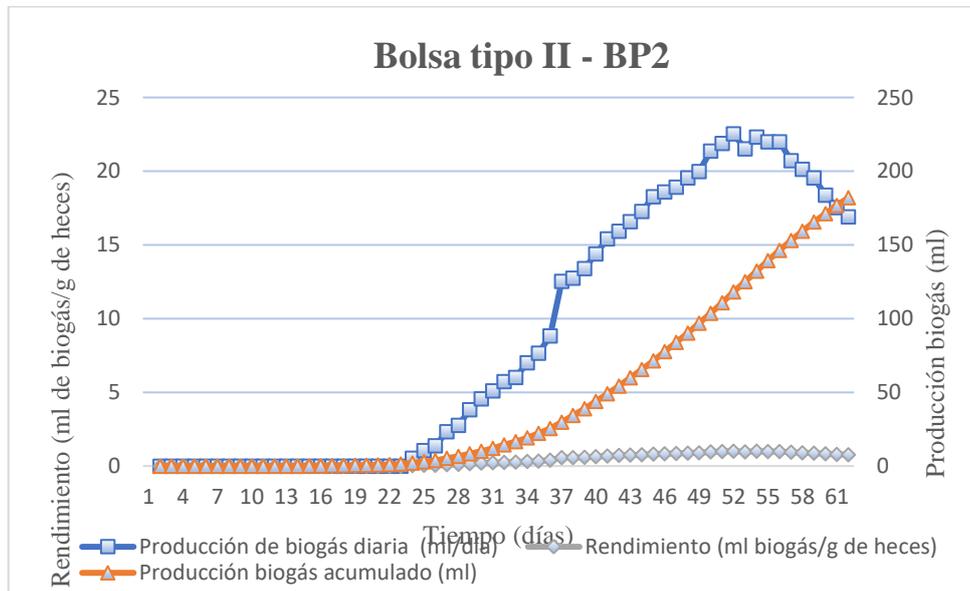
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 20 se grafican las curvas correspondientes al resultado promedio de la producción diaria, la producción acumulada y rendimiento del biogás obtenido tras los ensayos de la prueba con la bolsa tipo II – BP2.



**Figura 19: Producción diaria, acumulada y rendimiento del ensayo con la bolsa tipo I – BP1**

Fuente: Elaboración propia



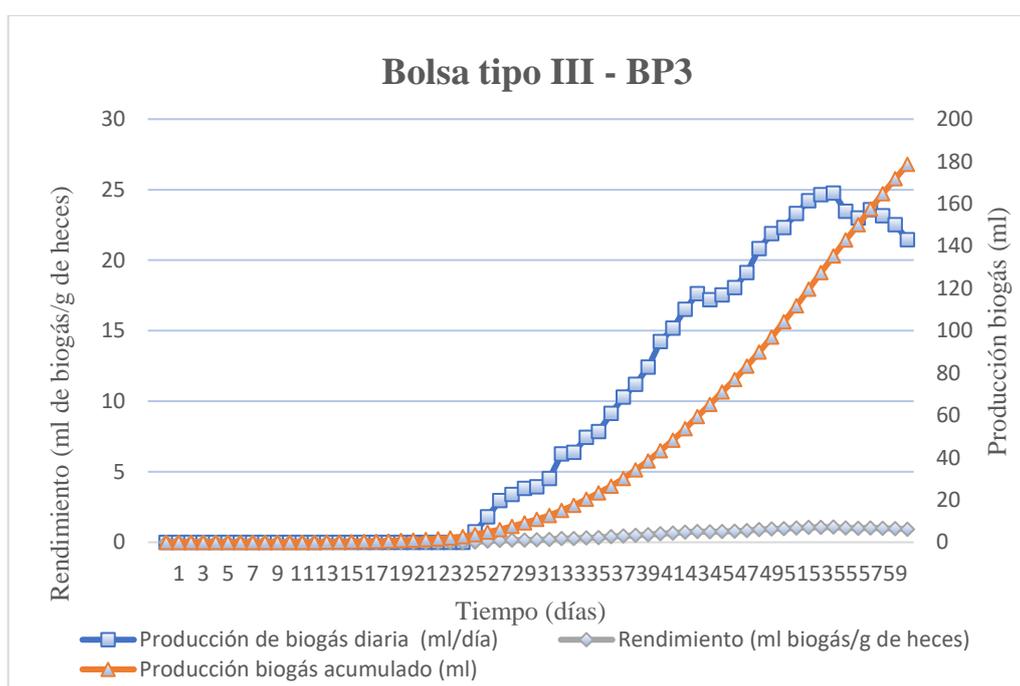
**Figura 20: Producción diaria, acumulada y rendimiento del ensayo con la bolsa tipo II – BP2**

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 20 se observa que la producción máxima acumulada para este ensayo fue de 182.03 ml de biogás. Así mismo, se muestra que la producción máxima de biogás para esta prueba se produjo entre los días 47 y 56. La producción diaria máxima de biogás fue de

22.52 ml de biogás y el rendimiento máximo fue de 1.02 ml de biogás por cada gr de heces caninas, el cual fue alcanzado el día 50. El promedio de rendimiento diario fue de 0.39 ml de biogás / gr heces caninas / día. Se puede observar que esta prueba presentó una etapa de arranque y adaptación hasta el día 13, donde inicia la producción del biogás.

En la Figura 21 se grafican las curvas correspondientes al resultado promedio de la producción diaria, la producción acumulada y rendimiento del biogás obtenido tras los ensayos de la prueba con la bolsa tipo III – BP3.

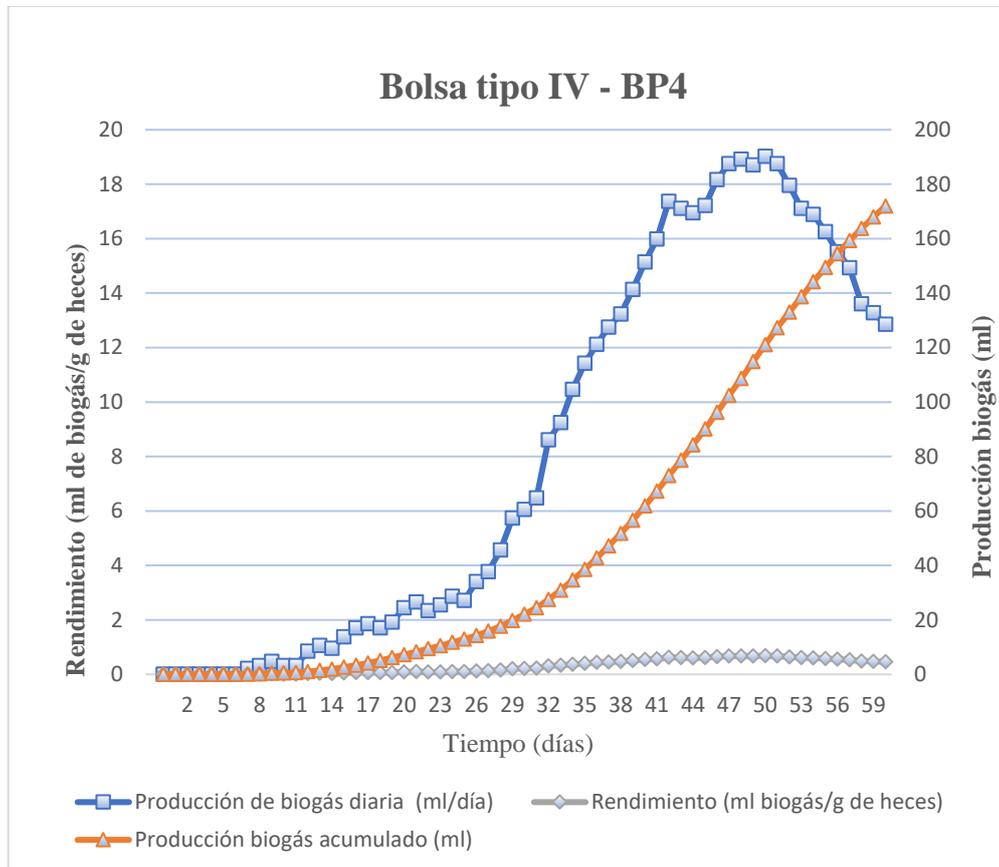


**Figura 21: Producción diaria, acumulada y rendimiento del ensayo con la bolsa tipo III – BP3**

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 21 se observa que la producción máxima acumulada para este ensayo fue de 178.63 mL de biogás. Así mismo, se muestra que la producción máxima de biogás para esta prueba se produjo entre los días 49 y 60. La producción diaria máxima de biogás fue de 24.75 ml de biogás y el rendimiento máximo fue de 1.07 ml de biogás por cada gr de heces caninas, el cual fue alcanzado el día 54. El promedio de rendimiento diario fue de 0.37 ml de biogás / gr heces caninas / día. Se puede observar que tiene una etapa de arranque y adaptación hasta el día 13 donde inicia la producción del biogás.

En la Figura 22 se grafican las curvas correspondientes al resultado promedio de la producción diaria, la producción acumulada y rendimiento del biogás obtenido tras los ensayos de la prueba con la bolsa tipo IV – BP4.



**Figura 22: Producción diaria, acumulada y rendimiento del ensayo con la bolsa tipo IV – BP4**

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 22 se observa que la producción máxima acumulada para este ensayo fue de 172.00 ml de biogás. Así mismo, se muestra que la producción máxima de biogás para esta prueba se produjo entre los días 42 y 54. La producción diaria máxima de biogás fue de 19.02 ml de biogás y el rendimiento máximo fue de 0.68 ml de biogás por cada gr de heces caninas, el cual fue alcanzado el día 50. El promedio de rendimiento diario fue de 0.29 ml de biogás / gr heces caninas / día. Se puede observar que tiene una etapa de arranque y adaptación hasta el día 8 donde inicia la producción del biogás.

En los experimentos realizados con la presencia de las bolsas plásticas, donde la principal diferencia entre los ensayos BP1, BP2, BP3 y BP4 fue el tipo de bolsa utilizada para envolver las heces caninas. Se puede observar que no hay producción de biogás durante los primeros seis días para el ensayo BP4. Mientras que para los ensayos BP1, BP2 y BP3 el tiempo se prolongó hasta los 11 días. A partir del día 7 (BP4), 12 (BP1) y día 13 (BP2 y BP3) el biogás empieza a producirse. Sin embargo, durante los días posteriores la producción es mínima, probablemente por el mismo motivo que ocurrió con los ensayos BH1, BH2 y BH3 donde tuvo el mismo comportamiento. Aunque, con el ensayo BP4 este tiempo es más corto y a partir del día 12 empieza la mayor producción de biogás para esta prueba. Para los ensayos BP1 y BP2 la mayor producción de biogás empezó alrededor de los días 22 y 24 respectivamente donde comenzó a incrementar de forma exponencial hasta el día 52 para ambas pruebas. Para el ensayo BP3, la producción máxima de biogás empezó alrededor del día 25 e incrementó exponencialmente hasta el día 54. Es interesante mencionar que, para todos los ensayos, las curvas de los gráficos tienen una tendencia similar a la curva de crecimiento bacteriano (Figura 5), en comparación con los ensayos BH1, BH2 y BH3. Donde se pudo observar que la caída de la producción fue más abrupta. Probablemente porque la presencia de las bolsas de plástico hizo que la temperatura dentro de los biodigestores se mantenga constante evitando que los picos de temperaturas bajas afecten de forma significativa la producción de biogás.

El ejercer una presión mecánica con la varilla para rasgar y romper las bolsas plásticas al momento de cargar los BPA, tuvo la finalidad de funcionar como pretratamiento con la finalidad de incrementar el área de contacto del sustrato (heces caninas) con los microorganismos anaerobios (también se consideró el desgaseado del inóculo). Los resultados obtenidos nos indican que las curvas de producción diaria de todos los ensayos (BP1, BP2, BP3 y BP4) han seguido el patrón de la curva (b) de la Figura 9. Al igual que como pasó con las pruebas BH1, BH2 y BH3, esto puede interpretarse como que el pretratamiento no contribuyó significativamente en mejorar la producción diaria de biogás. Sin embargo, como se explicó previamente, se pudo observar que las etapas de arranque y estabilización mejoraron considerablemente.

La Tabla 12 resume los resultados obtenidos para la producción diaria máxima, rendimiento máximo, promedio de rendimiento diario, producción máxima acumulada y rendimiento total del biogás producido en los ensayos BP1, BP2, BP3 y BP4. El detalle de los datos obtenidos puede observarse en el Anexo 15.

**Tabla 12: Resumen de los resultados para los ensayos BP1, BP2, BP3 y BP4**

Ensayo	Producción máxima de biogás diaria (ml biogás)	Rendimiento máximo (ml biogás /gr de heces)	Promedio de rendimiento diario (ml biogás / gr de heces /día)	Producción máxima acumulada (ml biogás)	Rendimiento total (ml biogás /gr de heces)
<b>BP1</b>	27.52	1.24	0.41	191.25	8.62
<b>BP2</b>	22.52	1.02	0.39	182.03	8.22
<b>BP3</b>	24.75	1.07	0.37	178.63	7.75
<b>BP4</b>	19.02	0.68	0.29	172.00	6.16

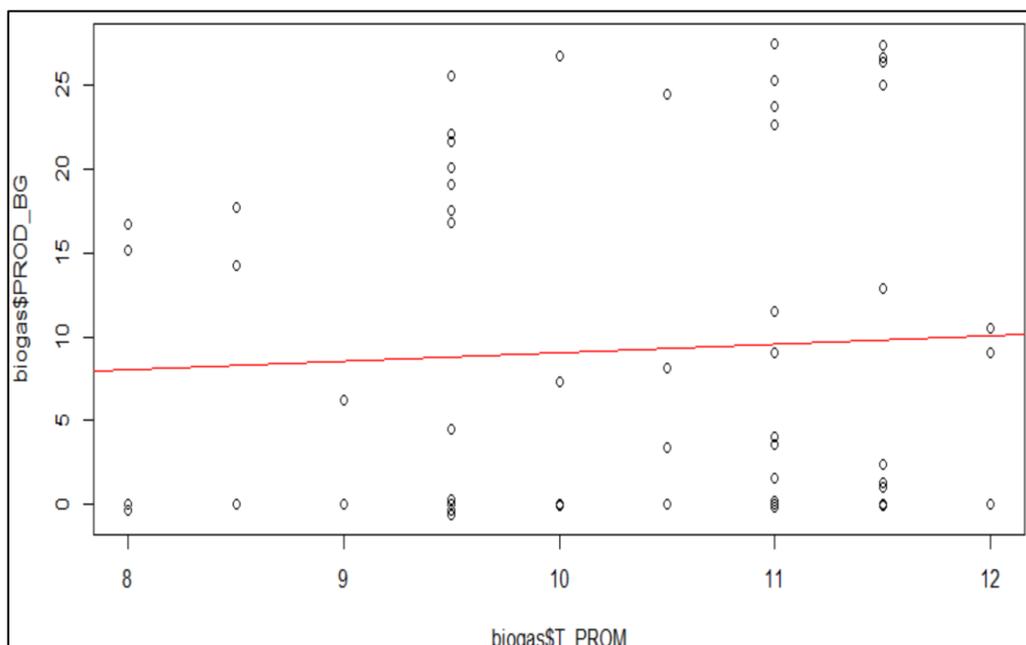
Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 12 se puede observar que la producción diaria máxima (27.52 ml de biogás), rendimiento máximo (1.24 ml de biogás / gr de HC), promedio de rendimiento diario (0.41 ml de biogás / gr de HC / día), producción máxima acumulada (191.25 ml de biogás) y rendimiento total (8.62 ml de biogás / gr de HC) del biogás se obtuvieron en la prueba BP1. Los resultados obtenidos están relacionados al tipo de bolsa plástica utilizada (tipo I - más delgada). Esto permitió que pueda ser rasgada adecuadamente con la varilla al momento de hacer el pretratamiento, permitiendo un mayor contacto entre el sustrato y el inóculo. Con respecto a los ensayos BP2 y BP3, se pudo observar que el rendimiento (8.22 y 7.75 ml de biogás / gr de HC respectivamente) disminuyó a medida que se incrementó el grosor de la bolsa plástica utilizada (tipo II y tipo III). Al ser bolsas plásticas más gruesas, posiblemente impidieron que el pretratamiento las rasgue de manera adecuada, lo cual redujo el contacto entre el sustrato y el inóculo. Algo similar pasó con el ensayo BP4, a pesar de que se utilizó una bolsa “biodegradable” (tipo IV). Aunque, debido a que el tiempo de retención de los ensayos solo fue de sesenta días, no se puede afirmar que, si se hubiera prolongado el tiempo de retención, este hubiera permitido que su rendimiento aumente.

En la actualidad existen pocos estudios similares que utilicen un sistema de DA con presencia de bolsas plásticas, por lo que es difícil comparar los resultados obtenidos en el presente trabajo. Sin embargo, en Estados Unidos se ha desarrollado un proyecto llamado “Park Spark Project”. Este proyecto utiliza un biodigestor en parques caninos, que funciona con HC de PD recogidas en bolsas biodegradables. Estas son dispuestas dentro del biodigestor, el cual tiene una especie de pretratamiento (se gira una llave para mezclar el sustrato) y posteriormente producen biogás, el cual es utilizado para encender unas lámparas a gas (About 1 — Park Spark n.d.). Este modelo de tratamiento tiene muchas similitudes al modelo a pequeña escala utilizado en el presente trabajo. Por lo tanto, el autor considera que las HC con presencia de bolsas plásticas pueden ser utilizadas como sustrato para la producción de biogás a gran escala.

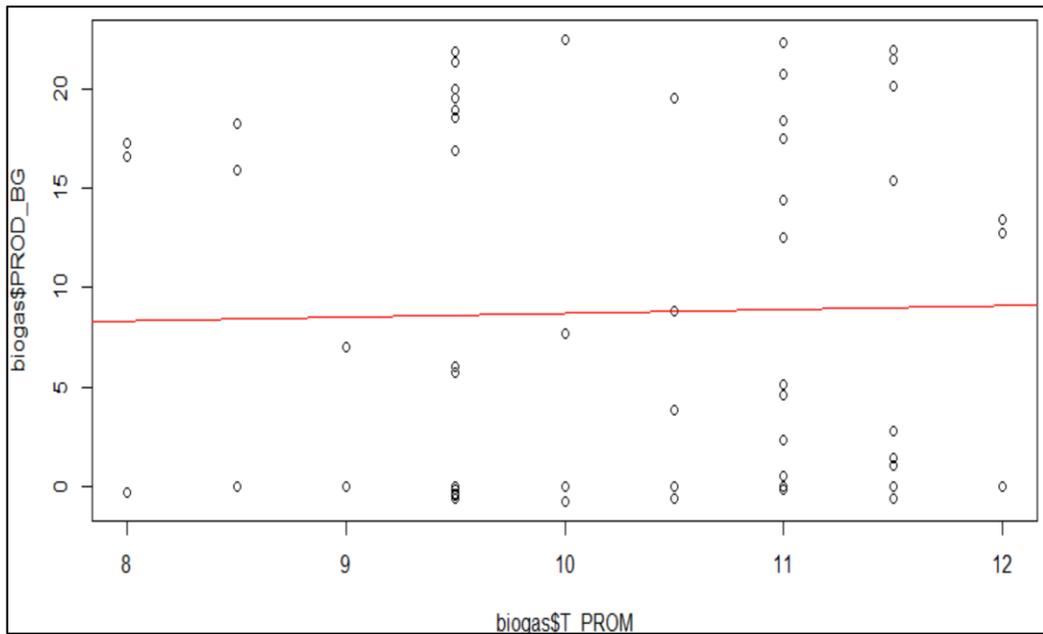
#### 4.2.2. Análisis estadístico

La finalidad de realizar el análisis de regresión lineal fue de examinar la relación entre la temperatura ambiental (variable independiente) y la producción diaria de biogás (variable dependiente). Los resultados nos muestran como interactúan ambas variables los cuales se muestran en las Figuras 23, 24, 25 y 26.



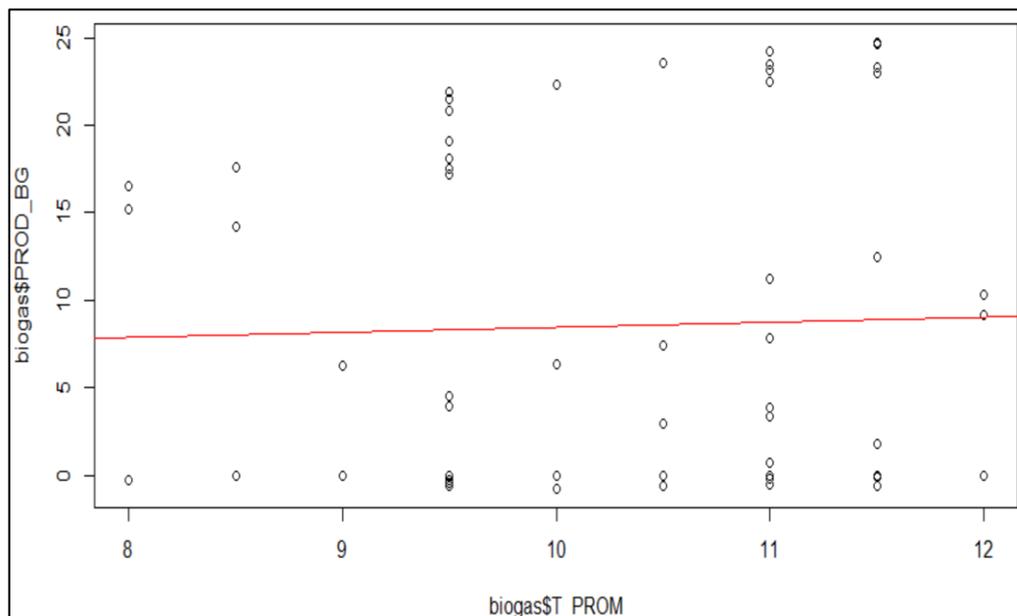
**Figura 23: Análisis de regresión lineal entre la producción diaria de biogás y la temperatura ambiental para la prueba BP1**

Fuente: Elaboración propia



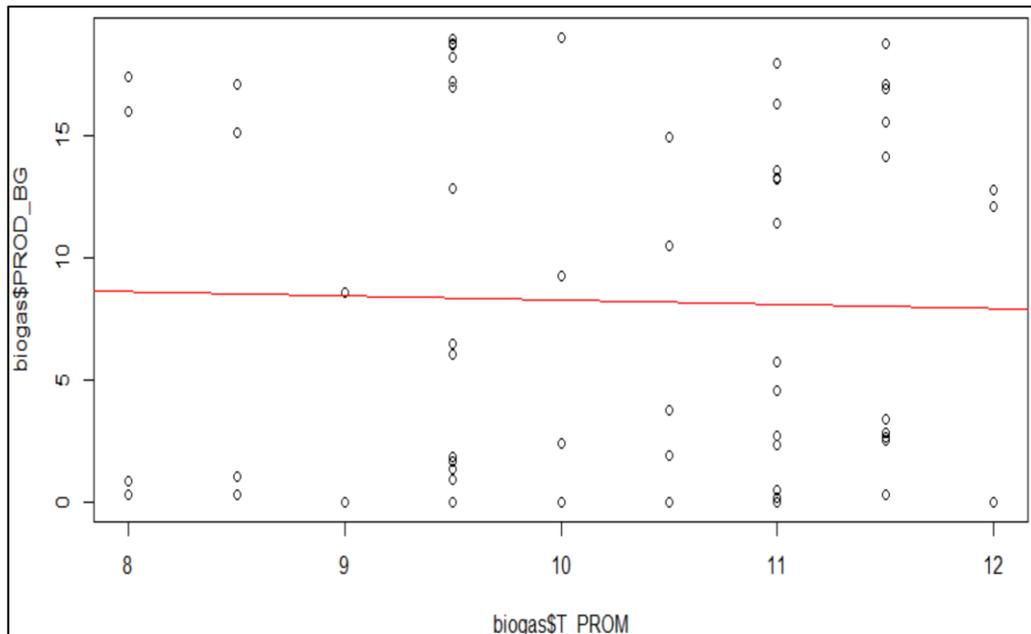
**Figura 24: Análisis de regresión lineal entre la producción diaria de biogás y la temperatura ambiental para la prueba BP2**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 25: Análisis de regresión lineal entre la producción diaria de biogás y la temperatura ambiental para la prueba BP3**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 26: Análisis de regresión lineal entre la producción diaria de biogás y la temperatura ambiental para la prueba BP4**

Fuente: Elaboración propia

En las Figuras 23, 24, 25 y 26 se pueden observar que los datos se encuentran de forma dispersa con una alta presencia de valores atípicos u “outliers”. Por lo tanto, con el modelo de regresión lineal se buscó ajustar estos valores y encontrar la asociación entre la producción diaria de biogás y la temperatura ambiental promedio. El resumen de los resultados se puede observar en la Tabla 13 y en el Anexo 15.

En la Tabla 13 podemos observar los resultados del análisis de regresión lineal llevado a cabo en el programa R statistics © versión 4.1.1 para las pruebas BP1, BP2, BP3 y BP4. En la prueba BP1, BP2, BP3 y BP4 podemos observar que los valores de la pendiente fueron de 0.50, 0.19, 0.18 y - 0.17 con un error de 0.43, 0.19, 0.26 y 0.21 respectivamente. Estos resultados nos indican la poca asociación entre la temperatura ambiental y la producción diaria de biogás. Además, esto se puede corroborar con que los valores p fueron mayores a 0.05, por lo tanto, no son estadísticamente significativos. Probablemente los resultados de la prueba de análisis de regresión se vieron afectados por la presencia de una tercera variable no considerada, que es la presencia de las bolsas plásticas. El autor considera que a pesar de que estas pruebas se desarrollaron en la etapa más fría en la zona de estudio del año (junio – julio), las bajas temperaturas (incluso bajo cero) no fue la principal variable que afectó el rendimiento de los biodigestores. Por lo tanto, si bien se esperaba que la producción de

biogás sea menor, esta se pudo ver más afectada por el grosor de la bolsa plástica utilizada. Sin embargo, debido al diseño propuesto en el presente trabajo, la temperatura interna de los biodigestores es una variable difícil de calcular.

**Tabla 13: Resumen del modelo de regresión lineal para las pruebas BP1, BP2 BP3 y BP4**

	<b>BP1</b>	<b>BP2</b>	<b>BP3</b>	<b>BP4</b>
$\beta_0$	4.07	6.73	5.61	9.99
$\beta_1$	0.50	0.19	0.28	- 0.17
<b>Error</b>	1.14	1.01	1.07	0.81
<b>Valor t</b>	0.43	0.19	0.26	0.21
<b>p</b>	0.665	0.848	0.791	0.832
<b>Coef. de determinación (<math>R^2</math>)</b>	0.003	0.0006	0.001	0.0007

Fuente: Elaboración propia

La temperatura y el pH son factores importantes en la actividad enzimática de los microorganismos responsables de la DA. Debido a que estos factores afectan la actividad enzimática de los mismos (Veeken and Hamelers 1999). La temperatura contribuye con incrementar la probabilidad de que las partículas del sustrato colisionen con los sitios activos de las enzimas encargadas de su degradación. Además, puede contribuir con el crecimiento de distintas especies de microorganismos anaerobios (Anexo 2). Las condiciones climáticas del distrito de Chupaca no contribuyen a que se acelere la producción de biogás, retrasando el arranque y estabilización de los sistemas anaerobios. Sin embargo, los ensayos fueron realizados en la época más fría del año y se demostró que, aunque la producción es lenta, puede llevarse a cabo perfectamente. Por lo tanto, podemos afirmar que en los días donde se presenten las temperaturas más altas, la generación de biogás es mayor que en los días donde la temperatura ambiental disminuye.

En todos los ensayos realizados (BH1, BH2, BH3, BP1, BP2, BP3 y BP4) así como en sus repeticiones, se observó la presencia de una sal translúcida alrededor de los instrumentos de medición del gas y dentro de la trampa de CO<sub>2</sub> (Anexo 17). Esta se presenta como resultado de la interacción entre el CO<sub>2</sub> generado por los BPA y el NAOH. La cual se explica teniendo en cuenta la fórmula:  $CO_2 + 2NaOH \rightarrow Na_2CO_3 + H_2O$ . Por lo tanto, la presencia de esta sustancia (carbonato de calcio - Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) es un indicador del buen funcionamiento de la trampa de CO<sub>2</sub>, lo cual significa que el gas obtenido como resultado de las pruebas está compuesto principalmente por metano.

En la literatura consultada como guía de este trabajo, diversos autores consideran que previo a que el biodigestor se ponga en funcionamiento, se debe realizar una etapa de arranque o adaptación (Lieberman and Muhlbauer 2012). Esta etapa se logra utilizando como inóculo los lodos de otras plantas de tratamiento anaeróbico que ya se encuentren en funcionamiento o en su defecto guano bovino o de otros animales. Este proceso tiene la finalidad de que contribuya con los microorganismos anaerobios necesarios para reducir los tiempos de adaptación y la producción de biogás se genere en un menor tiempo. En el presente trabajo, se ha podido observar que la etapa de arranque para los ensayos realizados en los BPAs, la producción metanogénica de la parte experimental es relativamente corta. Esto gracias a la etapa previa de desgasificación del inóculo de guano bovino, que permitió una mejor adaptación de los microorganismos anaerobios para la producción de biogás y que la etapa de adaptación no se prolongue.

Finalmente, es importante mencionar que se han reportado pocos estudios sobre el uso de HC como sustrato para ser tratadas mediante un sistema como la DA, probablemente debido a la alta susceptibilidad a patógenos que pueden estar presente en este tipo de desechos. Los resultados presentados en este estudio nos indican que las HC tienen potencial para ser consideradas como una alternativa para su uso como sustrato dentro de un sistema de tratamiento anaerobio incluso si se encuentra la presencia de bolsas plásticas.

### 4.3. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN ÓPTIMO DEL BIODIGESTOR PARA EL TRATAMIENTO DE LAS HECES CANINAS DEL DISTRITO DE CHUPACA

#### 4.3.1. Producción anual de heces caninas

En esta sección se muestran los resultados de la estimación de la población canina en el distrito de Chupaca (lugar donde se propone la instalación del biodigestor). En la Tabla 14 se muestra la información proyectada para cada año de funcionamiento del biodigestor.

**Tabla 14: Resumen de la producción estimada de heces caninas en el periodo 2018 - 2033**

N°	Año	Población (Perros domésticos)	Generación de heces caninas			
			kg / día	ton / día	ton / mes	ton / año
0	2018	1897	1138.2	1.14	34.15	415.44
1	2019	1953	1171.8	1.17	35.15	427.71
2	2020	2009	1205.4	1.21	36.16	439.97
3	2021	2065	1239	1.24	37.17	452.24
4	2022	2121	1272.6	1.27	38.18	464.50
5	2023	2177	1306.2	1.31	39.19	476.76
6	2024	2233	1339.8	1.34	40.19	489.03
7	2025	2289	1373.4	1.37	41.20	501.29
8	2026	2345	1407	1.41	42.21	513.56
9	2027	2401	1440.6	1.44	43.22	525.82
10	2028	2457	1474.2	1.47	44.23	538.08
11	2029	2513	1507.8	1.51	45.23	550.35
12	2030	2569	1541.4	1.54	46.24	562.61
13	2031	2625	1575	1.58	47.25	574.88
14	2032	2681	1608.6	1.61	48.26	587.14
15	2033	2737	1642.2	1.64	49.27	599.40

El número de perros domésticos calculados en el año cero (2018) fue calculado teniendo en cuenta los siguientes supuestos: a) Información recopilada del Censo Nacional del año 2018, donde el número de viviendas urbanas para el distrito de Chupaca fue de 3875. b) Encuesta realizada por CPI en el año 2018, donde indicaban que al menos el 62 por ciento de los hogares urbanos a nivel nacional contaban con una mascota. c) Encuesta realizada por IPSOS en el año 2014 donde indicaban que de los hogares que contaban con una mascota, la probabilidad de que sea un perro era de 79 por ciento. d) La tasa de crecimiento del 3 por ciento por cada año fue considerada por la tasa de crecimiento intercensal de los años 2005 y 2014. e) En base a la población estimada, se calculó la cantidad de HC que son generadas diariamente teniendo en cuenta la información expuesta por Zúñiga y Caro (2020), la cual nos indica que en promedio un perro de tamaño medio genera 600 gr/heces/día.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 14 se presenta el cálculo de la estimación de la población de PD para el distrito de Chupaca, así como la estimación de la generación diaria, mensual y anual de HC proyectada para un periodo de 15 años. Podemos observar que para el año cero (2018) la

población de PD fue de 1897 (3875 viviendas particulares \* 0.62), la cual genera 1.14 toneladas de HC al día, 34.15 toneladas al mes y 415.97 toneladas al año. Teniendo en consideración una tasa de crecimiento del tres por ciento anual, para el año quince, la población de PD es de 2737, lo cual representa 1.64 toneladas de HC al día, 49.27 toneladas al mes y 599.40 toneladas al año.

**Tabla 15: Parámetros de funcionamiento del biodigestor**

Volumen de agua	Volumen de carga diaria (VCD)
$V_{HC (diaria)} = 1642.2 \text{ kg/día}$ $V_{HC (diaria)} = 1.64 \text{ m}^3/\text{ día}$ $V_{H_2O} (\text{ m}^3/\text{ día}) = 1.64 * 4$ $V_{H_2O} (\text{ m}^3/\text{ día}) = 6.57 \text{ m}^3/\text{ día}$	$VCD = V_{HC (diaria)} + V_{H_2O}$ $VCD (\text{ m}^3/\text{ día}) = 6.57 \text{ m}^3/\text{ día} + 1.64 \text{ m}^3/\text{ día}$ <b><math>VCD = 8.21 \text{ m}^3/\text{ día}</math></b>
Volumen de carga orgánica (CO)	Volumen del biodigestor ( $V_{dig}$ )
<ul style="list-style-type: none"> <li>• ST = 34.31 %</li> <li>• SV = 31.37 %</li> </ul> $CO = VCD * ST * SV$ $CO = 8.21 \text{ m}^3/\text{ día} * 34.31\% * 31.37\%$ <b><math>CO = 0.884 \text{ m}^3 \text{ SV}/\text{ día}</math> o <math>8843 \text{ kg SV}/\text{ día}</math></b>	$V_{dig} (\text{ m}^3) = VCD (\text{ m}^3/\text{ día}) * t (\text{ día})$ $V_{dig} = 8.21 \text{ m}^3/\text{ día} * 30 \text{ día}$ <b><math>V_{dig} = 246.33 \text{ m}^3</math></b>
Velocidad de carga orgánica (VCO)	Tiempo de retención hidráulico (TRH)
$VCO (\text{ kg SV}/\text{ m}^3 \text{ día}) = \frac{CO (\text{ kg SV}/\text{ día})}{V (\text{ m}^3)}$ $VCO = \frac{8843 \text{ kg SV}/\text{ día}}{300 \text{ m}^3}$ <b><math>VCO = 29.47 \text{ kg SV}/\text{ m}^3 \text{ día}</math></b>	$TRH = \frac{V_{liq} (\text{ m}^3)}{VCD (\text{ m}^3/\text{ día})}$ $TRH = \frac{300.06 \text{ m}^3}{8.21 \text{ m}^3/\text{ día}}$ <b><math>TRH = 36.54 \text{ días} \rightarrow 37 \text{ días}</math></b>
Volumen líquido del biodigestor ( $V_{liq}$ )	Temperatura
$V_{liq} (\text{ m}^3) = \frac{CO (\text{ kg SV}/\text{ día})}{VCO (\text{ kg SV}/\text{ m}^3 \text{ día})}$ $V_{liq} = \frac{8843 \text{ kg SV}/\text{ día}}{29.47 \text{ kg SV}/\text{ m}^3 \text{ día}}$ <b><math>V_{liq} = 300.06 \text{ m}^3</math></b>	<p>La temperatura media anual es de 12 °C. (condiciones psicrófilas – tabla 1)</p>

Fuente: Elaboración propia

### 4.3.2. Parámetros de funcionamiento del biodigestor

Para elaborar el diseño del biodigestor encargado de procesar las HC mediante la DA, primero se tuvieron que determinar los parámetros que aseguren su adecuado funcionamiento. Estos fueron calculados en base a los resultados de la estimación proyectada para el año 15 presentados en la Tabla 14. Por lo tanto, estos parámetros están en función a la capacidad máxima del biodigestor. Los parámetros que se tuvieron en cuenta fueron: (a) volumen de agua, (b) volumen de carga diaria, (c) volumen de carga orgánica, (d) volumen del biodigestor, (e) la velocidad de la carga orgánica, (f) volumen líquido del biodigestor, (g) tiempo de retención y (h) temperatura (Tabla 15).

En la Tabla 15 podemos observar el cálculo de los parámetros de funcionamiento del biodigestor. En primer lugar, (a) el volumen de agua fue calculado en base a la cantidad de HC generadas diariamente. Se consideró que la densidad promedio de las heces era de  $1000 \text{ kg} / \text{m}^3$  (Ardila y Parada 2016), lo cual significa que la cantidad de agua es equivalente al peso de las HC. Por lo tanto, con la relación agua - sustrato de 4:1 (sección 3.1.4), la cantidad de agua que debe agregarse diariamente es de  $6.57 \text{ m}^3$ . (b) El volumen de carga diaria (VCD) fue de  $8.21 \text{ m}^3$  por día. Este valor representa la cantidad máxima de agua y sustrato que puede agregarse diariamente al biodigestor. (c) El volumen de carga orgánica (CO) fue de  $0.884 \text{ m}^3$  por día. Este valor nos indica la cantidad de la fracción biodegradable del sustrato que ingresa diariamente al biodigestor. (d) El volumen del biodigestor ( $V_{dig}$ ) fue de  $246.33 \text{ m}^3$ . Este valor nos indica el tamaño mínimo que debe de tener el biodigestor para digerir el sustrato durante un periodo mínimo de 30 días (Akunna 2018). (e) La velocidad de carga orgánica (VCO) fue de  $29.47 \text{ kg SV} / \text{m}^3$  por día. Este valor representa la cantidad máxima de la fracción orgánica que es degradada diariamente por el biodigestor. (f) El volumen líquido del biodigestor ( $V_{liq}$ ) fue de  $300.06 \text{ m}^3$ . A diferencia del  $V_{dig}$ , este valor nos indica el tamaño del biodigestor necesario para digerir la fracción orgánica del sustrato en base a su velocidad de degradación. El valor del  $V_{liq}$  fue el elegido para el dimensionamiento del biodigestor, debido a que su valor es mayor al  $V_{dig}$  y los parámetros calculados previamente se encuentran en función a la capacidad máxima de funcionamiento del biodigestor. (g) El tiempo de retención hidráulico (TRH) calculado fue de aproximadamente 37 días. Este valor nos indica el tiempo que el biodigestor en su máxima capacidad se demora para completar todo el proceso de la DA utilizando HC como sustrato.

(h) Finalmente, con respecto al último parámetro, se tuvo en cuenta la temperatura ambiental del distrito de Chupaca, el cual posee una temperatura media anual de 12°C. Por lo tanto, este valor es el considerado como la temperatura a la que trabaja el biodigestor, haciéndolo uno de tipo psicrófilo (Tabla 1).

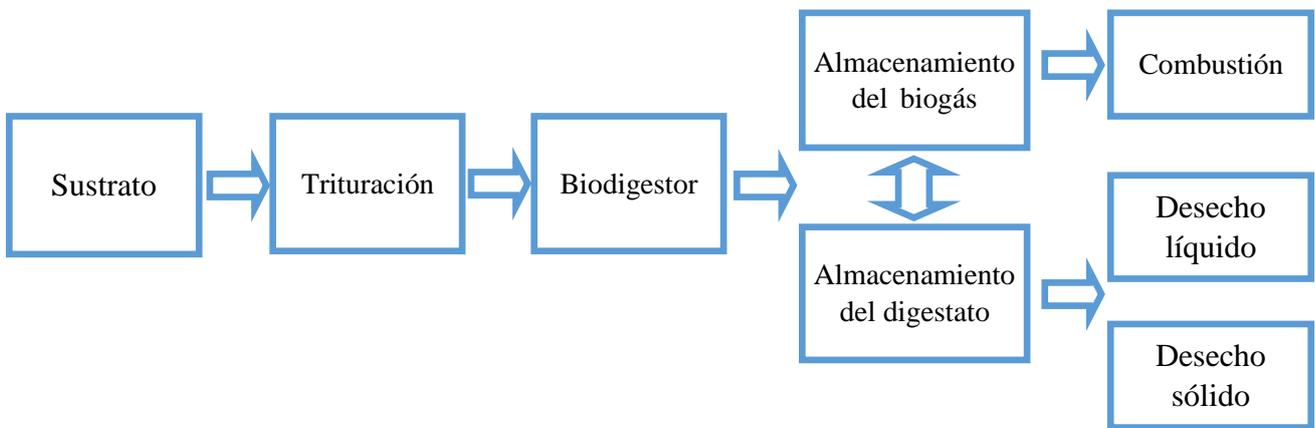
Se puede observar que los tiempos de retención del sustrato dentro del biodigestor para la etapa de diseño son menores a los utilizados en la etapa de experimentación con los BPA. Tiempos de retención muy bajos pueden evitar que los microorganismos no tengan suficiente tiempo para metabolizar la MO. Por otra parte, si estos son muy prolongados se puede tener una acumulación excesiva de material digerido, como, por ejemplo, la acumulación de ácidos grasos, lo que puede ocasionar una caída del pH (Casanovas *et al.* 2019). La literatura nos indica que los valores óptimos para tener un adecuado funcionamiento con las condiciones planteadas en estos experimentos van desde los 30 a 90 días (Varnero 2012). Esto se debe principalmente a que los microorganismos encargados de desarrollar la DA necesitaban una etapa de adaptación o también conocida como etapa de arranque. Sin embargo, una vez que el biodigestor se encuentre operativo, los tiempos de retención disminuyen (Torres and Perez 2010). Por lo tanto, esta etapa de arranque y adaptación solo es necesaria al inicio del proceso y cada vez que se realicen los mantenimientos.

La tasa de carga orgánica diaria (VCD) fue calculada en base a una estimación de HC para el año 15, siendo este un valor de ingreso diario máximo de sustrato al biodigestor. La etapa de arranque se debe empezar con valores bajos hasta el sistema se estabilice e ir incrementando la entrada de sustrato hasta sus valores máximos. Sin embargo, hay que tener en cuenta que si en la etapa de operación este valor es mínimo puede ocasionar que la producción de biogás sea baja, por lo que es necesario que se asegure una entrada mínima de 0.5 a 1.6  $m^3$  por día.

#### **4.3.3. Dimensionamiento del biodigestor**

El diseño de la propuesta del biodigestor (tipo Gobar) se elaboró teniendo en cuenta el diagrama de la Figura 27. La planta de tipo Gobar posee uno de los diseños más simples para el tratamiento de sustratos orgánicos mediante la DA (Pullen 2015). En la primera parte, el sustrato es mezclado con el agua en la zona de ingreso. En esta etapa el sustrato también es triturado para que las bolsas plásticas que contienen las HC puedan rasgarse y permitan que

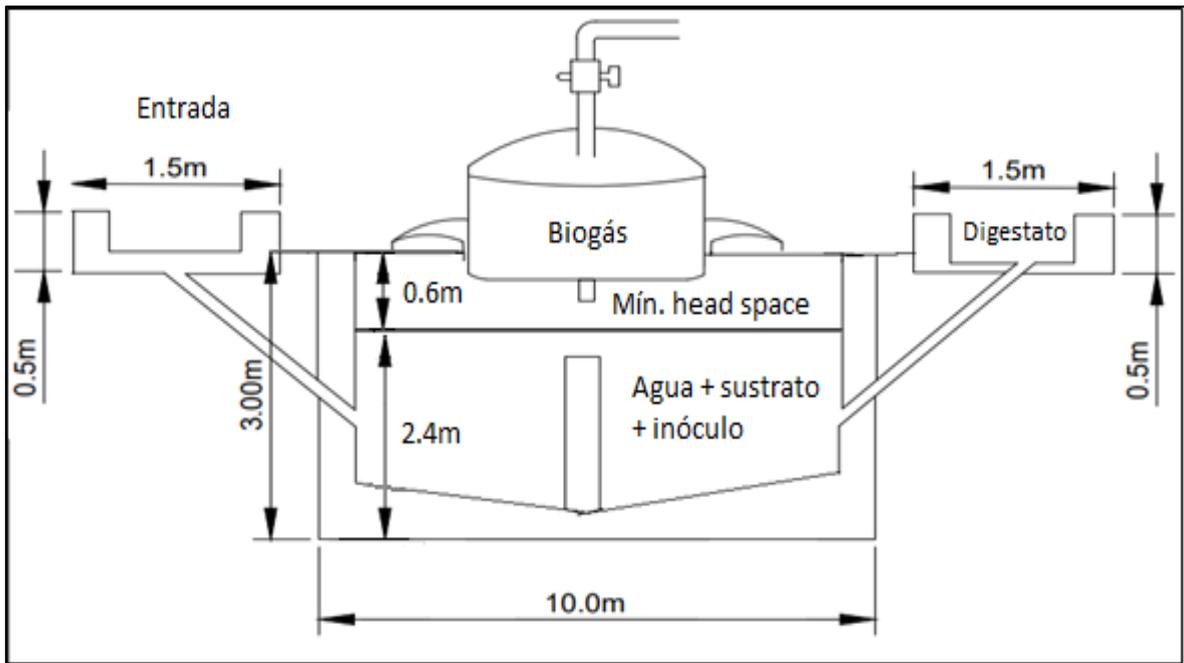
la MO del sustrato entre en contacto con el inóculo y facilitar la DA. Posteriormente esta mezcla se vierte manualmente dentro del biodigestor mediante la tubería de ingreso (canal de entrada). A medida que va ingresando el sustrato, se forma una suspensión que se eleva encima de la pared divisoria hasta la segunda cámara donde se lleva a cabo una mayor digestión del sustrato. Debido al ingreso diario de HC, el sustrato digerido de la segunda cámara sube por la tubería de salida (canal de salida) hasta un tanque de desbordamiento donde se obtiene un residuo estabilizado que puede servir como fertilizante. El biogás generado se acumula en la parte superior y se puede extraer abriendo la válvula de salida para su posterior almacenamiento o combustión.



**Figura 27: Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema de tratamiento**

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 28 se grafica el biodigestor de tipo Gobar proyectado para tener una capacidad de 300.06 m<sup>3</sup>. En la etapa experimental se ha podido observar que el mayor rendimiento se produce cuando dentro de los BPA cuando hay un “head space” del 50 por ciento. Si este espacio se reduce no necesariamente significa que la producción va a disminuir, debido a que el biodigestor se encuentra en una etapa de operación continua. Si los valores calculados para los parámetros de funcionamiento del biodigestor fueran máximos, estos están proyectados para mantener un “head space” mínimo del 20 por ciento, asegurando su correcto funcionamiento. Así mismo, es importante tener en consideración que los ensayos fueron realizados en BPAs bajo condiciones controladas. Por lo tanto, cuando se implemente este modelo a gran escala es probable que los resultados varíen. Sin embargo, nos sirve como una guía de referencia para asegurar el buen funcionamiento de un biodigestor que funcione con HC como sustrato.



**Figura 28: Vista del biodigestor tipo Gobar para el tratamiento de HC**

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 16 se resume los parámetros de diseño del biodigestor teniendo en consideración los parámetros mínimos y máximos de operación para el diseño propuesto.

**Tabla 16: Resumen de los parámetros de diseño del biodigestor para el tratamiento de HC**

Parámetro	Unidades	Mínimo	Máximo
<b>Población de perros domésticos</b>	# de individuos	1897	2737
<b>Producción diaria de HC</b>	kg/día	1138.2	1642.2
<b>Producción anual de HC</b>	ton/año	415.44	599.40
<b>Cantidad de agua</b>	m <sup>3</sup> / día	4.56	6.57
<b>Cantidad de sustrato (HC)</b>	ton/ día	1.14	1.64
<b>Carga diaria de sustrato + agua</b>	m <sup>3</sup> / día	5.7	8.21
<b>Tiempo de retención</b>	días	30 - 37	
<b>Temperatura</b>	°C	10 - 20	
<b>Volumen del biodigestor</b>	m <sup>3</sup>	246.33	300.06

Los valores mínimos y máximos fueron considerados teniendo en consideración el año cero y quince respectivamente. Donde se calculó lo siguiente: a) la producción diaria y anual de HC, b) la cantidad de sustrato diario que ingresa al biodigestor, c) la cantidad de agua necesaria para mantener la relación agua sustrato al cinco por ciento, d) el tiempo de retención calculado en días, e) la temperatura a la que funciona el biodigestor y e) los volúmenes estimados para los biodigestores.

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y SU POTENCIAL ENERGÉTICO

##### 4.4.1. Producción de biogás

En esta sección se muestran los resultados de la estimación de la producción mensual de biogás teniendo en consideración los siguiente: a) HC más “head space” del 20, 35 y 50 por ciento, b) HC más bolsa de plástico tipo I, c) HC más bolsa de plástico tipo II, d) HC más bolsa de plástico tipo III y e) HC más bolsa plástica tipo IV en los años de funcionamiento proyectado del biodigestor (Tabla 15).

**Tabla 17: Estimación de la producción mensual de biogás en m<sup>3</sup> de biogás al mes**

Año	HC + “head space”			Bolsa plástica			
	20%	35%	50%	HC + Tipo I	HC + Tipo II	HC + Tipo III	HC + Tipo IV
0	110.29	140.68	390.29	294.34	280.68	264.63	210.34
1	113.55	144.83	401.81	303.03	288.97	272.44	216.55
2	116.80	148.99	413.33	311.72	297.25	280.26	222.76
3	120.06	153.14	424.85	320.41	305.54	288.07	228.97
4	123.31	157.29	436.37	329.09	313.82	295.88	235.18
5	126.57	161.45	447.90	337.78	322.11	303.69	241.39
6	129.83	165.60	459.42	346.47	330.39	311.50	247.60
7	133.08	169.75	470.94	355.16	338.68	319.32	253.80
8	136.34	173.91	482.46	363.85	346.97	327.13	260.01
9	139.59	178.06	493.98	372.54	355.25	334.94	266.22
10	142.85	182.21	505.50	381.23	363.54	342.75	272.43
11	146.11	186.36	517.02	389.92	371.82	350.56	278.64
12	149.36	190.52	528.55	398.61	380.11	358.38	284.85
13	152.62	194.67	540.07	407.30	388.40	366.19	291.06
14	155.87	198.82	551.59	415.98	396.68	374.00	297.27
15	159.13	202.98	563.11	424.67	404.97	381.81	303.48

Los resultados se encuentran en función en la producción mensual de HC estimada en la tabla 14 y a los rendimientos de las pruebas BH1, BH2, BH3, BP1, BP2, BP3 y BP4 (ml biogás /gr de heces) de las tablas 9 y 12. En esta tabla no se consideró la capacidad máxima del biodigestor con la presencia de bolsas plásticas (20 por ciento de “head space”).

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la Tabla 17 nos muestran la cantidad de metros cúbicos de biogás que se genera cada mes durante los años de funcionamiento proyectado para el biodigestor. Según los resultados obtenidos en la sección 4.2, el rendimiento más bajo para todos los ensayos realizados fue de la prueba BH3 con 3.23 ml de biogás por cada gramo de HC caninas. Esto

nos indica que si el biodigestor funciona en su máxima capacidad (“head space” de 20 por ciento) sin la presencia de bolsas plásticas, obtendríamos 110.29 m<sup>3</sup> de biogás al mes para el año cero y 159.13 m<sup>3</sup> de biogás al mes para el año 15. Por otro lado, si solo utilizamos HC, utilizando la capacidad ideal considerada para este trabajo en la sección 4.2 de funcionamiento del biodigestor (50 por ciento de “head space”). Obtendremos 390.29 m<sup>3</sup> de biogás al mes para el año cero y 563.11 m<sup>3</sup> de biogás al mes para el año 15. Sin embargo, estos escenarios han sido considerados sin contar con la presencia de bolsas plásticas. Para este contexto, tenemos que el mayor rendimiento fue cuando se utilizó la bolsa de plástico tipo I con un “head space” del 50 por ciento (sección 4.3). Bajo estas condiciones obtendremos 294.34 m<sup>3</sup> de biogás al mes para el año cero y 424.67 m<sup>3</sup> de biogás al mes para el año 15. Mientras que para las bolsas de plástico de tipo IV (donde se obtuvo el menor rendimiento – sección 4.3) obtendremos 210.34 m<sup>3</sup> de biogás al mes para el año cero y 303.48 m<sup>3</sup> de biogás al mes para el año 15. Es necesario mencionar que en la Tabla 17 no se consideró la capacidad máxima del biodigestor con la presencia de bolsas plásticas, debido a que este escenario no fue considerado al momento de realizar los ensayos de la sección 4.3. Aunque, con los resultados obtenidos en los otros escenarios, podemos afirmar que bajo las condiciones en las que se desarrolló el presente estudio, la producción de biogás se mantiene constante.

La zona urbana del distrito de Chupaca se caracteriza por ser un lugar donde se puede observar la presencia de HC en las calles de la ciudad. Esto representa un problema para el ornato y salubridad de la zona el cual debe ser subsanado por los trabajadores de limpieza de la municipalidad. El presente trabajo busca ser una alternativa que contribuya a solucionar este problema, debido a que puede servir como referencia para tratar este tipo de residuos o de otros residuos orgánicos y convertirlos en biogás. Sin embargo, una desventaja de este tipo de tratamiento es la gran cantidad de agua necesaria para mantener una relación inóculo sustrato del cinco por ciento, lo cual además aumenta considerablemente el volumen del biodigestor. Esto sin considerar que, si se quisiera mejorar este sistema de tratamiento, como, por ejemplo, volviéndolo un sistema termófilo, el consumo de energía podría representar un problema.

Para finalizar, el digestato resultante puede tener una elevada cantidad de humedad, por lo que, si se desea comercializarlo como fertilizante, es necesario que pase por un proceso de

deshidratación. Además, la calidad del digestato se puede ver afectada por la presencia de impurezas como piedras, arena, o tomando en cuenta el presente trabajo, el plástico. Por lo tanto, si desea comercializar o reutilizar el digestato, debe secarse para posteriormente remover los plásticos mediante un tamizado. Su uso representa una oportunidad para reciclar los nutrientes y la MO del sustrato mediante su uso como fertilizante, sin embargo, una limitante para su venta es que el mercado para este tipo de producto es muy limitado y variable.

#### 4.4.2. Potencial energético del biogás

El potencial energético del biogás generado mensualmente fue calculado en base a la determinación de la producción mensual de biogás (Tabla 15). Los resultados se muestran en la Tabla 18.

**Tabla 18: Potencial energético del biogás en MJ mensuales**

Año	HC + “head space”			Bolsa plástica			
	20%	35%	50%	HC + Tipo I	HC + Tipo II	HC + Tipo III	HC + Tipo IV
0	2536.67	3235.64	8976.67	6769.82	6455.64	6086.49	4837.82
1	2611.65	3331.09	9241.63	6969.69	6646.31	6266.12	4980.65
2	2686.40	3426.77	9506.59	7169.56	6836.75	6445.98	5123.48
3	2761.38	3522.22	9771.55	7369.43	7027.42	6625.61	5266.31
4	2836.13	3617.67	10036.51	7569.07	7217.86	6805.24	5409.14
5	2911.11	3713.35	10301.70	7768.94	7408.53	6984.87	5551.97
6	2986.09	3808.80	10566.66	7968.81	7598.97	7164.50	5694.80
7	3060.84	3904.25	10831.62	8168.68	7789.64	7344.36	5837.40
8	3135.82	3999.93	11096.58	8368.55	7980.31	7523.99	5980.23
9	3210.57	4095.38	11361.54	8568.42	8170.75	7703.62	6123.06
10	3285.55	4190.83	11626.50	8768.29	8361.42	7883.25	6265.89
11	3360.53	4286.28	11891.46	8968.16	8551.86	8062.88	6408.72
12	3435.28	4381.96	12156.65	9168.03	8742.53	8242.74	6551.55
13	3510.26	4477.41	12421.61	9367.90	8933.20	8422.37	6694.38
14	3585.01	4572.86	12686.57	9567.54	9123.64	8602.00	6837.21
15	3659.99	4668.54	12951.53	9767.41	9314.31	8781.63	6980.04

Los resultados presentados en esta tabla fueron calculados multiplicando la producción de biogás calculada en la tabla 15 por el potencial calorífico del biogás (23 MJ/m<sup>3</sup>)

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 18 tenemos el potencial energético del biogás en MJ mensuales. Se consideró el poder calorífico mínimo del biogás de 23 MJ por cada metro cúbico de biogás (Akunna 2018). El potencial energético mínimo estimado fue de 2536.67 MJ y el máximo de 12951.53 MJ. Estos valores pueden servir como referencia para que el biogás generado pueda ser utilizado en distintos usos como: a) generación de energía eléctrica, b) combustible de cocinas y estufas que funcionan con gas, c) combustible de vehículos, etc.

Los resultados presentados en este trabajo nos han permitido determinar lo siguiente: a) Los experimentos realizados a nivel de laboratorio sirven para estimar la utilidad y eficiencia que nos brinda un determinado sustrato en un sistema de tratamiento anaerobio. b) Estimar el funcionamiento de este tipo de sistemas anaerobios a gran escala, b) conocer el potencial energético del sustrato utilizado y finalmente c) estimar los beneficios económicos, en el ambiente y a nivel sanitario.

## V. CONCLUSIONES

- Los resultados de las pruebas en los digestores a pequeña escala utilizando las HC como sustrato mostraron que el rendimiento para la producción de metano fue afectado por la temperatura ambiental, principalmente cuando se presentaron picos de temperatura durante el día. Así mismo, también se pudo observar que el pretratamiento del inóculo contribuyó en que se mejore las etapas de adaptación y arranque.
- Los resultados de las pruebas con presencia de bolsas plásticas mostraron que las HC contenidas en este tipo de material pueden ser utilizados como sustrato para la producción de biogás. Aunque esta producción está condicionada a que se le realice un pretratamiento (rasgar, moler o triturar las bolsas de plástico) para que el sustrato pueda entrar en contacto con la mezcla de inóculo-agua y se favorezca la producción de biogás.
- La estimación de la cantidad de HC generadas en el distrito de Chupaca mostraron que se necesita un biodigestor de 300 m<sup>3</sup> para su tratamiento. La implementación de este biodigestor puede servir para tratar aproximadamente 600 toneladas de HC al año en su capacidad óptima.
- Los resultados nos muestran que el tratamiento y reaprovechamiento de las HC que se generan en el distrito de Chupaca puede servir como alternativa para la producción de biogás, la cual a su vez representa una fuente energética importante que puede ser utilizada en beneficio de los pobladores del distrito.

## **VI. RECOMENDACIONES**

- En el presente estudio se presentó un solo diseño de biodigestor para el tratamiento de las HC que se generan en el distrito de Chupaca. Sin embargo, esto solo es una propuesta que puede ser mejorada evaluando las condiciones para su implementación. Por ejemplo, se pueden implementar biodigestores más pequeños que funcionen como módulos, los cuales se pueden ir implementando a medida que la cantidad de sustrato incrementa.
- Para implementar este tipo de tecnologías es muy importante la colaboración de empresas privadas que puedan solventar los gastos de implementación, instalación y mantenimiento. De esta forma, este tipo de tratamientos se pueden convertir en alternativas que sean viables y rentables a lo largo del tiempo.
- Se puede mejorar el rendimiento de este tipo de sistema de tratamiento utilizando la codigestión. La combinación de las HC con otros sustratos orgánicos permite crear un balance entre la relación carbono - nitrógeno y así asegurar la máxima cantidad de nutrientes disponibles para las bacterias anaerobias, incrementando la producción de biogás.
- Es recomendable realizar más estudios que involucren a las HC como sustrato, para evaluar otras variables que puedan afectar la producción de biogás, como, por ejemplo la alimentación de los PD. Además, se puede comparar los resultados del presente trabajo con otro tipo de tratamientos anaerobios, como el compostaje.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abarza, F. 2014. Efecto de las heces caninas sobre la producción de biogás (en línea). Santiago de Chile, Universidad de Chile. 74 p. Available at [http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/172781/Efecto\\_de\\_las\\_heces\\_caninas\\_.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/172781/Efecto_de_las_heces_caninas_.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- Akunna, J. 2018. Wastewater Treatment and Biogas Plants: A practical handbook. First edit. Boca Raton, FL, CRC Press/Taylor & Francis Group. 1–169 p.
- Alcayaga, S; Glaría, J; Guerrero, L. 1999. Regulaciones de temperatura y potencial de hidrógeno en un biodigestor anaerobio de lecho de lodo granular expandido. Valparaíso, Marzo. 11p. Available at <http://profesores.elo.utfsm.cl/~jgb/ALCAYAGA1c>.
- Angelidaki, I; Alves, M; Bolzonella, D; Borzacconi, L; Campos, JL; Guwy, AJ; Kalyuzhnyi, S; Jenicek, P; Van Lier, JB. 2009. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology* 59(5):927–934. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2009.040>.
- Angelidaki, I; Sanders, W. 2004. Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* 3(2):117–129. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11157-004-2502-3>.
- Ardila, A; Parada, V. 2016. Implementación de un biodigestor para el manejo sanitario de heces caninas potencialmente transmisoras de enfermedades zoonóticas en el refugio anima Dame vida, en Tenjo, Cundinamarca. s.l., Universidad de La Salle. 65 p.

- Arellano, L; Dorado, AD; Fortuny, M; Gabriel, D; Gamisans, X; González-Sánchez, A; Hernández, S; Lafuente, J; Monroy, O; Mora, M; Revah, S; Sierra, H. 2017. Composición y principales características del biogás. In *Gabriel, D; Sierra, H (eds.)*. Barcelona, España, Universidad Autónoma de Barcelona. p. 25–30.
- Atitwa, SC. 2019. How many dogs are there in the word? (en línea, sitio web). Consultado 1 Oct. 2021. Available at <https://www.worldatlas.com/articles/how-many-dogs-are-there-in-the-world.html>.
- Avcioglu, AO; Türker, U. 2012. Status and potential of biogas energy from animal wastes in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(3):1557–1561. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.006>.
- De Baere, L; Mattheeuws, B. 2008. Anaerobic digestion of solid waste. *Waste Management World* 9.
- Bentosela, M; Mustaca, AE. 2007. Comunicación entre perros domésticos (*Canis familiaris*) y hombres. *Revista Latinoamericana de Psicología* 39:375–387.
- Botero, R; Preston, T. 1987. Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. Manual para su instalación, operación y utilización. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali, Colombia, 353-362.
- Casanovas, G; Della, F; Reymundo, F; Serafini, R. 2019. Guía teórico - práctica sobre el biogás y los biodigestores. (online). Buenos Aires, Argentina, Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura. 104 p. Available at [http://www.probiomasa.gob.ar/\\_pdf/GuiadeBiogasyBiodigestores-19-07-10.pdf](http://www.probiomasa.gob.ar/_pdf/GuiadeBiogasyBiodigestores-19-07-10.pdf).
- Chasnyk, O; Sołowski, G; Shkarupa, O. 2015. Historical, technical and economic aspects of biogas development: Case of Poland and Ukraine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 52:227–239. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.122>.

- Chen, Y; Cheng, JJ; Creamer, KS. 2008. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology* 99(10):4044–4064. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.057>.
- Christ, O; Wilderer, PA; Angerhöfer, R; Faulstich, M. 2000. Mathematical modeling of the hydrolysis of anaerobic processes. *Water Science and Technology* 41(3):61–65. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0056>.
- Ciotola, RJ; Martin, JF; Castaño, JM; Lee, J; Michel, F. 2013. Microbial community response to seasonal temperature variation in a small-scale anaerobic digester. *Energies* 6(10):5182–5199. DOI: <https://doi.org/10.3390/en6105182>.
- Compañía peruana de estudios de mercados y opinión pública. (2018). *Tendencia de mascotas en los hogares a nivel nacional*. Lima, Perú, s.e.
- Corrales, LC; Antolinez Romero, DM; Bohórquez Macías, JA; Corredor Vargas, AM. 2015. Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Nova* 13(24):55. DOI: <https://doi.org/10.22490/24629448.1717>.
- FEDIAF. (2019). *Annual Report 2019*. Bruxelles, s.e.
- Forster-Carneiro, T; Pérez, M; Romero, L. 2008. Influence of total solid and inoculum contents on performance of anaerobic reactors treating food waste. *Bioresource Technology* 99:6994–7002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.01.018>.
- Gerardi, MH. 2003. *The microbiology of anaerobic digesters*. New Jersey, USA, John Wiley & Sons. 188 p.
- Guebitz, GM; Bauer, A; Bochmann, G; Gronauer, A; Weiss, S. 2015. *Biogas Science and Technology Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*. s.l., s.e. 1–200 p.
- Guevara, L; Zaldúa, K. 2018. *Alternativas Para Reemplazo De Bolsas Plásticas En Recogida De Heces Caninas Para El Parque Público Milenta-Tejar*. s.l., Universidad

Distrital Francisco José de Caldas. 1–59 p. Available at <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/14075/1/GuevaraBolivarLauraLorena2018.pdf>.

- Hale, R; Seeley, M; La Guardia, M; Mai, L; Zeng, E. 2020. A Global Perspective on Microplastics. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 125(1):e2018JC014719. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2018JC014719>.
- Hilbert, J. 2003. Manual para la producción de biogás. Buenos Aires, Argentina, Instituto de Ingeniería Rural, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria – INTA. p. 57.
- Horan, N; Zahrim, A; Wid, N. 2018. Anaerobic Digestion Processes: Applications and effluent treatment. s.l., s.e. p. 85–103 DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-10-8129-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-10-8129-3_6).
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2018). Resultados Definitivos del departamento de Junín. Lima, Perú, s.e.
- Karpenstein, M. 2001. Sustainable Cultivation Concepts for Domestic Energy Production from Biomass. *Critical reviews in Plant Sciences* 20 (1):1–14.
- Kaza, S; Yao, L; Bhada-Tata, P; Van Woerden, F. (2018). What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050. Washington, DC, s.e.
- Khalid, A; Arshad, M; Anjum, M; Mahmood, T; Dawson, L. 2011. The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management* 31(8):1737–1744. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.021>.
- Koscinczuk, P. 2017. Domesticación, bienestar y relación entre el perro y los seres humanos. *Revista Veterinaria* 28(1):78–87.
- Kubinyi, E; Sasvári-Székely, M; Miklósi, Á. 2011. From Genes to Animal Behavior. Inoue-Murayama, M; Kawamura, S; Weiss, A (eds.). Tokyo, Springer Japan, (Primateology Monographs). 115–136 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-4-431-53892-9>.

- De Lemos, C. 2007. Anaerobic reactors. 1st ed. London, IWA Publishing.
- Li, Y; Park, SY; Zhu, J. 2011. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15(1):821–826. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.042>.
- Lieberman, N; Muhlbauer, WK. 2012. Biogas production: Pretreatment methods in anaerobic production. Mudhoo, A (ed.). s.l., Wiley.
- Lin, CY; Lay, CH. 2004. Carbon/nitrogen-ratio effect on fermentative hydrogen production by mixed microflora. *International Journal of Hydrogen Energy* 29(1):41–45. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(03\)00083-1](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(03)00083-1).
- Llamas Redondo, M. 2015. Estudio del efecto del rango de temperatura sobre la producción de biohidrógeno por digestión anaerobia a partir de residuos orgánicos. s.l., Universidad de Cádiz. 42 p.
- Martí-Herrero, J. 2008. Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación. s.l., s.e., vol.53. 1689–1699 p. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1048.6242>.
- Miller, TL; Wolin, MJ. 2001. Inhibition of growth of methane-producing bacteria of the ruminant forestomach by hydroxymethylglutaryl ~ SCoA reductase inhibitors. *Journal of Dairy Science* 84(6):1445–1448. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(01\)70177-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(01)70177-4).
- Morey, DF. 2006. Burying key evidence: the social bond between dogs and people. *Journal of Archaeological Science* 33:158–175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2005.07.009>.
- Okoroigwe, EC; Ibetu, CN; Ezema, CG. 2014. Experimental study of anaerobic digestion of dog waste. *Scientific Research and Essays* 9(6):121–127. DOI: <https://doi.org/10.5897/SRE2013.5705>.

- Okoroigwe, EC; Ibeto, CN; Okpara, CG. 2009. Comparative study of the potential of dog waste for biogas production. Trends in Applied Sciences Research :71–77.
- Olaya, Y; González, L. 2009. Fundamentos para el diseño de biodigestores. Palmira, , Colombia. Universidad Nacional de Colombia. p. 31.
- Park Spark. 2021. (en línea, sitio web). Consultado 30 May 2021. Available at <https://www.parksparkproject.com/how-it-works>.
- Phetyim, N; Wanthong, T; Kannika, P; Supngam, A. 2015. Biogas Production from Vegetable Waste by Using Dog and Cattle Manure. s.l., Elsevier B.V., vol.79. 436–441 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.515>.
- Portal Regional SINIA. 2020. (en línea, sitio web). Consultado 9 Sep. 2021. Available at <https://sinia.minam.gob.pe/informacion/tematicas?tematica=08>.
- Pullen, T. 2015. Anaerobic Digestion: Making Biogas, Making Energy (online). Jackson, F (ed.). s.l., Routledge. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781315770772>.
- Rivas, O; Faith, M; Guillén, R. 2010. Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. Tecnología en Marcha 23(1):39–46.
- Rodríguez, D; García, A. 2017. Diseño y construcción de un biodigestor para la producción de biogás a partir de heces caninas. Bogotá, Colombia, Universidad Distrital Francisco José De Caldas. 97 p.
- Rosato, MA. 2017. Managing Biogas Plants. s.l., CRC Press. DOI: <https://doi.org/10.1201/b22072>.
- Roston, M; Ramos, D. 2016. The Dogs That Don't Belong to Anyone (en línea, sitio web). Consultado 1 Oct. 2019. Available at [www.nytimes.com/interactive/2016/04/15/science/street-dogs-village-dogs-stray-dogs.html?ref=nyt-es&mcid=nyt-es&subid=article](http://www.nytimes.com/interactive/2016/04/15/science/street-dogs-village-dogs-stray-dogs.html?ref=nyt-es&mcid=nyt-es&subid=article).

- Saico, L. 2003. Determinación de sustratos óptimos para la producción de biogás a partir del estiércol de ganado ovino, vacuno y porcino de los corrales de crianza de la UNALM. s.l., Universidad Nacional Agraria La Molina. 107 p.
- Sanchez, N; Sanz, C. 2019. Guía explicativa de etiquetas para la gestión de residuos. s.l., Repositorio Institucional de la Universidad de Alicante. p. 18 DOI: <https://doi.org/10.14198/guia-explicativa-etiquetas-gestion-residuos>.
- Schlegel, H; Zaborosch, C. 1997. Microbiología general. 7th ed. Barcelona, España, Ediciones Omega. 291–336 p.
- SENAMHI - Junín. 2021. (en línea, sitio web). Consultado 3 Nov. 2020. Available at <https://www.senamhi.gob.pe/main.php?dp=junin&p=mapa-climatico-del-peru>.
- Severiche, C; Acevedo, R. 2013. Biogás a partir de residuos orgánicos y su apuesta como combustibles de segunda generación. Ingenium Revista de la facultad de ingeniería 14(28):6. DOI: <https://doi.org/10.21500/01247492.1330>.
- Shen, Y; Linville, JL; Urgun-demirtas, M; Mintz, MM; Snyder, SW. 2015. An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants in the United States: Challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs. Renewable and Sustainable Energy Reviews 50:346–362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.129>.
- Silva, W; Duarte, V; Prasad, S. 2004. Influence of inoculum on performance of anaerobic reactors for treating municipal solid waste. Bioresource Technology 94:261–266. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.01.006>.
- Steinhauser, A; Deublein, D. 2011. Biogas from Waste and Renewables Energy: An Introduction. 2nd ed. s.l., Wiley - VCH. 101–108 p.

- Sun, Q; Li, H; Yan, J; Liu, L; Yu, Z; Yu, X. 2015. Selection of appropriate biogas upgrading technology-a review of biogas cleaning, upgrading and utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51:521–532. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.029>.
- Tabatabaei, M; Ghanavati, H. 2018. *Biogas: Fundamentals, process and Operation*. s.l., Springer. 110–127 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64046-8.00154-3>.
- Torres, P; Perez, A. 2010. Actividad metanogénica específica: Una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales (online). *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente* 9:5–14. Available at <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=231116434001>.
- Typhina, E; Yan, C. 2014. Managing Dog Waste: Campaign Insights From the Health Belief Model. *Applied Environmental Education and Communication* 13(2):73–82. DOI: <https://doi.org/10.1080/1533015X.2014.944247>.
- Umar, B; Ismail, N. 2014. Anaerobic digestion of cow dung for biogas production. (May).
- Varnero, M. 2012. *Manual del biogás*. Ministerio de Energía del Gobierno de Chile; Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo; Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO); Global Environment Facility (eds.). Santiago de Chile, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 119 p.
- Veeken, A; Hamelers, B. 1999. Effect of temperature on hydrolysis rates of selected biowaste components. *Bioresource Technology* 69:249–254.
- Vilà, C; Amorim, IR; Rice, JE; Honeycutt, RL; Crandall, KA; Lundeberg, J; Wayne, RK. 2012. Multiple and Ancient Origins of the Domestic Dog Multiple and Ancient Origins of the Domestic Dog Carles Vila. 1687(1997). DOI: <https://doi.org/10.1126/science.276.5319.1687>.

- Wayne, RK; Bridgett, M. 2012. Evolutionary genomics of dog domestication. :3–18. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00335-011-9386-7>.
- Wellinger, A; Murphy, J; Baxter, D. 2013. The Biogas Handbook: Science, Production and Applications. s.l., s.e. 1–476 p. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857097415>.
- Wilson, D; Rodic, L; Modak, P; Soos, R; Carpintero, A; Velis, K; Iyer, M; Simonett, O. (2015). Global Waste Management Outlook. s.l., United Nations Environment Programme DOI: <https://doi.org/10.18356/765baec0-en>.
- Yadvika; Santosh; Sreekrishnan, TR; Kohli, S; Rana, V. 2004. Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques. Bioresource Technology 95(1):1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.02.010>.
- Zúñiga, I; Caro, J. 2020. Heces caninas: un riesgo permanente y sin control para la salud pública. Revista Latinoamericana de Infectología Pediátrica 33(2):74–77. DOI: <https://doi.org/10.35366/94417>.

## VIII. ANEXOS

### Anexo 1: Carta de autorización de la municipalidad de Chupaca



Chupaca, 27 de noviembre de 2020

OFICIO N° 114-2020-GM-MPCH

Señor:

DAVID EDUARDO SEVERO ROMERO

Av. Leoncio Prado N° 1368 Interior 24 Distrito de Pilcomayo

Presente. –

Asunto : Autorización para Realizar Estudio de Investigación

De mi mayor consideración:

Tengo el agrado de dirigirme a usted en nombre de la Municipalidad Provincial de Chupaca y de esta Gerencia, el motivo de la presente es de **AUTORIZAR A SU PERSONA REALIZAR ESTUDIOS DE INVESTIGACION RESPECTO AL MEDIO AMBIENTE (Reutilización y aprovechamiento de residuos caninos)** en la Municipalidad Provincial de Chupaca, a efectos de la elaboración de su Tesis, es cuanto informo para los fines pertinentes.

Sin otro en particular, me suscribo de usted.

Atentamente,

MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE CHUPACA  
DAVID EDUARDO SEVERO ROMERO  
GERENTE MUNICIPAL

## Anexo 2: Comunidades microbianas presentes la digestión anaeróbica

I. Por etapa de digestión anaeróbica			
Etapa	Características	Microorganismos presentes	Referencia
Hidrólisis	Bacterias que son capaces de producir enzimas celulasas con capacidad de hidrolizar la biomasa con grandes cantidades de celulosa.	<i>Cellulomonas, Clostridium sp, Bacillus sp, Thermomonospora, Ruminococcus sp, Bacteriodes, Erwinia, Acetovibrio, Microbispora y Streptomyces sp</i>	(Li et al. 2011)
	Bacterias hidrolíticas que rompen los enlaces complejos de la materia orgánica	<i>Clostridium y Bacteroides</i>	(Corrales et al. 2015)
	Anaerobios estrictos y facultativos	<i>Bacterioidess, Clostridium y Streptococcus</i>	(Yadvika et al. 2004)
	Microorganismos responsables de la hidrólisis	<i>Bacteroides, Lactobacillus, Propionibacterium, Sphingomonas, Sporobacterium, Megasphaera, Bifidobacterium</i>	(Varnero 2012)
Acidogénesis	Bacterias que se encargan de convertir azúcares, aminoácidos y lípidos en ácidos orgánicos, $CO_2$ y $H_2$ .	<i>Clostridium Peptostreptococcus, Propionibacterium, Micrococcus, Lactobacillus y Bacillus</i>	(Corrales et al. 2015)
	Están presentes en todas las fases de la fermentación, pero son dominantes en la etapa acidogénica.	<i>Clostridium, Paenibacillus, Ruminococcus</i>	(Varnero 2012)
	Consideradas como bacterias acidogénicas	<i>Lactobacillus, Clostridium, Ruminococcus y Lachnospiraceae</i>	(Chasnyk et al. 2015),
Acetogénesis	Bacterias exclusivamente acetogénicas que reducen el $CO_2$ , en acetato.	<i>Acetobacterium sp, Sporomusa</i>	(Li et al. 2011)
	Géneros de bacterias que contienen bacterias acetogénicas y no acetogénicas.	<i>Clostridium sp, Ruminococcus sp, Eubacterium sp</i>	(Li et al. 2011)
	Bacterias homoacetogénicas que catalizan la formación de acetato a partir de $CO_2$ y $H_2$ .	<i>Clostridium aceticum, Clostridium formicoaceticum y Acetobacterium wooddi</i>	(Corrales et al. 2015)
	Bacterias que son productoras de $H_2$ .	<i>Syntrophobacter wolunii y Syntrophomonas wolfei</i>	Corrales et al. 2015
	Bacteria considerada como acetogénica.	<i>Alphaproteobacteria,</i>	(Chasnyk et al. 2015)

Fuente: Elaboración propia

## Anexo 2: Comunidades microbianas presentes la digestión anaeróbica (continuación)

<b>I. Por etapa de digestión anaeróbica</b>			
<b>Etapa</b>	<b>Características</b>	<b>Microorganismos presentes</b>	<b>Referencia</b>
Metanogénesis	Fase metanogénica llevada a cabo por anaerobios estrictos	<i>Bacteroides sp,</i> <i>Clostridium sp,</i> <i>Bifidobacterium sp,</i> <i>Sphaerophorus sp,</i> <i>Fusobacterium sp,</i> <i>Veillonella sp, Peptococcus sp, Desulfovibrio sp,</i> <i>Methanobacterium sp,</i> <i>Methanococcus sp,</i> <i>Methanospirillum sp,</i> <i>Methanobrevibacter sp,</i> <i>Methanomicrobium sp</i>	(Corrales et al. 2015)
	Bacterias que pueden utilizar acetato e hidrógeno para producir metano	<i>Methanotherix sp,</i> <i>Methanosarcina sp.,</i> <i>Methanobacterium,</i> <i>Methanococcus.</i>	(Yadvika et al. 2004)
		<i>Methanosarcina sp,</i> <i>Methanospirillum hungati</i>	(FAO) 2011
		<i>Methanobacterium thermoautotrophicum,</i> <i>Methanosarcina barkeri</i>	(Schlegel y Zaborosch 1997)
<b>II. Por rangos de temperatura</b>			
<b>Tipo de microorganismos</b>	<b>Características</b>	<b>Microorganismos presentes</b>	<b>Referencia</b>
Psicrófilos	Microorganismos que crecen en temperaturas entre 10 – 15 C°	<i>Bacillus spp</i>	(Corrales et al. 2015), (Khalid et al. 2011)
Psicrótrofos	Microorganismos que crecen en temperaturas entre 20 – 30 C°	<i>Clostridium spp</i>	
Mesófilos	Microorganismos que crecen en temperaturas entre 30 – 37 C°	<i>Clostridium spp,</i> <i>Methanococcus spp,</i> <i>Methanobacterium spp</i> <i>Methanobrevibacter spp</i>	
Termótrofos	Microorganismos que crecen en temperaturas entre 42 – 46 C°	<i>Methanococcus spp,</i> <i>Methanobacterium spp</i>	
Termófilos	Microorganismos que crecen en temperaturas entre 50 – 80 C°	<i>Clostridium spp,</i> <i>Lactobacillus spp, Thermus spp, Thermococcus spp</i> <i>Methanohalobium spp.</i> <i>Methanosarcina spp.</i>	

Fuente: Elaboración propia

## Anexo 2: Comunidades microbianas presentes la digestión anaeróbica (continuación)

III. Por rangos de pH			
Tipo de microorganismos	Características	Microorganismos presentes	Referencia
Acidófilos	Microorganismos que crecen entre 1.1 – 5.5 de pH	<i>Lactobacillus spp</i> , <i>Bifidobacterium bifidum</i>	(Corrales et al. 2015)
Neutrófilos	Microorganismos que crecen entre 5.5 – 8.0 de pH	<i>Clostridium perfringes</i> , <i>Methanococcus sp</i> , <i>Methanobacterium sp</i> , <i>Propionibacterium acidipropionici</i>	
Alcalonófilos	Microorganismos que crecen entre 8.5 – 11.5 de pH	<i>Clostridium botulinum</i> , <i>Clostridium sporongenes</i> , <i>Clostridium tetani</i> , <i>Fusobacterium spp</i> , <i>Micrococcus spp</i>	

Fuente: Elaboración propia

**Anexo 3: Concentración inhibitoria de la digestión anaeróbica de ciertos compuestos comunes.**

Inhibidor	Concentración inhibitoria	Referencia	
<b>Amoniac</b>	NH <sub>3</sub>	> 3000 mg/L	Varnero 2012
	NH <sub>4</sub>	> 5000 mg/L	(Khalid <i>et al.</i> 2011)
<b>Nitrato</b>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	50 mg/L	Hilbert 2003
<b>Sulfatos y sulfuros</b>	SO <sub>4</sub>	5000 mg/L	Hilbert 2003
	H <sub>2</sub> S	100 – 800 mg/L	(Chen <i>et al.</i> 2008)
	S <sup>-2</sup>	50 mg/L	(Gerardi 2003)
<b>Cianuro</b>	CN <sup>-</sup>	25 mg/L	Hilbert 2003
<b>Sales y minerales</b>	NaCl	40000 mg/L	Hilbert 2003
	Na	3500 -5500	(Gerardi 2003)
	K	2500 – 4500 mg/L	Hilbert 2003
	Ca	2500 – 4500 mg/L	Hilbert 2003
	Mg	1000 – 1500 mg/L	(Gerardi 2003)
	Al (OH <sub>3</sub> )	> 1000 mg/L	(Chen <i>et al.</i> 2008)
	Al <sup>3+</sup>	> 2500 mg/L	(Chen <i>et al.</i> 2008)
	As	1.6 mg/L	(Gerardi 2003)
Zn	5 – 20 mg/L	(Gerardi 2003)	
<b>Metales pesados</b>	Cu	0.1 mg/L	Hilbert 2003
	Cr <sup>+6</sup>	5 – 50 mg/L	(Gerardi 2003)
	Cr <sup>+3</sup>	50 – 500 mg/l	(Gerardi 2003)
	Ni	200 – 500 mg/L	Hilbert 2003
	Cd	0.02 mg/L	(Gerardi 2003)
	Fe	5 mg/L	(Gerardi 2003)
<b>Ácidos orgánicos</b>	Ácido acético	> 2000 mg/L	(Khalid <i>et al.</i> 2011)
	Ácido butírico	> 3000 mg/L	(Khalid <i>et al.</i> 2011)
<b>Detergentes</b>	ABS (Detergente sintético)	20 – 40 mg/L	Hilbert 2003
<b>Clorofenoles</b>	PCF (Pentaclorofenol)	0.5 – 10 mg/L	(Chen <i>et al.</i> 2008)
<b>Hidrocarburos halogenados alifáticos</b>	C <sub>4</sub> Cl <sub>6</sub> , C <sub>2</sub> Cl <sub>6</sub> o C <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub>	> 100 mg/L	(Chen <i>et al.</i> 2008)
	CHCl <sub>3</sub>	> 15 mg/L	(Chen <i>et al.</i> 2008)

Fuente: Elaborado con base en Hilbert (2003), Gerardi (2003), Chen *et al.* (2008), Khalid *et al.* (2011) y Varnero (2012).

**Anexo 4: Caracterización de los envases PET según su forma y capacidad de almacenamiento de líquidos**

FORMATO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS ENVASES PET				
OBJETIVO: Caracterizar los envases PET utilizados para la construcción de los BPA según su capacidad de almacenamiento			Código	DSR-FOR-01
Fecha: 10/02/2021				
1) Colección de datos				
Tipo N°	Marca	Contenido	Volumen (ml)*	Imagen
1	San Luis	Agua mineral	625	
2	Cielo	Agua mineral	625	
3	Coca cola sin azúcar	Gaseosa	500	
4	Sprite	Gaseosa	500	
5	7up	Gaseosa	500	

\* El volumen al que se hace referencia es al que se encuentra en las etiquetas de los envases

## Anexo 5: Formato para el cálculo del volumen teórico de los envases PET

### Formato para el cálculo del volumen teórico de los envases PET

**PRUEBA:** Determinación del volumen de las botellas PET

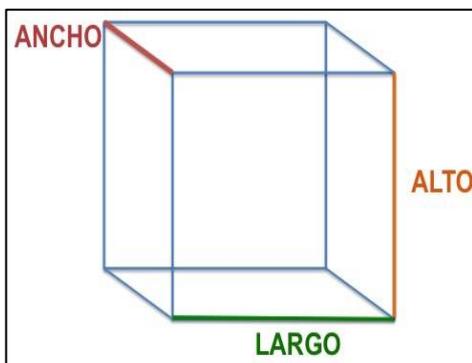
**MÉTODO:** Por cálculo del volumen de un prisma rectangular irregular

**Fecha:** 10/02/2020

**Código**

DSR-FOR-02

#### 1) Método:



Envase utilizado:	
<b>Largo (cm):</b>	14.0
<b>Ancho (cm):</b>	8.6
<b>Alto (cm):</b>	7.0
<b>Volumen (ml)</b>	842.8

#### Margen de error:

<b>V:</b>	volumen
<b>p</b>	profundidad
<b>a:</b>	largo
<b>h:</b>	ancho
<b>dp:</b>	error

$$\text{Volumen} = \text{largo} * \text{ancho} * \text{alto}$$

$$dV = a * h * dp$$

#### 2) Colección de datos:

Tipo N°	Teórica				
	Largo (cm)	Ancho (cm)	Alto (cm)	Volumen (ml)	Error aprox (+/-)
1	14.0	8.6	5.1	614.0	2
2	14.0	8.6	5.0	602.0	2
3	14.0	8.6	4.4	529.8	1.5
4	14.0	8.6	4.3	517.7	1.5
5	14.0	8.6	4.6	553.8	1.5

## Anexo 6: Formato para la determinación del volumen de los envases PET utilizando instrumentos de medida

### Formato para la determinación del volumen de los envases PET utilizando instrumentos de medida

**PRUEBA:** Determinación del volumen de las botellas PET

**MÉTODO:** Cálculo del volumen por medio de instrumentos de medida

**Fecha:** 10/02/2020

**Código**

DSR-FOR-03

#### 1) Método:

- 1.- Se procedió a llenar los envases con agua hasta llegar al ras de su capacidad
- 2.- Posteriormente se trasladó el contenido hacia las probetas de 1000, 500, 100 y 10 ml.
- 3.- Se midieron los volúmenes determinados en las probetas.
- 4.- Se repitió la prueba por triplicado.
- 5.- Se anotaron los datos



#### Margen de error (+/-):

<b>10 ml</b>	0.1 ml
<b>100 ml</b>	1 ml
<b>500 ml</b>	S/N *
<b>1000 ml</b>	S/N *

\*La probeta no especifica su margen de error

#### 2) Colección de datos:

Tipo N°	Repetición	Probeta				Volumen (ml)	Volumen final (ml)
		1000 ml *	500 ml *	100 ml	10 ml		
1	1	700.0	700.0	695.0	698.0	698.3	696.9
	2	700.0	690.0	695.0	697.0	695.5	
	3	700.0	700.0	690.0	698.0	697.0	
2	1	700.0	700.0	700.0	708.0	702.0	702.7
	2	700.0	702.0	702.0	707.4	702.9	
	3	700.0	703.0	703.0	707.5	703.4	
3	1	550.0	554.0	554.0	556.0	553.5	553.4
	2	550.0	553.0	553.0	555.0	552.8	
	3	550.0	555.0	555.0	556.0	554.0	
4	1	551.0	555.0	554.0	552.0	553.0	552.6
	2	550.0	554.0	553.0	552.0	552.3	
	3	550.0	554.0	553.0	553.0	552.5	
5	1	400.0	400.0	415.0	412.0	406.8	574.9
	2	410.0	410.0	410.0	410.0	410.0	
	3	410.0	400.0	410.0	415.0	408.8	

\*El cálculo del error fue aproximado debido a que no se conocía el error aproximado de las probetas de 500 y 1000 ml

**Anexo 7: Resumen de los volúmenes calculados para los envases utilizados como BAP.**

Tipo de BPA	Volumen (ml)		
	Etiqueta	Teórica	Por instrumentos de medida
1	625	614.0	696.9
2	625	602.0	702.7
3	500	529.8	553.4
4	500	552.6	517.7
5	500	397.3	574.9

## Anexo 8: Desgasificación del inóculo

FORMATO PARA LA DESGASIFICACIÓN DEL INÓCULO						
<b>OBJETIVO:</b> Eliminar la fracción orgánica presente en el inóculo mediante la técnica de desgasificación del inóculo.					<b>CÓDIGO:</b> DSR-FOR-04	
<b>MUESTRA:</b> Heces bovinas			<b>Cantidad:</b> 500g			
<b>Fecha de inicio:</b> 13/01/2021			<b>Hora de lectura:</b> 12 m – 1 pm			
1) Colección de datos						
Fecha	Día	Temperatura ambiental		Producción de biogás diaria (ml/día)	Producción biogás acumulado (ml/día)	Rendimiento (ml biogás/g de inóculo)
		Mínima media	Máxima media			
13/01/2021	0	9	17	0.0	0.0	0.00
14/01/2021	1	10	18	0.0	0.0	0.00
15/01/2021	2	9	15	0.0	0.0	0.00
16/01/2021	3	9	17	0.0	0.0	0.00
17/01/2021	4	9	17	0.0	0.0	0.00
18/01/2021	5	9	14	0.0	0.0	0.00
19/01/2021	6	10	16	0.0	0.0	0.00
20/01/2021	7	9	16	0.0	0.0	0.00
21/01/2021	8	9	16	0.0	0.0	0.00
22/01/2021	9	9	16	0.0	0.0	0.00
23/01/2021	10	8	16	0.0	0.0	0.00
24/01/2021	11	9	16	0.0	0.0	0.00
25/01/2021	12	9	17	0.0	0.0	0.00
26/01/2021	13	8	17	0.0	0.0	0.00
27/01/2021	14	9	18	34.8	34.8	0.07
28/01/2021	15	7	17	0.0	34.8	0.00
29/01/2021	16	8	18	0.0	34.8	0.00
30/01/2021	17	7	14	29.6	64.4	0.06
31/01/2021	18	8	17	29.6	94.0	0.06
1/02/2021	19	8	17	135.5	229.5	0.27
2/02/2021	20	8	17	298.6	528.1	0.60
3/02/2021	21	9	17	286.5	814.6	0.57
4/02/2021	22	9	17	246.5	1061.1	0.49
5/02/2021	23	9	17	270.9	1332.0	0.54
6/02/2021	24	9	17	236.1	1568.1	0.47
7/02/2021	25	9	18	119.8	1687.9	0.24
8/02/2021	26	8	18	111.1	1799.0	0.22
9/02/2021	27	8	18	41.7	1840.7	0.08
10/02/2021	28	8	16	46.9	1887.6	0.09
11/02/2021	29	8	16	66.7	1954.3	0.13
12/02/2021	30	7	18	34.8	1989.1	0.07
13/02/2021	31	6	20	48.6	2037.7	0.10

## Anexo 8: Desgasificación del inóculo (Continuación)

14/02/2021	32	7	21	328.2	2365.9	0.66
15/02/2021	33	6	21	245.9	2611.8	0.49
16/02/2021	34	6	20	497.3	3109.1	0.99
17/02/2021	35	7	19	233.4	3342.5	0.47
18/02/2021	36	7	18	186.1	3528.6	0.37
19/02/2021	37	8	19	119.4	3648.0	0.24
20/02/2021	38	8	17	195.3	3843.3	0.39
21/02/2021	39	6	21	187.5	4030.8	0.38
22/02/2021	40	11	19	225.7	4256.5	0.45
23/02/2021	41	11	20	265.3	4521.8	0.53
24/02/2021	42	12	20	158.4	4680.2	0.32
25/02/2021	43	11	22	202.8	4883.0	0.41
26/02/2021	44	10	23	101.5	4984.5	0.20
27/02/2021	45	12	20	151.1	5135.6	0.30
28/02/2021	46	11	20	59.0	5194.6	0.12
1/03/2021	47	11	21	22.5	5217.1	0.05
2/03/2021	48	11	20	53.8	5270.9	0.11
3/03/2021	49	11	21	3.6	5274.5	0.01
4/03/2021	50	11	21	16.7	5291.2	0.03
5/03/2021	51	11	21	4.2	5295.4	0.01
6/03/2021	52	12	20	3.2	5298.6	0.01
7/03/2021	53	11	22	3.0	5301.6	0.01
8/03/2021	54	11	21	2.1	5303.7	0.00
9/03/2021	55	12	18	1.3	5305.0	0.00
10/03/2021	56	11	18	1.7	5306.7	0.00
11/03/2021	57	11	20	1.1	5307.8	0.00
12/03/2021	58	10	21	1.1	5308.9	0.00
13/03/2021	59	10	19	0.5	5309.4	0.00
14/03/2021	60	11	18	0.3	5309.7	0.00

**Anexo 9: Determinación del volumen del inóculo, agua y sustrato para la prueba PBM.**

Tipo N°		1	2	3	4	5
Número de biodigestores construidos		0	5	0	5	5
Capacidad máxima (ml)		696.9	702.7	553.4	461	574.9
BH1	$V_{inóculo}$	41.8	42.1	33.2	27.6	34.4
	$V_{sustrato}$	27.9	28.2	22.2	18.5	23.0
	$V_{inóculo} + V_{sustrato}$	69.7	70.3	55.3	46.1	57.5
	Agua	278.8	281.1	221.4	184.4	230.0
	<b>Carga total del BPA</b>	<b>348.5</b>	<b>351.4</b>	<b>276.7</b>	<b>230.5</b>	<b>287.5</b>
	"Head space" (50%)	348.4	351.3	276.7	230.5	287.5
Controles	$V_{inóculo}$	41.8	42.1	33.2	33.1	34.4
	$V_{sustrato}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	$V_{inóculo} + V_{sustrato}$	41.8	42.1	33.2	33.1	34.4
	Agua	167.0	168.4	132.6	132.4	137.8
	<b>Carga total del BPA</b>	<b>208.8</b>	<b>210.5</b>	<b>165.8</b>	<b>165.6</b>	<b>172.2</b>
BH2	$V_{inóculo}$	41.8	42.1	33.2	27.6	34.4
	$V_{sustrato}$	47.9	48.2	42.2	38.5	43.0
	$V_{inóculo} + V_{sustrato}$	89.7	90.3	75.3	66.1	77.5
	Agua	358.8	361.1	301.4	264.4	310.0
	<b>Carga total del BPA</b>	<b>448.5</b>	<b>451.4</b>	<b>376.7</b>	<b>330.5</b>	<b>387.5</b>
	"Head space" (35%)	248.4	251.3	176.7	130.5	187.5
Controles	$V_{inóculo}$	41.8	42.1	33.2	27.6	34.4
	$V_{sustrato}$	0	0	0	0	0
	$V_{inóculo} + V_{sustrato}$	167.0	168.4	132.6	132.4	137.8
	Agua	362.4	365.2	288	287.2	298.8
	<b>Carga total del BPA</b>	<b>208.8</b>	<b>210.5</b>	<b>165.8</b>	<b>165.6</b>	<b>172.2</b>

**Anexo 9: Determinación del volumen del inóculo, agua y sustrato para la prueba PBM  
(Continuación)**

<b>BH3</b>	$V_{inóculo}$	<b>41.8</b>	<b>42.1</b>	<b>33.2</b>	<b>27.6</b>	<b>34.4</b>
	$V_{sustrato}$	67.9	68.2	62.2	58.5	63.0
	$V_{inóculo} + V_{sustrato}$	109.7	110.3	95.3	86.1	97.5
	Agua	438.8	441.1	381.4	344.4	390.0
	<b>Carga total del BPA</b>	<b>548.5</b>	<b>551.4</b>	<b>476.7</b>	<b>430.5</b>	<b>487.5</b>
	"Head space" (20%)	148.4	151.3	76.7	30.5	87.5
<b>Controles</b>	$V_{inóculo}$	41.8	42.1	33.2	27.6	34.4
	$V_{sustrato}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	$V_{inóculo} + V_{sustrato}$	41.8	42.1	33.2	27.6	34.4
	Agua	167.0	168.4	132.6	110.5	137.8
	<b>Carga total del BPA</b>	<b>208.8</b>	<b>210.5</b>	<b>165.8</b>	<b>138.1</b>	<b>172.2</b>

## Anexo 10: Cálculo del potencial bioquímico de metano (PBM) del sustrato

### FORMATO PARA CALCULAR EL PBM DEL SUSTRATO

**OBJETIVO:** Formato utilizado para llenar los datos de la lectura diaria de los BPA y de los controles, para obtener el potencial bioquímico de metano del sustrato

**Código:** DSR-FOR-05

**Responsable:** David Severo R.

**Hora de lectura:** 12 PM

**Sólidos Volátiles:** 31.37 %

**Sustrato:** Heces caninas

**Tipo de BPA:** 5

**Cantidad de sustrato:** 23.4 g

Fecha	Día	T (C°)		BH1			Control		Producción de biogás diaria (ml/día)	Producción biogás acumulado (ml)	Rendimiento (ml biogás/g de heces)
		Min	Max	1	2	3	1	2			
22/03/2021	0	11	21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.00	0.0000
23/03/2021	1	11	17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.00	0.0000
24/03/2021	2	11	20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.00	0.0000
25/03/2021	3	10	20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.00	0.0000
26/03/2021	4	11	22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.00	0.0000
27/03/2021	5	11	22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.00	0.0000
28/03/2021	6	11	21	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.053	0.07	0.0023
29/03/2021	7	11	18	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.106	0.20	0.0046
30/03/2021	8	11	17	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.106	0.33	0.0046
31/03/2021	9	11	21	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.106	0.47	0.0046
1/04/2021	10	11	21	0.3	0.2	0.1	0.2	0.1	0.159	0.67	0.0069
2/04/2021	11	12	22	0.5	0.3	0.3	0.1	0.1	0.850	1.03	0.0369
3/04/2021	12	10	18	0.4	0.5	0.5	0.2	0.2	0.850	1.50	0.0369
4/04/2021	13	11	20	0.6	0.5	0.6	0.2	0.3	1.009	2.07	0.0438
5/04/2021	14	11	21	0.7	0.6	0.7	0.5	0.4	0.691	2.73	0.0300
6/04/2021	15	11	19	0.6	0.7	0.8	0.3	0.4	1.116	3.43	0.0484
7/04/2021	16	11	21	0.9	1.2	1.0	0.8	0.7	0.903	4.47	0.0392
8/04/2021	17	11	18	1.1	1.4	1.3	0.7	0.5	2.125	5.73	0.0922
9/04/2021	18	10	18	0.8	1.0	1.2	0.8	0.7	0.797	6.73	0.0346
10/04/2021	19	11	21	0.9	1.1	1.3	0.9	0.8	0.797	7.83	0.0346
11/04/2021	20	11	17	1.1	1.2	1.4	0.7	0.8	1.541	9.07	0.0669
12/04/2021	21	11	18	1.2	1.4	1.2	0.6	0.7	1.966	10.33	0.0853
13/04/2021	22	10	20	1.0	1.1	1.3	0.6	0.7	1.541	11.47	0.0669
14/04/2021	23	11	22	1.4	1.4	1.5	0.7	0.8	2.178	12.90	0.0945
15/04/2021	24	12	23	1.6	1.5	1.7	0.7	0.8	2.710	14.50	0.1176
16/04/2021	25	10	22	1.3	1.5	1.8	0.9	0.8	2.178	16.03	0.0945
17/04/2021	26	10	23	2.3	2.0	2.1	0.8	0.9	4.091	18.17	0.1776
18/04/2021	27	9	22	3.1	2.8	2.9	0.8	0.8	6.801	21.10	0.2952
19/04/2021	28	10	23	3.7	3.8	3.7	1.0	0.9	8.873	24.83	0.3851

### Anexo 10: Cálculo del potencial bioquímico de metano (PBM) del sustrato (Continuación)

20/04/2021	29	9	22	4.5	4.7	4.7	1.1	1.2	11.104	29.47	0.4819
21/04/2021	30	8	23	3.5	4.0	3.9	1.3	1.3	7.969	33.27	0.3459
22/04/2021	31	7	22	3.4	3.5	3.4	1.4	1.3	6.641	36.70	0.2882
23/04/2021	32	8	21	3.9	4.0	3.9	1.3	1.5	8.076	40.63	0.3505
24/04/2021	33	8	23	4.5	4.2	4.4	1.5	1.5	9.138	45.00	0.3966
25/04/2021	34	8	22	5.0	5.3	5.3	1.6	1.6	11.476	50.20	0.4981
26/04/2021	35	10	22	5.2	5.5	5.4	1.7	1.6	11.848	55.57	0.5142
27/04/2021	36	8	21	5.6	5.8	5.9	1.8	1.8	12.645	61.33	0.5488
28/04/2021	37	10	21	5.7	5.9	5.7	1.7	1.8	12.804	67.10	0.5557
29/04/2021	38	8	21	7.1	7.3	7.2	1.6	1.6	17.851	74.30	0.7748
30/04/2021	39	8	22	9.4	9.0	9.3	1.7	1.8	23.855	83.53	1.0354
1/05/2021	40	8	23	8.9	9.0	8.1	1.7	1.9	21.889	92.20	0.9501
2/05/2021	41	6	23	10	9.8	9.9	2.0	2.2	24.865	102.10	1.0792
3/05/2021	42	5	22	11.1	10.8	10.8	2.1	2.0	28.212	113.00	1.2245
4/05/2021	43	8	22	13.5	14.0	13.9	2.2	2.1	37.137	126.80	1.6119
5/05/2021	44	7	23	12.3	13.0	13.5	2.1	2.2	34.375	139.73	1.4920
6/05/2021	45	10	22	13.5	14.1	14	2.3	2.3	36.872	153.60	1.6003
7/05/2021	46	9	22	9.6	11.5	11.1	2.2	2.2	27.202	164.33	1.1807
8/05/2021	47	8	23	9.0	10.5	10.3	2.1	2.0	25.130	174.27	1.0907
9/05/2021	48	7	21	10.2	10.6	10.5	2.0	2.0	26.883	184.70	1.1668
10/05/2021	49	4	21	8.7	10.1	10.0	1.9	1.8	24.705	194.30	1.0723
11/05/2021	50	5	22	7.5	8.0	8.5	1.8	1.9	19.605	202.30	0.8509
12/05/2021	51	6	20	7.3	7.8	7.4	1.9	1.8	18.011	209.80	0.7817
13/05/2021	52	8	21	7.8	8.0	7.7	1.7	1.7	19.552	217.63	0.8486
14/05/2021	53	7	21	6.9	6.9	7.5	1.6	1.6	17.533	224.73	0.7610
15/05/2021	54	7	21	7.1	7.0	7.2	1.7	1.5	17.533	231.83	0.7610
16/05/2021	55	7	21	6.8	6.8	7.1	1.5	1.6	17.055	238.73	0.7402
17/05/2021	56	6	21	6.3	6.2	6.9	1.3	1.3	16.470	245.20	0.7148
18/05/2021	57	8	22	5.6	5.3	6.0	1.4	1.2	13.814	250.83	0.5995
19/05/2021	58	7	22	5.2	5.0	5.6	1.1	1.2	13.123	256.10	0.5696
20/05/2021	59	6	23	4.2	3.9	4.3	1.3	1.4	8.873	260.23	0.3851
21/05/2021	60	6	23	3.2	3.2	3.3	1.1	1.1	6.801	263.47	0.2952

## Anexo 10: Cálculo del potencial bioquímico de metano (PBM) del sustrato (Continuación)

### FORMATO PARA CALCULAR EL PBM DEL SUSTRATO

**OBJETIVO:** Formato utilizado para llenar los datos de la lectura diaria de los BPA y de los controles, para obtener el potencial bioquímico de metano del sustrato

**Código:** DSR-FOR-05

**Responsable:** David Severo R.

**Hora de lectura:** 12 PM

**Sólidos Volátiles:** 31.37 %

**Sustrato:** Heces caninas

**Tipo de BPA:** 4

**Cantidad de sustrato:** 44.15 g

Fecha	Día	T (C°)		BH2			Control		Producción de biogás diaria (ml/día)	Producción biogás acumulado (ml)	Rendimiento (ml biogás/g de heces)
		Min	Max	1	2	3	1	2			
22/03/2021	0	11	21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0000
23/03/2021	1	11	17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0000
24/03/2021	2	11	20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0000
25/03/2021	3	10	20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0000
26/03/2021	4	11	22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0000
27/03/2021	5	11	22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0000
28/03/2021	6	11	21	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.053	0.067	0.0012
29/03/2021	7	11	18	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.106	0.200	0.0024
30/03/2021	8	11	17	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.106	0.333	0.0024
31/03/2021	9	11	21	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.106	0.467	0.0024
1/04/2021	10	11	21	0.3	0.2	0.1	0.2	0.1	0.159	0.667	0.0036
2/04/2021	11	12	22	0.5	0.3	0.3	0.1	0.1	0.850	1.033	0.0193
3/04/2021	12	10	18	0.4	0.5	0.5	0.2	0.2	0.850	1.500	0.0193
4/04/2021	13	11	20	0.6	0.5	0.6	0.2	0.3	1.009	2.067	0.0229
5/04/2021	14	11	21	0.5	0.6	0.7	0.3	0.3	0.956	2.667	0.0217
6/04/2021	15	11	19	0.4	0.5	0.8	0.3	0.4	0.691	3.233	0.0156
7/04/2021	16	11	21	0.8	0.8	0.7	0.5	0.6	0.691	4.000	0.0156
8/04/2021	17	11	18	0.9	0.8	0.8	0.6	0.4	1.063	4.833	0.0241
9/04/2021	18	10	18	0.8	0.7	0.7	0.6	0.7	0.266	5.567	0.0060
10/04/2021	19	11	21	1.1	0.9	0.9	0.7	0.8	0.691	6.533	0.0156
11/04/2021	20	11	17	1.0	1.1	1.0	0.7	0.8	0.903	7.567	0.0205
12/04/2021	21	11	18	1.2	1.1	1.2	0.6	0.5	1.966	8.733	0.0445
13/04/2021	22	10	20	1.0	1.2	1.0	0.5	0.6	1.647	9.800	0.0373
14/04/2021	23	11	22	1.1	1.2	1.1	0.6	0.7	1.541	10.933	0.0349
15/04/2021	24	12	23	1.3	1.2	1.2	0.8	0.7	1.541	12.167	0.0349
16/04/2021	25	10	22	1.1	1.3	1.3	0.9	0.8	1.222	13.400	0.0277
17/04/2021	26	10	23	2.3	2.0	1.9	0.8	0.9	3.878	15.467	0.0878
18/04/2021	27	9	22	2.5	2.4	2.4	0.8	0.8	5.207	17.900	0.1179
19/04/2021	28	10	23	2.6	2.6	2.4	0.9	0.9	5.207	20.433	0.1179

### Anexo 10: Cálculo del potencial bioquímico de metano (PBM) del sustrato (Continuación)

20/04/2021	29	9	22	2.4	2.7	2.8	1.0	0.9	5.366	23.067	0.1215
21/04/2021	30	8	23	2.9	3.0	3.0	1.1	1.0	6.110	26.033	0.1384
22/04/2021	31	7	22	3.1	3.2	3.1	1.2	1.1	6.322	29.167	0.1432
23/04/2021	32	8	21	3.5	3.3	3.3	1.3	1.4	6.429	32.533	0.1456
24/04/2021	33	8	23	3.7	3.8	3.7	1.4	1.4	7.438	36.267	0.1685
25/04/2021	34	8	22	4.5	4.2	3.9	1.6	1.5	8.448	40.467	0.1913
26/04/2021	35	10	22	5.1	5.0	4.6	1.7	1.6	10.360	45.367	0.2347
27/04/2021	36	8	21	5.3	5.2	4.5	1.8	1.7	10.360	50.367	0.2347
28/04/2021	37	10	21	6.0	5.9	5.8	1.7	1.7	13.389	56.267	0.3033
29/04/2021	38	8	21	6.1	5.9	6.0	1.6	1.5	14.186	62.267	0.3213
30/04/2021	39	8	22	6.6	6.3	6.3	1.7	1.8	14.823	68.667	0.3357
1/05/2021	40	8	23	7.0	6.9	6.7	1.7	1.7	16.470	75.533	0.3730
2/05/2021	41	6	23	8.1	7.6	8.1	1.9	1.8	19.392	83.467	0.4392
3/05/2021	42	5	22	7.8	7.7	7.8	2.0	1.9	18.542	91.233	0.4200
4/05/2021	43	8	22	8.2	8.0	8.1	2.1	2.0	19.286	99.333	0.4368
5/05/2021	44	7	23	8.5	8.4	8.6	2.1	2.2	20.242	107.833	0.4585
6/05/2021	45	10	22	8.8	8.6	8.6	2.3	2.3	20.295	116.500	0.4597
7/05/2021	46	9	22	8.9	8.8	8.8	2.2	2.2	21.145	125.333	0.4789
8/05/2021	47	8	23	7.2	6.9	7.0	2.1	2.0	15.886	132.367	0.3598
9/05/2021	48	7	21	6.8	6.4	6.5	1.9	2.0	14.717	138.933	0.3333
10/05/2021	49	4	21	6.0	6.3	6.4	1.7	1.7	14.451	145.167	0.3273
11/05/2021	50	5	22	5.8	5.8	5.9	1.8	1.9	12.698	151.000	0.2876
12/05/2021	51	6	20	5.5	5.3	5.6	1.9	1.8	11.529	156.467	0.2611
13/05/2021	52	8	21	5.1	4.9	5.1	1.7	1.7	10.626	161.500	0.2407
14/05/2021	53	7	21	4.2	4.1	4.3	1.5	1.5	8.607	165.700	0.1949
15/05/2021	54	7	21	3.8	3.9	3.8	1.6	1.5	7.279	169.533	0.1649
16/05/2021	55	7	21	3.2	3.7	3.4	1.3	1.3	6.801	172.967	0.1540
17/05/2021	56	6	21	2.9	3.0	2.8	1.3	1.4	4.941	175.867	0.1119
18/05/2021	57	8	22	2.0	2.1	1.9	1.2	1.1	2.710	177.867	0.0614
19/05/2021	58	7	22	1.7	1.7	1.8	1.1	1.2	1.860	179.600	0.0421
20/05/2021	59	6	23	1.2	1.5	1.6	1.0	0.9	1.541	181.033	0.0349
21/05/2021	60	6	23	1.1	1.3	1.3	0.7	0.8	1.541	182.267	0.0349

## Anexo 10: Cálculo del potencial bioquímico de metano (PBM) del sustrato (Continuación)

### FORMATO PARA CALCULAR EL PBM DEL SUSTRATO

**OBJETIVO:** Formato utilizado para llenar los datos de la lectura diaria de los BPA y de los controles, para obtener el potencial bioquímico de metano del sustrato

**Código:** DSR-FOR-05

**Responsable:** David Severo R.

**Hora de lectura:** 12 PM

**Sólidos Volátiles:** 31.37 %

**Sustrato:** Heces caninas

**Tipo de BPA:** 2

**Cantidad de sustrato:** 68.17 g

Fecha	Día	T (C°)		BH3			Control		Producción de biogás diaria (ml/día)	Producción biogás acumulado (ml)	Rendimiento (ml biogás/g de heces)
		Min	Max	1	2	3	1	2			
22/03/2021	0	11	21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.00	0.0000
23/03/2021	1	11	17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.00	0.0000
24/03/2021	2	11	20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.00	0.0000
25/03/2021	3	10	20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.00	0.0000
26/03/2021	4	11	22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.00	0.0000
27/03/2021	5	11	22	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.106	0.03	0.0016
28/03/2021	6	11	21	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.213	0.10	0.0031
29/03/2021	7	11	18	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.000	0.20	0.0000
30/03/2021	8	11	17	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.000	0.30	0.0000
31/03/2021	9	11	21	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.000	0.40	0.0000
1/04/2021	10	11	21	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.106	0.53	0.0016
2/04/2021	11	12	22	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.213	0.70	0.0031
3/04/2021	12	10	18	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.106	0.93	0.0016
4/04/2021	13	11	20	0.3	0.3	0.4	0.2	0.3	0.266	1.27	0.0039
5/04/2021	14	11	21	0.4	0.4	0.6	0.5	0.4	0.053	1.73	0.0008
6/04/2021	15	11	19	0.7	0.6	0.7	0.3	0.4	1.009	2.40	0.0148
7/04/2021	16	11	21	0.7	0.8	0.8	0.8	0.7	0.053	3.17	0.0008
8/04/2021	17	11	18	0.8	0.8	0.9	0.7	0.5	0.744	4.00	0.0109
9/04/2021	18	10	18	0.8	0.7	0.7	0.4	0.4	1.063	4.73	0.0156
10/04/2021	19	11	21	0.9	0.9	0.8	0.9	0.8	0.053	5.60	0.0008
11/04/2021	20	11	17	1.0	1.0	0.9	0.7	0.8	0.691	6.57	0.0101
12/04/2021	21	11	18	1.1	1.1	1.2	0.6	0.7	1.541	7.70	0.0226
13/04/2021	22	10	20	1.1	1.2	1.3	0.6	0.7	1.753	8.90	0.0257
14/04/2021	23	11	22	1.4	1.4	1.3	0.7	0.8	1.966	10.27	0.0288
15/04/2021	24	12	23	1.6	1.6	1.4	0.7	0.8	2.497	11.80	0.0366
16/04/2021	25	10	22	1.5	1.6	1.4	0.9	0.8	2.072	13.30	0.0304
17/04/2021	26	10	23	1.5	1.6	1.7	0.8	0.9	2.391	14.90	0.0351

### Anexo 10: Cálculo del potencial bioquímico de metano (PBM) del sustrato (Continuación)

18/04/2021	27	9	22	1.8	1.9	1.9	0.8	0.8	3.400	16.77	0.0499
19/04/2021	28	10	23	2.3	2.3	2.5	1.0	0.9	4.516	19.13	0.0662
20/04/2021	29	9	22	2.8	2.7	2.9	1.1	1.2	5.260	21.93	0.0772
21/04/2021	30	8	23	3.2	3.2	3.4	1.3	1.3	6.269	25.20	0.0920
22/04/2021	31	7	22	3.4	3.3	3.3	1.4	1.3	6.322	28.53	0.0927
23/04/2021	32	8	21	3.3	3.5	3.7	1.3	1.5	6.694	32.03	0.0982
24/04/2021	33	8	23	3.9	3.9	4.4	1.5	1.5	8.182	36.10	0.1200
25/04/2021	34	8	22	4.5	4.8	4.8	1.6	1.6	9.882	40.80	0.1450
26/04/2021	35	10	22	5.0	5.1	4.9	1.7	1.6	10.679	45.80	0.1567
27/04/2021	36	8	21	5.5	5.3	5.3	1.8	1.8	11.370	51.17	0.1668
28/04/2021	37	10	21	5.5	5.5	5.4	1.7	1.8	11.848	56.63	0.1738
29/04/2021	38	8	21	7.0	6.9	7.2	1.6	1.6	17.320	63.67	0.2541
30/04/2021	39	8	22	7.6	7.8	7.4	1.7	1.8	18.648	71.27	0.2736
1/05/2021	40	8	23	7.8	7.7	7.5	1.7	1.9	18.702	78.93	0.2743
2/05/2021	41	6	23	8.1	8.5	8.4	2.0	2.2	19.870	87.27	0.2915
3/05/2021	42	5	22	8.0	8.2	8.3	2.1	2.0	19.498	95.43	0.2860
4/05/2021	43	8	22	8.7	8.4	8.7	2.2	2.1	20.561	104.03	0.3016
5/05/2021	44	7	23	9.5	9.2	9.6	2.1	2.2	23.218	113.47	0.3406
6/05/2021	45	10	22	9.6	9.7	9.5	2.3	2.3	23.271	123.07	0.3414
7/05/2021	46	9	22	10.2	10	10.1	2.2	2.2	25.183	133.17	0.3694
8/05/2021	47	8	23	10.1	10	9.9	2.1	2.0	25.343	143.17	0.3718
9/05/2021	48	7	21	9.9	9.8	9.5	2.0	2.0	24.652	152.90	0.3616
10/05/2021	49	4	21	9.5	9.5	9.2	1.9	1.8	24.068	162.30	0.3531
11/05/2021	50	5	22	8.1	8.0	7.5	1.8	1.9	19.180	170.17	0.2814
12/05/2021	51	6	20	7.0	6.9	6.3	1.9	1.8	15.567	176.90	0.2284
13/05/2021	52	8	21	6.5	6.4	6.2	1.7	1.7	14.876	183.27	0.2182
14/05/2021	53	7	21	6.1	6.0	5.9	1.6	1.6	14.026	189.27	0.2058
15/05/2021	54	7	21	5.8	6.0	6.0	1.7	1.5	13.814	195.20	0.2026
16/05/2021	55	7	21	5.0	5.3	5.2	1.5	1.6	11.529	200.37	0.1691
17/05/2021	56	6	21	4.6	4.5	5.1	1.3	1.3	10.945	205.10	0.1605
18/05/2021	57	8	22	4.0	4.2	4.5	1.4	1.2	9.351	209.33	0.1372
19/05/2021	58	7	22	3.9	4.0	4.4	1.1	1.2	9.404	213.43	0.1379
20/05/2021	59	6	23	3.8	3.8	4.1	1.3	1.4	8.129	217.33	0.1192
21/05/2021	60	6	23	3.0	3.1	2.9	1.1	1.1	6.057	220.33	0.0888

## Anexo 11: Análisis de regresión lineal de la prueba BH1

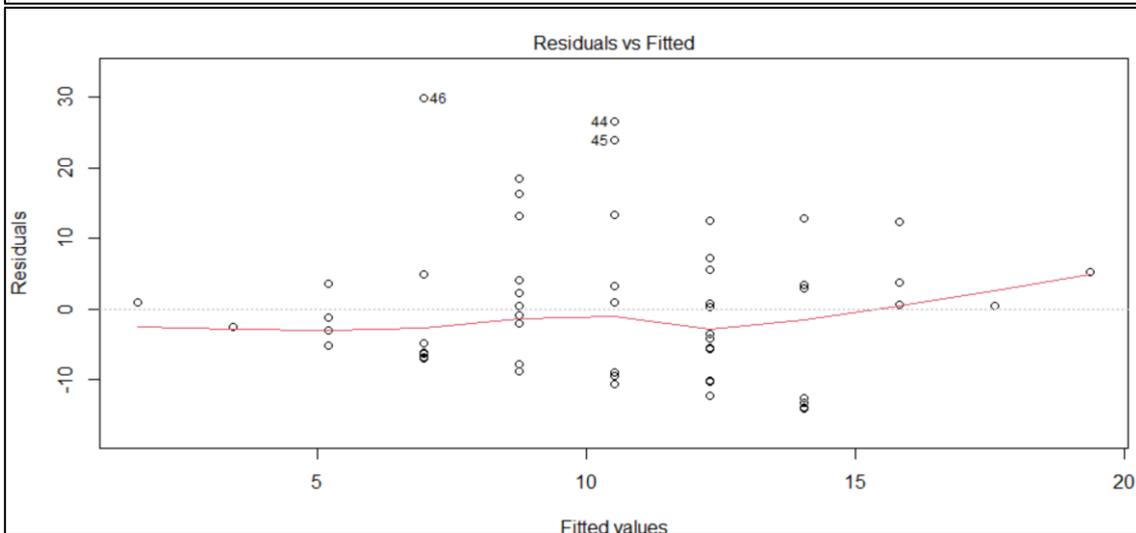
```
> summary(lm_biogas)

Call:
lm(formula = biogas$PROD_BG ~ biogas$T_PROM)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-14.052  -6.865  -1.110   3.783  29.901

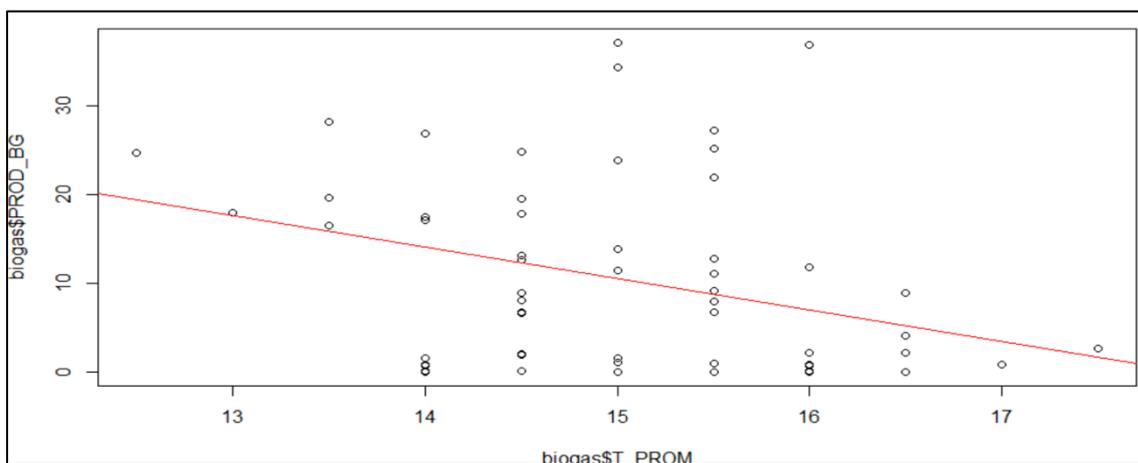
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   63.617    19.200   3.313  0.00158 **
biogas$T_PROM  -3.540     1.273  -2.781  0.00726 **
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 10.09 on 59 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.1159,    Adjusted R-squared:  0.1009
F-statistic: 7.735 on 1 and 59 DF,  p-value: 0.007258
```

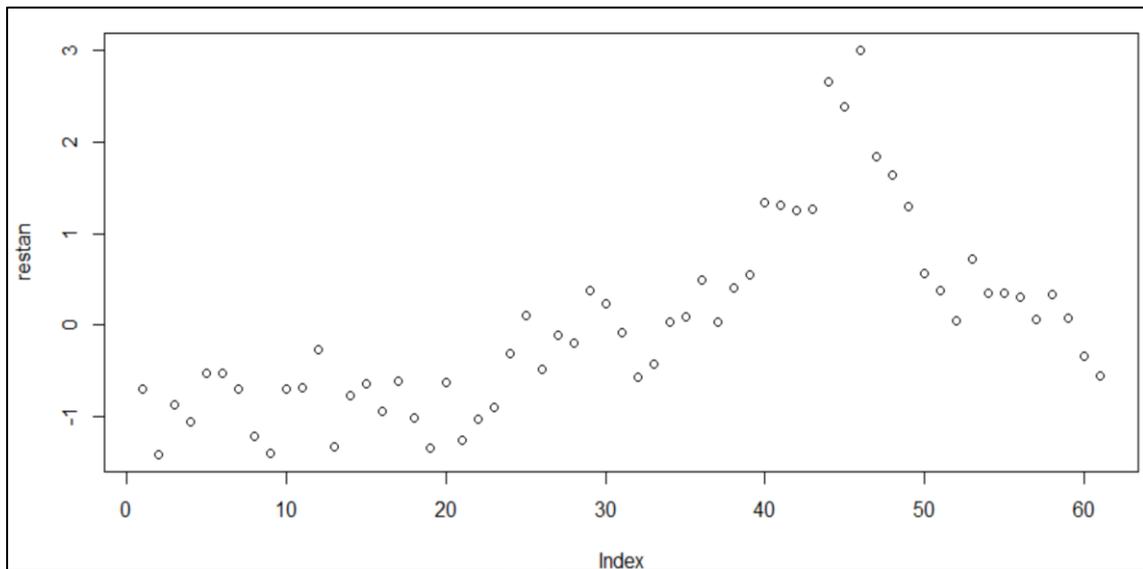
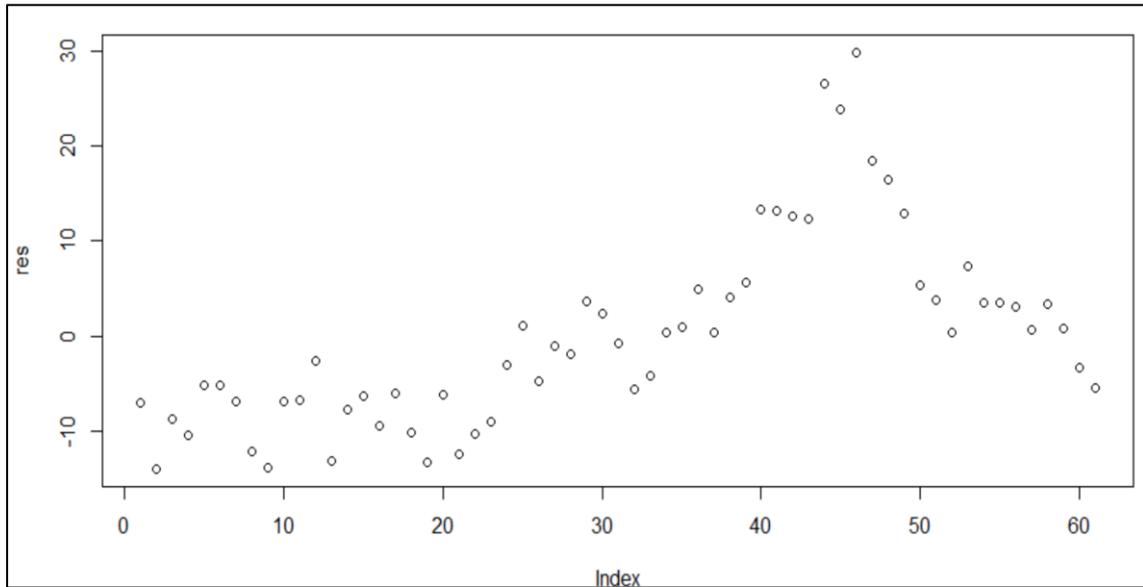


### SUPUESTOS DEL MODELO DE REGRESIÓN LINEAL – BH1:

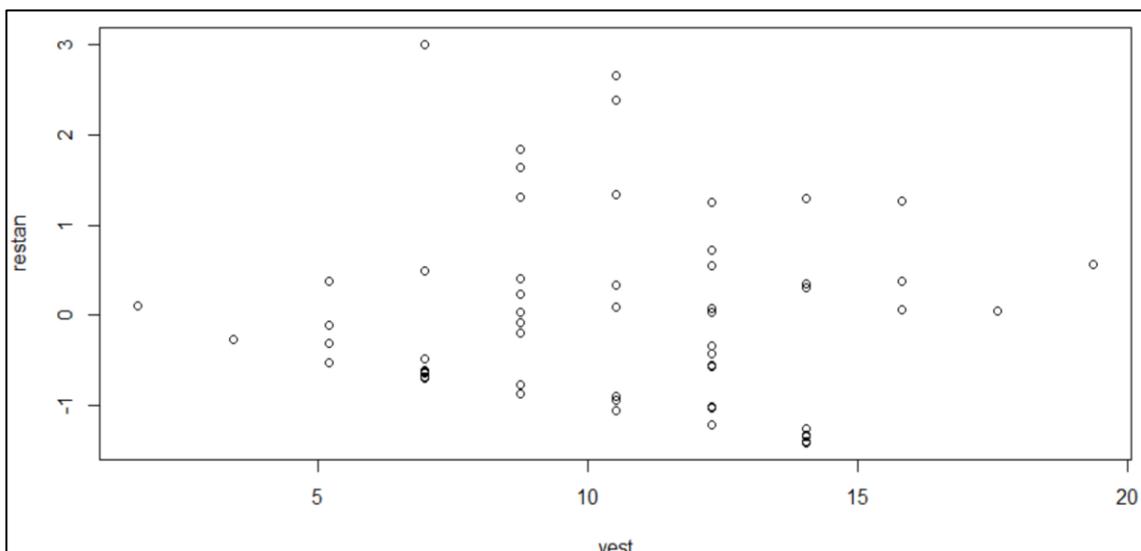
- **LINEALIDAD:**



- **INDEPENDENCIA DE LOS RESIDUALES:**



- **VARIANZA CONSTANTE:**



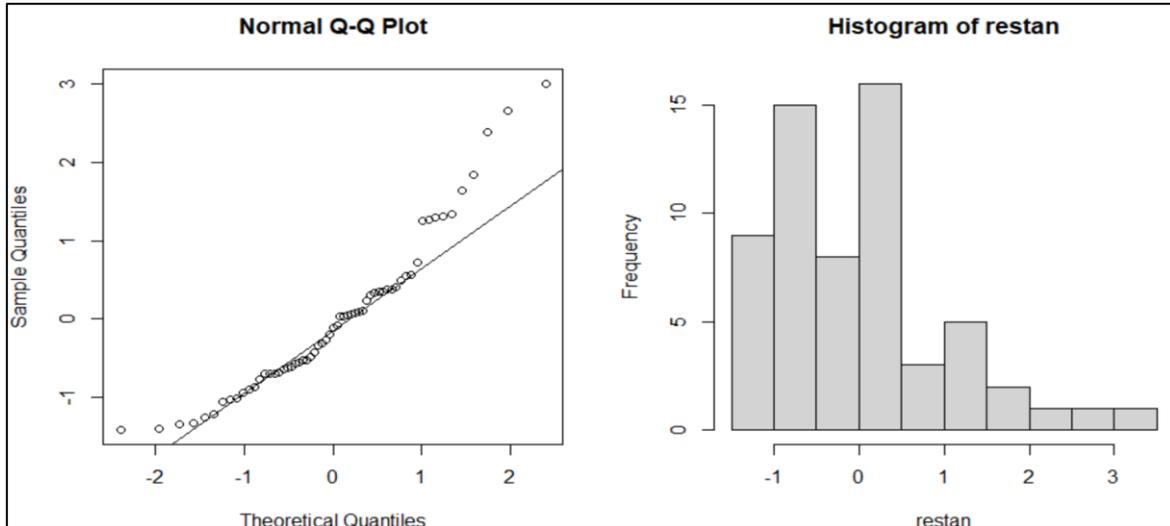
```
> bartlett.test(restan~grupos)
```

Bartlett test of homogeneity of variances

data: restan by grupos

Bartlett's K-squared = 2.407, df = 3, p-value = 0.4923

- **NORMALIDAD:**



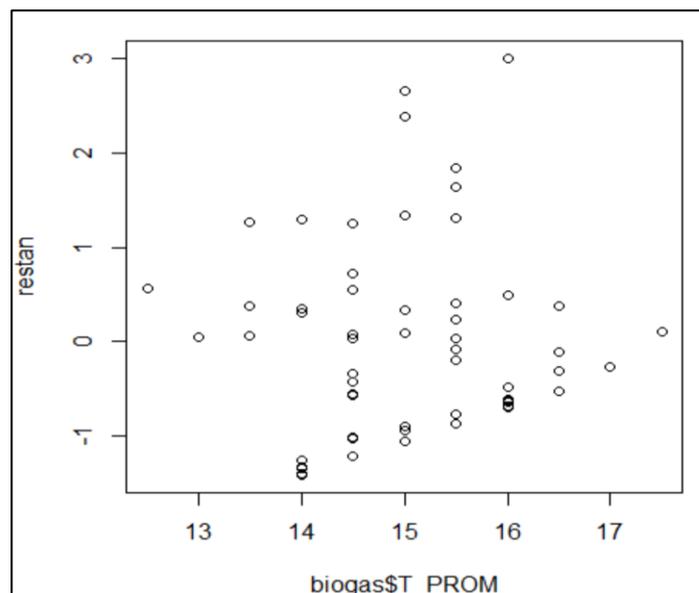
```
> shapiro.test(restan)
```

Shapiro-Wilk normality test

data: restan

W = 0.92686, p-value = 0.001322

- **NO RELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES EXPLICATIVAS Y EL ERROR:**



## Anexo 12: Análisis de regresión lineal de la prueba BH2

```
> summary(lm_biogas_2)
```

Call:

```
lm(formula = biogas_2$PROD_BG ~ biogas_2$T_PROM)
```

Residuals:

```
   Min       1Q   Median       3Q      Max
-8.099 -4.676 -1.298  3.383 15.619
```

Coefficients:

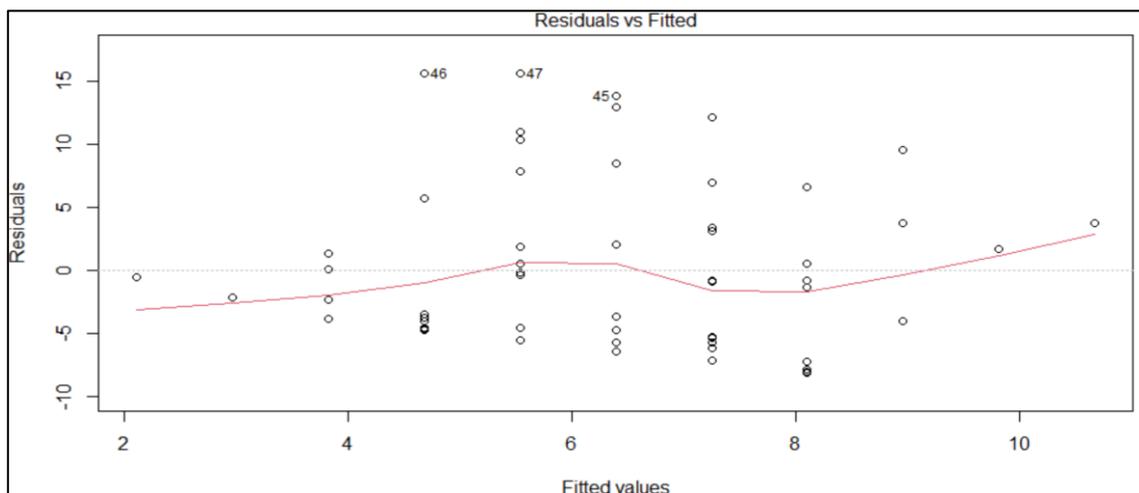
```
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)    32.0564    12.3852     2.588  0.0121 *
biogas_2$T_PROM -1.7113     0.8211    -2.084  0.0415 *
```

---  
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 6.51 on 59 degrees of freedom

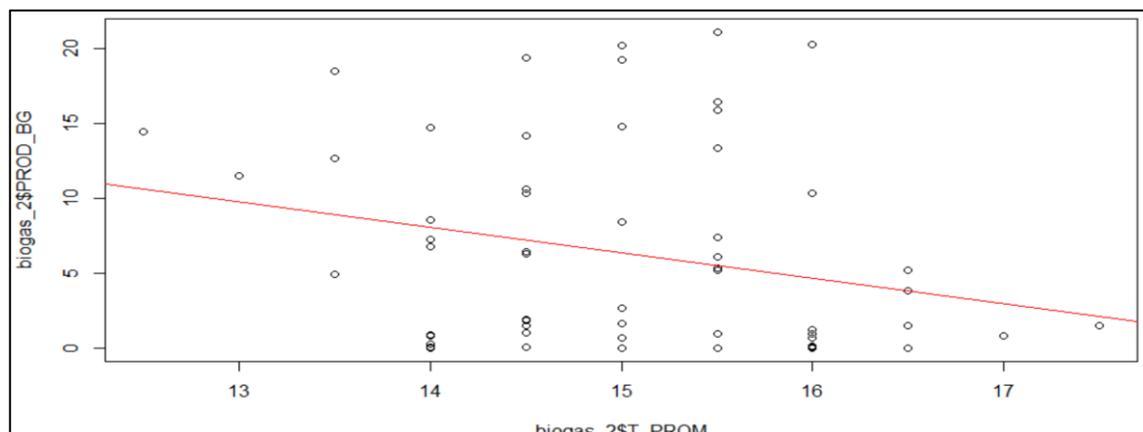
Multiple R-squared: 0.06857, Adjusted R-squared: 0.05278

F-statistic: 4.343 on 1 and 59 DF, p-value: 0.04149

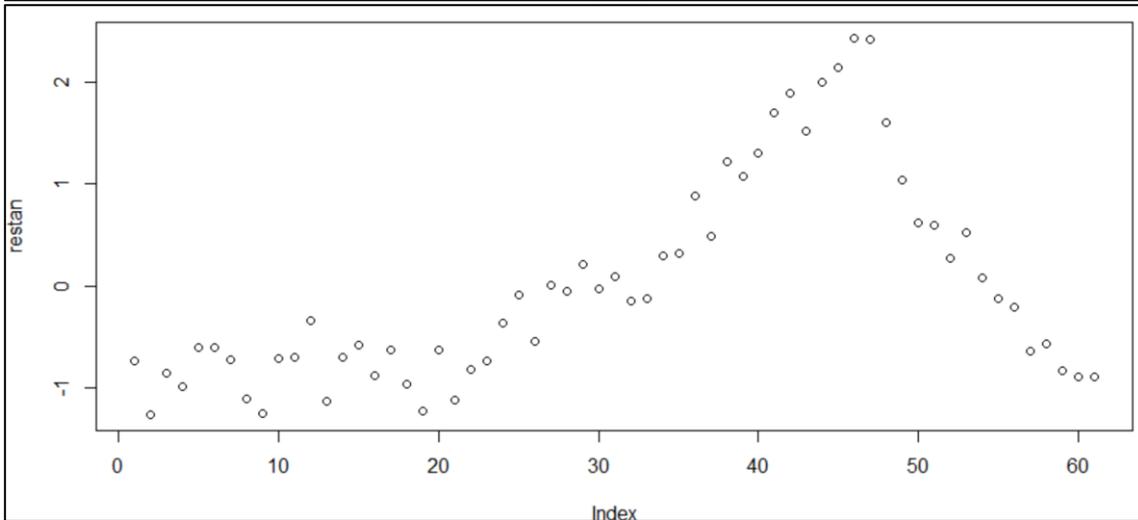
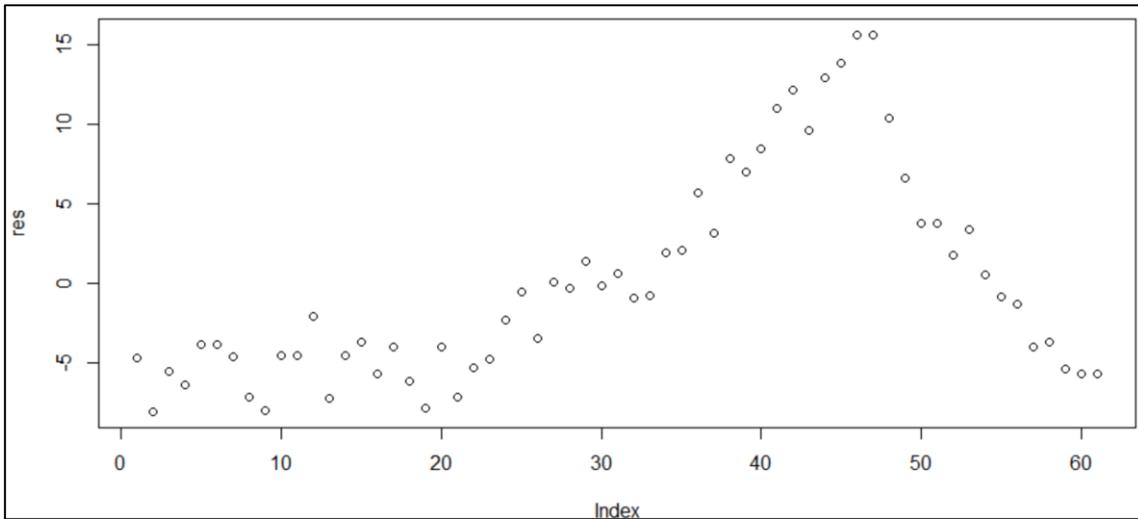


## SUPUESTOS DEL MODELO DE REGRESIÓN LINEAL – BH2:

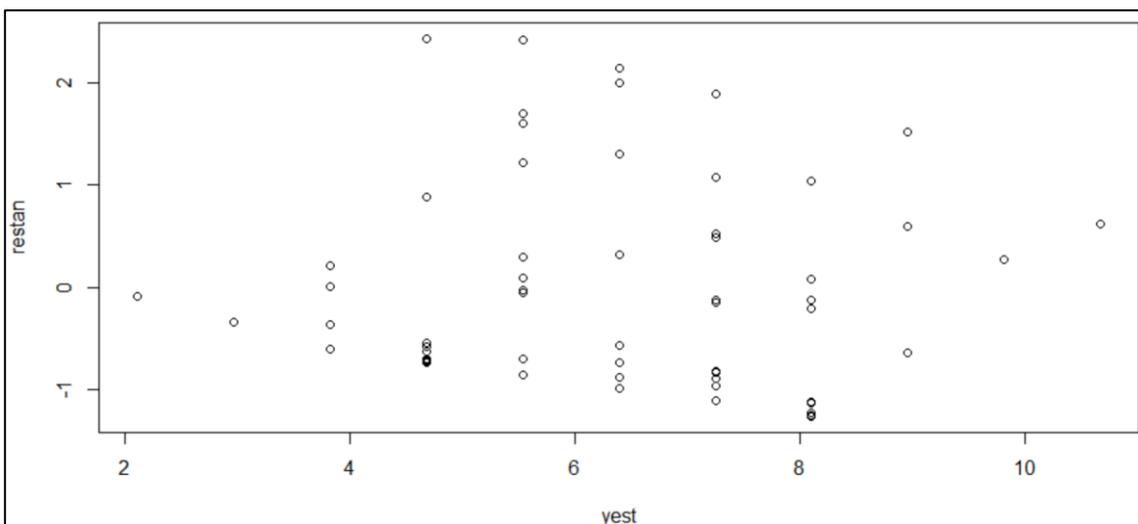
- **LINEALIDAD:**



- **INDEPENDENCIA DE LOS RESIDUALES:**



- **VARIANZA CONSTANTE:**



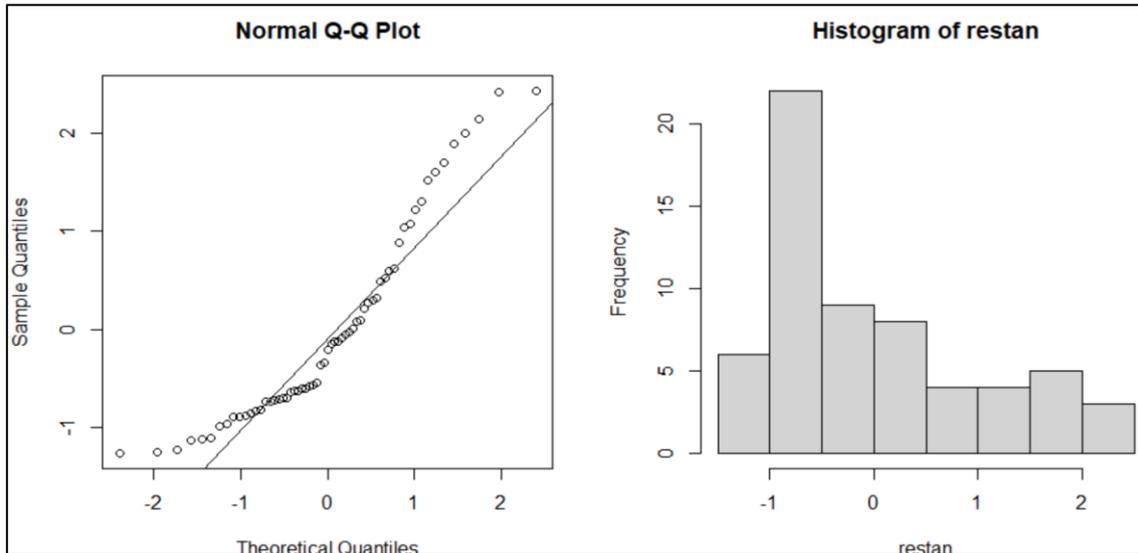
```
> bartlett.test(restan~grupos)
```

Bartlett test of homogeneity of variances

data: restan by grupos

Bartlett's K-squared = 1.6365, df = 1, p-value = 0.2008

- **NORMALIDAD:**



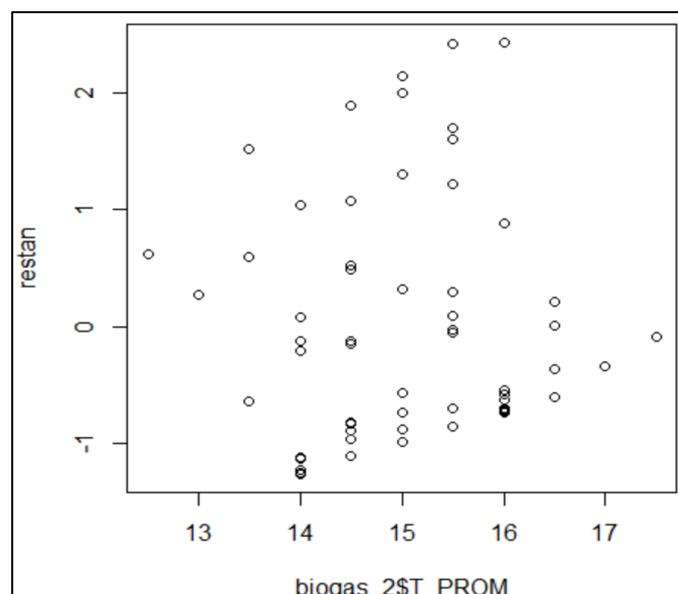
```
> shapiro.test(restan)
```

Shapiro-Wilk normality test

data: restan

W = 0.89915, p-value = 0.000108

- **NO RELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES EXPLICATIVAS Y EL ERROR:**



### Anexo 13: Análisis de regresión lineal de la prueba BH3

```
> summary(lm_biogas_3)
```

Call:

```
lm(formula = biogas_3$PROD_BG ~ biogas_3$T_PROM)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-11.416	-5.055	-1.565	5.037	18.658

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )	
(Intercept)	55.5731	14.8949	3.731	0.000431	***
biogas_3\$T_PROM	-3.1541	0.9875	-3.194	0.002253	**

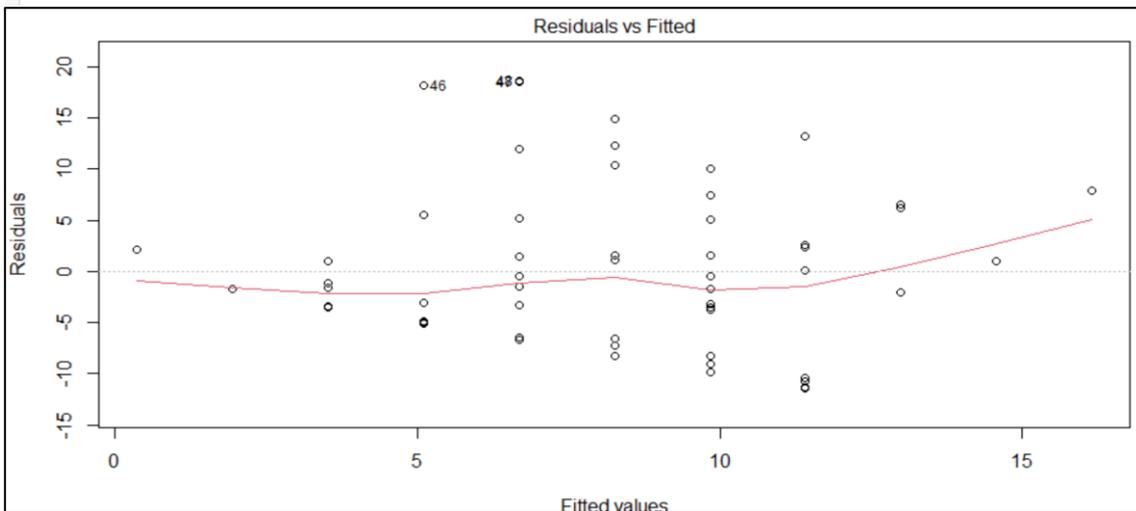
---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 7.829 on 59 degrees of freedom

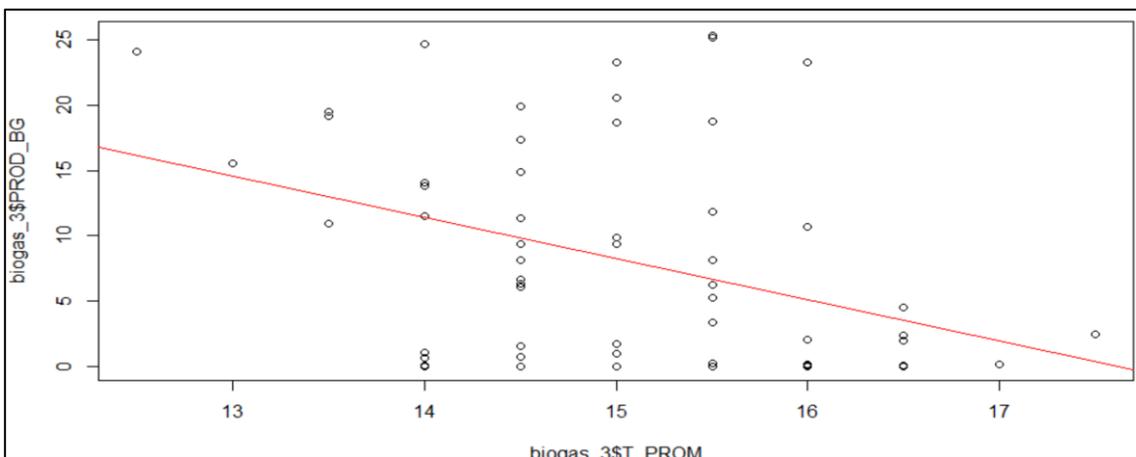
Multiple R-squared: 0.1474, Adjusted R-squared: 0.133

F-statistic: 10.2 on 1 and 59 DF, p-value: 0.002253

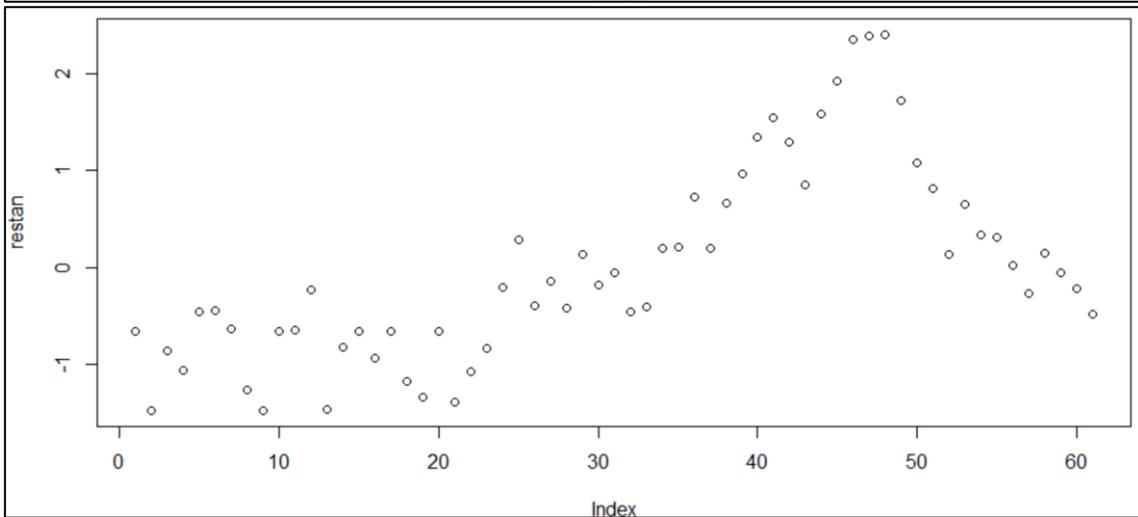
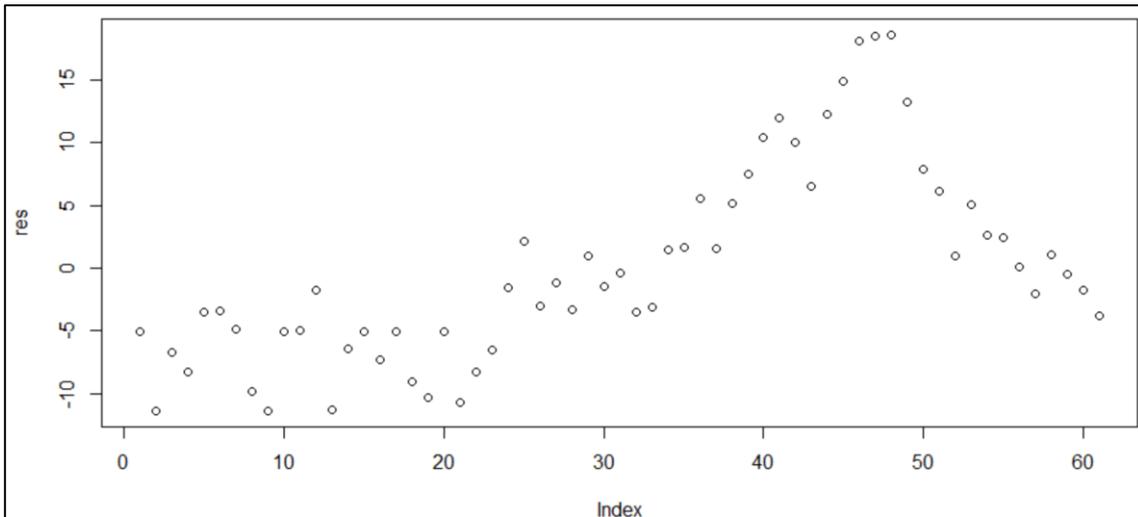


### SUPUESTOS DEL MODELO DE REGRESIÓN LINEAL – BH3:

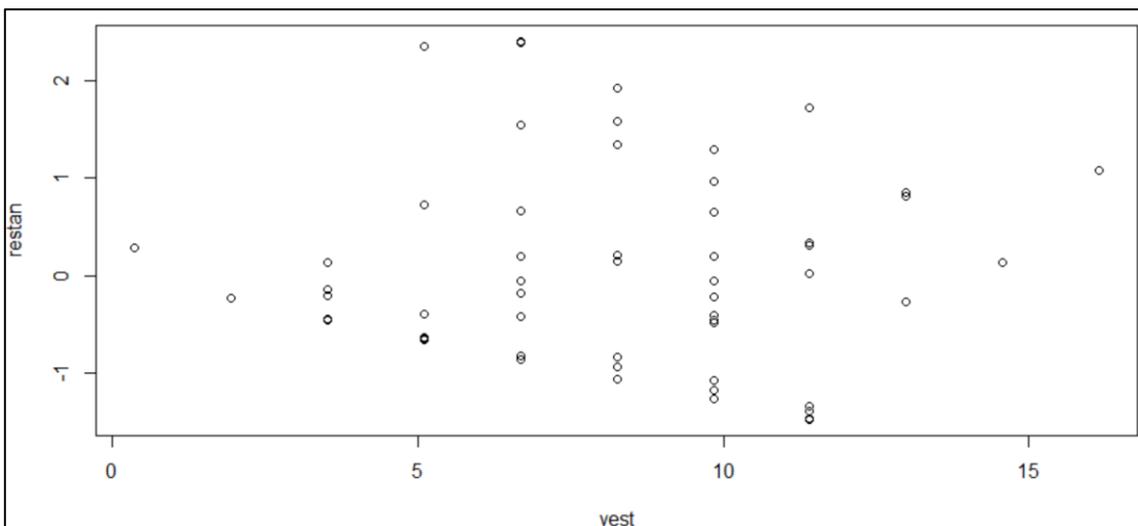
- **LINEALIDAD:**



- **INDEPENDENCIA DE LOS RESIDUALES:**



- **VARIANZA CONSTANTE:**



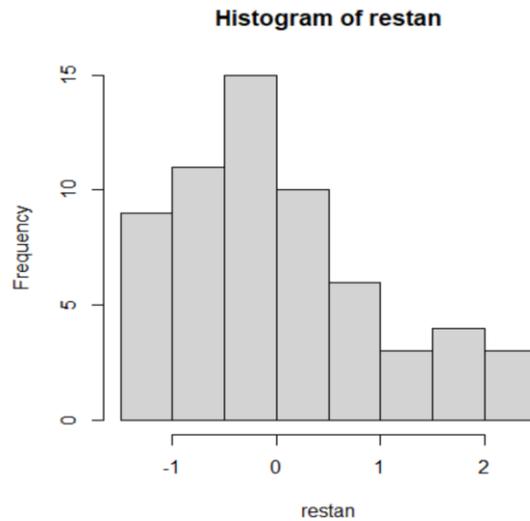
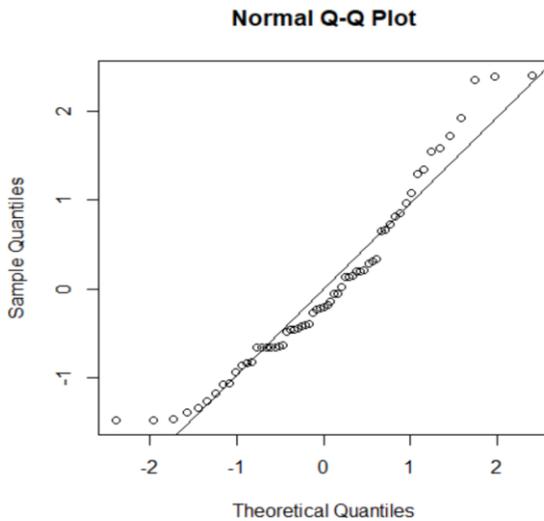
```
> bartlett.test(restan~grupos)
```

Bartlett test of homogeneity of variances

data: restan by grupos

Bartlett's K-squared = 8.8502, df = 2, p-value = 0.01197

- **NORMALIDAD:**



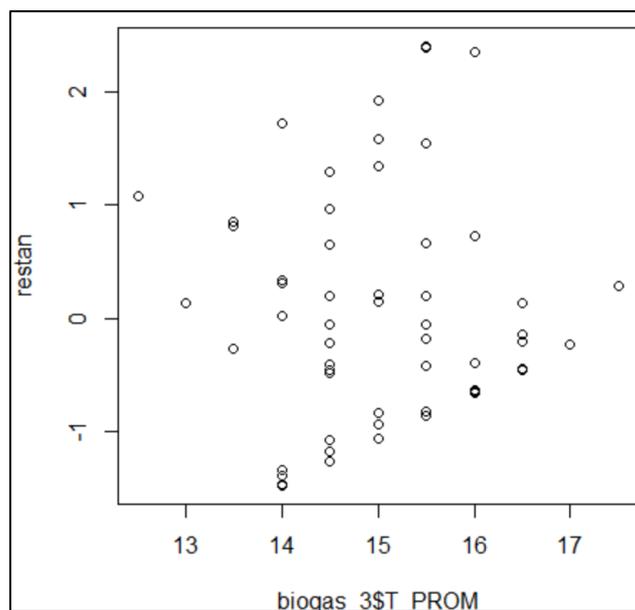
```
> shapiro.test(restan)
```

Shapiro-Wilk normality test

data: restan

W = 0.94234, p-value = 0.006329

- **NO RELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES EXPLICATIVAS Y EL ERROR:**



**Anexo 14: Determinación del volumen del inóculo, agua y sustrato para la prueba PBM con presencia de bolsas plásticas.**

Tipo N°		1	2	3	4	5
Número de biodigestores construidos		5	0	5	5	5
Capacidad máxima (ml)		696.9	702.7	553.4	552.6	574.9
Bolsa de plástico tipo I, II, III y IV	$V_{inóculo}$	41.8	42.1	33.2	33.1	34.4
	$V_{sustrato}$	27.9	28.2	22.2	22.1	23.0
	$V_{inóculo} + V_{sustrato}$	69.7	70.3	55.3	55.3	57.5
	Agua	278.8	281.1	221.4	221.0	233.0
	<b>Carga total del BPA</b>	<b>348.5</b>	<b>351.4</b>	<b>276.7</b>	<b>276.3</b>	<b>287.5</b>
	"Head space" (50%)	348.4	351.3	276.7	276.3	287.4
Controles	$V_{inóculo}$	41.8	42.1	33.2	33.1	34.4
	$V_{sustrato}$	27.9	28.2	22.2	22.1	23.0
	$V_{inóculo} + V_{sustrato}$	69.7	70.3	55.3	55.3	57.5
	Agua	278.8	281.1	221.4	221.0	233.0
	<b>Carga total del BPA</b>	<b>348.5</b>	<b>351.4</b>	<b>276.7</b>	<b>276.3</b>	<b>287.5</b>
	"Head space" (50%)	348.4	351.3	276.7	276.3	287.4

## Anexo 15: Cálculo del potencial bioquímico de metano (PBM) del sustrato con la presencia de bolsa de plástico

### FORMATO PARA CALCULAR EL PBM DEL SUSTRATO CON LA BOLSA DE PLÁSTICO

**OBJETIVO:** Formato utilizado para llenar los datos de la lectura diaria de los BPA y de los controles, para obtener el potencial bioquímico de metano del sustrato cuando tiene la presencia de las bolsas de plástico.

**Código:** DSR-FOR-06

**Sólidos Volátiles:** 31.37 %

**Hora de lectura:** 12 PM

**Tipo de bolsa:** Tipo I

**Sustrato:** Heces caninas + bolsa de plástico

**Cantidad de heces:** 22.18 gr.

**Responsable:** David Severo R.

Fecha	Día	T° ambiental		Tipo I – BP1			Control		Producción de biogás diaria (ml/día)	Producción biogás acumulado (ml)	Rendimiento (ml biogás/g de heces)
		Min	Max	1	2	3	1	2			
15/05/2021	0	1	18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
16/05/2021	1	0	18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
17/05/2021	2	1	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
18/05/2021	3	1	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
19/05/2021	4	3	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
20/05/2021	5	5	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
21/05/2021	6	5	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
22/05/2021	7	5	17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
23/05/2021	8	5	18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
24/05/2021	9	5	17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	-0.159	0.00	-0.0072
25/05/2021	10	-1	18	0.00	0.00	0.00	0.10	0.10	0.000	0.00	0.0000
26/05/2021	11	-1	17	0.00	0.00	0.00	0.10	0.10	-0.319	0.00	-0.0144
27/05/2021	12	-1	17	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.000	0.10	0.0000
28/05/2021	13	-1	18	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.000	0.20	0.0000
29/05/2021	14	0	19	0.00	0.00	0.00	0.20	0.20	-0.638	0.20	-0.0287
30/05/2021	15	0	19	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	-0.319	0.30	-0.0144
31/05/2021	16	0	19	0.10	0.10	0.10	0.30	0.30	-0.638	0.40	-0.0287
1/06/2021	17	0	19	0.10	0.10	0.10	0.30	0.30	-0.638	0.50	-0.0287
2/06/2021	18	0	19	0.40	0.40	0.40	0.30	0.30	0.319	0.90	0.0144
3/06/2021	19	3	18	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.000	1.30	0.0000
4/06/2021	20	4	16	0.40	0.50	0.40	0.50	0.40	-0.053	1.73	-0.0024
5/06/2021	21	5	18	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	-0.106	2.20	-0.0048
6/06/2021	22	4	18	0.50	0.60	0.60	0.50	0.50	0.213	2.77	0.0096
7/06/2021	23	3	20	0.80	0.90	0.80	0.50	0.50	1.063	3.60	0.0479
8/06/2021	24	3	20	1.00	1.00	1.00	0.60	0.60	1.275	4.60	0.0575
9/06/2021	25	2	20	1.10	1.10	1.10	0.60	0.60	1.594	5.70	0.0719
10/06/2021	26	4	19	1.30	1.44	1.30	0.60	0.60	2.380	7.05	0.1073

**Anexo 15: Cálculo del potencial bioquímico de metano (PBM) del sustrato con la presencia de bolsa de plástico (continuación)**

11/06/2021	27	5	16	1.60	1.50	1.50	0.40	0.40	3.400	8.51	0.1533
12/06/2021	28	5	17	1.70	1.70	1.60	0.40	0.40	3.613	10.05	0.1629
13/06/2021	29	5	17	1.80	1.80	1.80	0.40	0.40	4.038	11.71	0.1820
14/06/2021	30	2	17	1.80	1.90	1.90	0.40	0.40	4.463	13.51	0.2012
15/06/2021	31	1	18	2.30	2.30	2.50	0.50	0.40	4.516	15.38	0.2036
16/06/2021	32	0	18	2.80	2.70	2.90	0.40	0.40	6.269	17.75	0.2827
17/06/2021	33	1	19	3.00	3.10	3.10	0.50	0.50	7.332	20.55	0.3306
18/06/2021	34	1	20	3.40	3.30	3.30	0.50	0.50	8.182	23.61	0.3689
19/06/2021	35	3	19	3.20	3.30	3.20	0.50	0.50	9.032	26.95	0.4072
20/06/2021	36	5	19	3.80	3.70	3.60	0.40	0.40	9.032	30.18	0.4072
21/06/2021	37	5	19	4.00	4.10	4.10	0.40	0.40	10.520	33.88	0.4743
22/06/2021	38	5	17	4.30	4.50	4.50	0.50	0.40	11.529	37.95	0.5198
23/06/2021	39	5	18	4.80	4.70	4.80	0.40	0.40	12.857	42.38	0.5797
24/06/2021	40	-1	18	5.10	5.00	5.10	0.30	0.30	14.239	47.15	0.6420
25/06/2021	41	-1	17	5.50	5.40	5.60	0.30	0.30	15.195	52.21	0.6851
26/06/2021	42	-1	17	5.80	5.70	5.80	0.20	0.30	16.736	57.71	0.7545
27/06/2021	43	-1	18	5.60	5.50	5.60	0.20	0.20	17.745	63.48	0.8001
28/06/2021	44	0	19	5.80	5.80	5.80	0.30	0.30	16.789	69.05	0.7569
29/06/2021	45	0	19	6.30	6.40	6.20	0.30	0.30	17.533	74.85	0.7905
30/06/2021	46	0	19	6.60	6.50	6.70	0.30	0.30	19.127	81.15	0.8623
1/07/2021	47	0	19	7.00	6.90	7.10	0.30	0.30	20.083	87.75	0.9055
2/07/2021	48	0	19	8.30	8.20	8.20	0.20	0.20	21.677	94.75	0.9773
3/07/2021	49	0	19	8.60	8.50	8.70	0.20	0.20	25.608	102.98	1.1546
4/07/2021	50	4	16	8.90	8.80	8.80	0.20	0.20	26.777	111.58	1.2073
5/07/2021	51	5	18	8.80	8.80	8.90	0.20	0.30	27.362	120.41	1.2336
6/07/2021	52	4	18	8.60	8.50	8.60	0.20	0.20	27.521	129.25	1.2408
7/07/2021	53	3	20	8.30	8.40	8.40	0.20	0.20	26.671	137.81	1.2025
8/07/2021	54	3	20	8.10	8.00	8.00	0.10	0.10	26.352	146.18	1.1881
9/07/2021	55	2	20	8.00	7.80	7.90	0.10	0.10	25.290	154.21	1.1402
10/07/2021	56	4	19	7.80	7.60	7.60	0.00	0.10	25.024	162.11	1.1282
11/07/2021	57	5	16	7.50	7.40	7.40	0.00	0.00	24.439	169.78	1.1019
12/07/2021	58	5	17	7.00	7.20	7.10	0.00	0.00	23.696	177.21	1.0683
13/07/2021	59	5	17	7.00	7.00	6.80	0.00	0.00	22.633	184.31	1.0204
14/07/2021	60	2	17	1.60	1.50	1.50	0.00	0.00	22.102	191.25	0.9965

## Anexo 15: Cálculo del potencial bioquímico de metano (PBM) del sustrato con la presencia de bolsa de plástico (continuación)

### FORMATO PARA CALCULAR EL PBM DEL SUSTRATO CON LA BOLSA DE PLÁSTICO

**OBJETIVO:** Formato utilizado para llenar los datos de la lectura diaria de los BPA y de los controles, para obtener el potencial bioquímico de metano del sustrato cuando tiene la presencia de las bolsas de plástico.

**Código:** DSR-FOR-06

**Sólidos Volátiles:** 31.37 %

**Hora de lectura:** 12 PM

**Tipo de bolsa:** Tipo II

**Sustrato:** Heces caninas + bolsa de plástico

**Cantidad de heces:** 22.15 gr

**Responsable:** David Severo R.

Fecha	Día	T° ambiental		Tipo II – BP2			Control		Producción de biogás diaria (ml/día)	Producción biogás acumulado (ml)	Rendimiento (ml biogás/g de heces)
		Min	Max	1	2	3	1	2			
15/05/2021	0	1	18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
16/05/2021	1	0	18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
17/05/2021	2	1	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
18/05/2021	3	1	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
19/05/2021	4	3	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
20/05/2021	5	5	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
21/05/2021	6	5	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
22/05/2021	7	5	17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
23/05/2021	8	5	18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
24/05/2021	9	5	17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.000	0.00	0.0000
25/05/2021	10	-1	18	0.00	0.00	0.00	0.10	0.10	0.000	0.00	0.0000
26/05/2021	11	-1	17	0.00	0.00	0.00	0.10	0.10	-0.319	0.00	-0.0144
27/05/2021	12	-1	17	0.00	0.00	0.00	0.10	0.10	-0.319	0.00	-0.0144
28/05/2021	13	-1	18	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.000	0.10	0.0000
29/05/2021	14	0	19	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	-0.159	0.20	-0.0072
30/05/2021	15	0	19	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	-0.159	0.30	-0.0072
31/05/2021	16	0	19	0.10	0.10	0.10	0.30	0.30	-0.478	0.40	-0.0216
1/06/2021	17	0	19	0.10	0.10	0.10	0.30	0.30	-0.638	0.50	-0.0287
2/06/2021	18	0	19	0.10	0.20	0.20	0.30	0.30	-0.425	0.67	-0.0192
3/06/2021	19	3	18	0.20	0.20	0.20	0.40	0.40	-0.638	0.87	-0.0287
4/06/2021	20	4	16	0.20	0.20	0.20	0.50	0.40	-0.797	1.07	-0.0359
5/06/2021	21	5	18	0.30	0.30	0.30	0.50	0.50	-0.638	1.37	-0.0287
6/06/2021	22	4	18	0.70	0.70	0.60	0.50	0.50	0.531	2.03	0.0240
7/06/2021	23	3	20	0.90	0.80	0.80	0.50	0.50	1.063	2.87	0.0479
8/06/2021	24	3	20	1.10	1.00	1.00	0.60	0.60	1.381	3.90	0.0623
9/06/2021	25	2	20	1.20	1.40	1.40	0.60	0.60	2.338	5.23	0.1054
10/06/2021	26	4	19	1.40	1.50	1.50	0.60	0.60	2.763	6.70	0.1246

**Anexo 15: Cálculo del potencial bioquímico de metano (PBM) del sustrato con la presencia de bolsa de plástico (continuación)**

11/06/2021	27	5	16	1.60	1.50	1.70	0.40	0.40	3.825	8.30	0.1725
12/06/2021	28	5	17	1.80	1.80	1.90	0.40	0.40	4.569	10.13	0.2060
13/06/2021	29	5	17	2.00	2.00	2.00	0.40	0.40	5.100	12.13	0.2300
14/06/2021	30	2	17	2.10	2.20	2.30	0.40	0.40	5.738	14.33	0.2587
15/06/2021	31	1	18	2.30	2.30	2.40	0.50	0.40	6.004	16.67	0.2707
16/06/2021	32	0	18	2.60	2.60	2.60	0.40	0.40	7.013	19.27	0.3162
17/06/2021	33	1	19	2.90	2.90	2.90	0.50	0.50	7.651	22.17	0.3449
18/06/2021	34	1	20	3.20	3.30	3.30	0.50	0.50	8.819	25.43	0.3976
19/06/2021	35	3	19	4.40	4.40	4.50	0.50	0.50	12.539	29.87	0.5653
20/06/2021	36	5	19	4.40	4.40	4.40	0.40	0.40	12.751	34.27	0.5749
21/06/2021	37	5	19	4.60	4.60	4.60	0.40	0.40	13.389	38.87	0.6036
22/06/2021	38	5	17	5.00	5.00	4.90	0.50	0.40	14.398	43.83	0.6491
23/06/2021	39	5	18	5.20	5.30	5.20	0.40	0.40	15.408	49.07	0.6947
24/06/2021	40	-1	18	5.30	5.30	5.30	0.30	0.30	15.939	54.37	0.7186
25/06/2021	41	-1	17	5.50	5.40	5.60	0.30	0.30	16.576	59.87	0.7474
26/06/2021	42	-1	17	5.80	5.60	5.60	0.20	0.30	17.267	65.53	0.7785
27/06/2021	43	-1	18	6.00	5.90	5.90	0.20	0.20	18.276	71.47	0.8240
28/06/2021	44	0	19	6.10	6.20	6.10	0.30	0.30	18.595	77.60	0.8384
29/06/2021	45	0	19	6.20	6.30	6.20	0.30	0.30	18.914	83.83	0.8528
30/06/2021	46	0	19	6.30	6.40	6.60	0.30	0.30	19.552	90.27	0.8815
1/07/2021	47	0	19	6.50	6.60	6.60	0.30	0.30	19.977	96.83	0.9007
2/07/2021	48	0	19	6.90	6.80	7.00	0.20	0.20	21.358	103.73	0.9629
3/07/2021	49	0	19	7.00	7.00	7.20	0.20	0.20	21.889	110.80	0.9869
4/07/2021	50	4	16	7.30	7.20	7.30	0.20	0.20	22.527	118.07	1.0156
5/07/2021	51	5	18	7.00	7.00	7.00	0.20	0.30	21.517	125.07	0.9701
6/07/2021	52	4	18	7.20	7.20	7.20	0.20	0.20	22.314	132.27	1.0061
7/07/2021	53	3	20	7.20	7.10	7.00	0.20	0.20	21.996	139.37	0.9917
8/07/2021	54	3	20	7.00	7.10	6.90	0.10	0.10	21.996	146.37	0.9917
9/07/2021	55	2	20	6.50	6.60	6.70	0.10	0.10	20.720	152.97	0.9342
10/07/2021	56	4	19	6.40	6.40	6.30	0.10	0.00	20.136	159.33	0.9078
11/07/2021	57	5	16	6.20	6.20	6.00	0.00	0.00	19.552	165.47	0.8815
12/07/2021	58	5	17	5.80	5.70	5.80	0.00	0.00	18.383	171.23	0.8288
13/07/2021	59	5	17	5.50	5.40	5.60	0.00	0.00	17.533	176.73	0.7905
14/07/2021	60	2	17	5.20	5.30	5.40	0.00	0.00	16.895	182.03	0.7617

**Anexo 15: Cálculo del potencial bioquímico de metano (PBM) del sustrato con la presencia de bolsa de plástico (continuación)**

**FORMATO PARA CALCULAR EL PBM DEL SUSTRATO CON LA BOLSA DE PLÁSTICO**

**OBJETIVO:** Formato utilizado para llenar los datos de la lectura diaria de los BPA y de los controles, para obtener el potencial bioquímico de metano del sustrato cuando tiene la presencia de las bolsas de plástico.

**Código:** DSR-FOR-06

**Sólidos Volátiles:** 31.37 %

**Hora de lectura:** 12 PM

**Tipo de bolsa:** Tipo III

**Sustrato:** Heces caninas + bolsa de plástico

**Cantidad de heces:** 23.4 gr.

**Responsable:** David Severo R.

Fecha	Día	T° ambiental		Tipo III – BP3			Control		Producción de biogás diaria (ml/día)	Producción biogás acumulado (ml)	Rendimiento (ml biogás/g de heces)
		Min	Max	1	2	3	1	2			
15/05/2021	0	1	18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
16/05/2021	1	0	18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
17/05/2021	2	1	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
18/05/2021	3	1	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
19/05/2021	4	3	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
20/05/2021	5	5	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
21/05/2021	6	5	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
22/05/2021	7	5	17	0.00	0.00	0.00	0.10	0.10	0.000	0.00	0.0000
23/05/2021	8	5	18	0.00	0.00	0.00	0.10	0.10	0.000	0.00	0.0000
24/05/2021	9	5	17	0.00	0.00	0.00	0.10	0.10	-0.159	0.00	-0.0069
25/05/2021	10	-1	18	0.00	0.00	0.00	0.10	0.10	0.000	0.00	0.0000
26/05/2021	11	-1	17	0.00	0.00	0.00	0.10	0.10	-0.319	0.00	-0.0138
27/05/2021	12	-1	17	0.00	0.00	0.00	0.20	0.20	-0.319	0.00	-0.0138
28/05/2021	13	-1	18	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.000	0.10	0.0000
29/05/2021	14	0	19	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.000	0.20	0.0000
30/05/2021	15	0	19	0.10	0.10	0.10	0.20	0.30	0.000	0.30	0.0000
31/05/2021	16	0	19	0.10	0.10	0.10	0.30	0.30	-0.319	0.40	-0.0138
1/06/2021	17	0	19	0.10	0.10	0.10	0.30	0.30	-0.638	0.50	-0.0277
2/06/2021	18	0	19	0.10	0.20	0.20	0.30	0.30	-0.425	0.67	-0.0184
3/06/2021	19	3	18	0.20	0.20	0.20	0.40	0.40	-0.638	0.87	-0.0277
4/06/2021	20	4	16	0.20	0.20	0.20	0.50	0.40	-0.797	1.07	-0.0346
5/06/2021	21	5	18	0.30	0.30	0.30	0.50	0.50	-0.638	1.37	-0.0277
6/06/2021	22	4	18	0.30	0.30	0.40	0.50	0.50	-0.531	1.70	-0.0231
7/06/2021	23	3	20	0.50	0.40	0.50	0.50	0.50	-0.106	2.17	-0.0046
8/06/2021	24	3	20	0.70	0.50	0.60	0.60	0.60	0.000	2.77	0.0000
9/06/2021	25	2	20	0.80	0.80	0.90	0.60	0.60	0.744	3.60	0.0323
10/06/2021	26	4	19	1.10	1.20	1.20	0.60	0.60	1.806	4.77	0.0784

**Anexo 15: Cálculo del potencial bioquímico de metano (PBM) del sustrato con la presencia de bolsa de plástico (continuación)**

11/06/2021	27	5	16	1.30	1.40	1.30	0.40	0.40	2.975	6.10	0.1291
12/06/2021	28	5	17	1.50	1.50	1.40	0.40	0.40	3.400	7.57	0.1476
13/06/2021	29	5	17	1.60	1.60	1.60	0.40	0.40	3.825	9.17	0.1660
14/06/2021	30	2	17	1.60	1.60	1.70	0.40	0.40	3.932	10.80	0.1706
15/06/2021	31	1	18	1.80	1.90	1.90	0.50	0.40	4.516	12.67	0.1960
16/06/2021	32	0	18	2.30	2.30	2.50	0.40	0.40	6.269	15.03	0.2721
17/06/2021	33	1	19	2.50	2.40	2.60	0.50	0.50	6.376	17.53	0.2767
18/06/2021	34	1	20	2.90	2.80	2.80	0.50	0.50	7.438	20.37	0.3228
19/06/2021	35	3	19	3.00	2.90	3.00	0.50	0.50	7.863	23.33	0.3413
20/06/2021	36	5	19	3.30	3.30	3.20	0.40	0.40	9.138	26.60	0.3966
21/06/2021	37	5	19	3.60	3.70	3.60	0.40	0.40	10.307	30.23	0.4474
22/06/2021	38	5	17	4.00	4.00	3.90	0.50	0.40	11.210	34.20	0.4866
23/06/2021	39	5	18	4.20	4.40	4.30	0.40	0.40	12.432	38.50	0.5396
24/06/2021	40	-1	18	4.70	4.80	4.80	0.30	0.30	14.239	43.27	0.6180
25/06/2021	41	-1	17	5.00	5.10	5.10	0.30	0.30	15.195	48.33	0.6595
26/06/2021	42	-1	17	5.50	5.40	5.40	0.20	0.30	16.523	53.77	0.7172
27/06/2021	43	-1	18	5.70	5.80	5.70	0.20	0.20	17.639	59.50	0.7656
28/06/2021	44	0	19	5.70	5.70	5.70	0.30	0.30	17.214	65.20	0.7471
29/06/2021	45	0	19	5.80	5.80	5.80	0.30	0.30	17.533	71.00	0.7610
30/06/2021	46	0	19	6.00	5.90	6.00	0.30	0.30	18.064	76.97	0.7840
1/07/2021	47	0	19	6.20	6.40	6.30	0.30	0.30	19.127	83.27	0.8301
2/07/2021	48	0	19	6.70	6.70	6.80	0.20	0.20	20.827	90.00	0.9039
3/07/2021	49	0	19	7.20	7.00	7.00	0.20	0.20	21.889	97.07	0.9501
4/07/2021	50	4	16	7.30	7.20	7.10	0.20	0.20	22.314	104.27	0.9685
5/07/2021	51	5	18	7.60	7.60	7.50	0.20	0.30	23.324	111.83	1.0123
6/07/2021	52	4	18	7.80	7.70	7.90	0.20	0.20	24.227	119.63	1.0515
7/07/2021	53	3	20	8.00	7.90	7.90	0.20	0.20	24.652	127.57	1.0700
8/07/2021	54	3	20	7.80	7.90	7.90	0.10	0.10	24.758	135.43	1.0746
9/07/2021	55	2	20	7.60	7.40	7.40	0.10	0.10	23.483	142.90	1.0192
10/07/2021	56	4	19	7.30	7.30	7.20	0.10	0.00	23.005	150.17	0.9985
11/07/2021	57	5	16	7.40	7.40	7.40	0.00	0.00	23.589	157.57	1.0238
12/07/2021	58	5	17	7.30	7.30	7.20	0.00	0.00	23.164	164.83	1.0054
13/07/2021	59	5	17	7.10	7.00	7.10	0.00	0.00	22.527	171.90	0.9777
14/07/2021	60	2	17	6.80	6.80	6.60	0.00	0.00	21.464	178.63	0.9316

**Anexo 15: Cálculo del potencial bioquímico de metano (PBM) del sustrato con la presencia de bolsa de plástico (continuación)**

**FORMATO PARA CALCULAR EL PBM DEL SUSTRATO CON LA BOLSA DE PLÁSTICO**

**OBJETIVO:** Formato utilizado para llenar los datos de la lectura diaria de los BPA y de los controles, para obtener el potencial bioquímico de metano del sustrato cuando tiene la presencia de las bolsas de plástico.

**Código:** DSR-FOR-06

**Sólidos Volátiles:** 31.37 %

**Hora de lectura:** 12 PM

**Tipo de bolsa:** Tipo IV

**Sustrato:** Heces caninas + bolsa de plástico

**Cantidad de heces:** 27.93 gr.

**Responsable:** David Severo R.

Fecha	Día	T° ambiental		Tipo IV – BP4			Control		Producción de biogás diaria (ml/día)	Producción biogás acumulado (ml)	Rendimiento (ml biogás/g de heces)
		Min	Max	1	2	3	1	2			
15/05/2021	0	1	18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
16/05/2021	1	0	18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
17/05/2021	2	1	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
18/05/2021	3	1	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
19/05/2021	4	3	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
20/05/2021	5	5	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
21/05/2021	6	5	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.0000
22/05/2021	7	5	17	0.00	0.10	0.10	0.00	0.00	0.213	0.07	0.0076
23/05/2021	8	5	18	0.10	0.10	0.10	0.00	0.00	0.319	0.17	0.0114
24/05/2021	9	5	17	0.20	0.20	0.20	0.10	0.00	0.478	0.37	0.0171
25/05/2021	10	-1	18	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.319	0.47	0.0114
26/05/2021	11	-1	17	0.20	0.20	0.20	0.10	0.10	0.319	0.67	0.0114
27/05/2021	12	-1	17	0.30	0.40	0.40	0.20	0.20	0.850	1.03	0.0304
28/05/2021	13	-1	18	0.40	0.50	0.40	0.20	0.20	1.063	1.47	0.0380
29/05/2021	14	0	19	0.50	0.50	0.50	0.20	0.20	0.956	1.97	0.0342
30/05/2021	15	0	19	0.70	0.60	0.60	0.20	0.20	1.381	2.60	0.0495
31/05/2021	16	0	19	0.70	0.70	0.80	0.20	0.20	1.700	3.33	0.0609
1/06/2021	17	0	19	0.80	0.80	0.90	0.30	0.20	1.860	4.17	0.0666
2/06/2021	18	0	19	0.90	0.90	1.00	0.40	0.40	1.700	5.10	0.0609
3/06/2021	19	3	18	1.00	1.00	1.00	0.40	0.40	1.913	6.10	0.0685
4/06/2021	20	4	16	1.10	1.00	1.10	0.30	0.30	2.444	7.17	0.0875
5/06/2021	21	5	18	1.10	1.10	1.20	0.30	0.30	2.656	8.30	0.0951
6/06/2021	22	4	18	1.10	1.20	1.10	0.40	0.40	2.338	9.43	0.0837
7/06/2021	23	3	20	1.10	1.10	1.10	0.30	0.30	2.550	10.53	0.0913
8/06/2021	24	3	20	1.20	1.20	1.20	0.30	0.30	2.869	11.73	0.1027
9/06/2021	25	2	20	1.40	1.40	1.40	0.30	0.40	2.710	12.93	0.0970
10/06/2021	26	4	19	1.70	1.80	1.60	0.30	0.30	3.400	14.30	0.1217

**Anexo 15: Cálculo del potencial bioquímico de metano (PBM) del sustrato con la presencia de bolsa de plástico (continuación)**

11/06/2021	27	5	16	1.80	1.90	1.90	0.40	0.30	3.772	15.83	0.1351
12/06/2021	28	5	17	2.00	2.00	2.00	0.40	0.40	4.569	17.67	0.1636
13/06/2021	29	5	17	2.30	2.30	2.20	0.30	0.30	5.738	19.77	0.2054
14/06/2021	30	2	17	2.80	2.90	2.90	0.40	0.40	6.057	22.07	0.2169
15/06/2021	31	1	18	3.00	3.10	3.00	0.30	0.30	6.482	24.40	0.2321
16/06/2021	32	0	18	3.20	3.10	3.20	0.40	0.40	8.607	27.50	0.3082
17/06/2021	33	1	19	3.50	3.50	3.40	0.50	0.50	9.245	30.90	0.3310
18/06/2021	34	1	20	3.90	3.80	3.80	0.40	0.50	10.466	34.63	0.3747
19/06/2021	35	3	19	4.20	4.50	4.20	0.30	0.40	11.423	38.57	0.4090
20/06/2021	36	5	19	4.60	4.80	4.80	0.40	0.40	12.113	42.77	0.4337
21/06/2021	37	5	19	5.00	4.90	4.90	0.40	0.40	12.751	47.17	0.4565
22/06/2021	38	5	17	5.30	5.20	5.20	0.50	0.40	13.229	51.77	0.4737
23/06/2021	39	5	18	5.90	5.90	5.80	0.40	0.40	14.132	56.60	0.5060
24/06/2021	40	-1	18	6.40	6.40	6.50	0.50	0.40	15.142	61.80	0.5421
25/06/2021	41	-1	17	6.90	6.90	7.00	0.40	0.50	15.992	67.27	0.5726
26/06/2021	42	-1	17	7.40	7.40	7.30	0.20	0.30	17.373	72.97	0.6220
27/06/2021	43	-1	18	7.80	7.80	7.70	0.30	0.30	17.108	78.63	0.6125
28/06/2021	44	0	19	7.60	7.50	7.60	0.30	0.40	16.948	84.30	0.6068
29/06/2021	45	0	19	7.40	7.30	7.30	0.40	0.40	17.214	90.10	0.6163
30/06/2021	46	0	19	7.10	7.00	7.20	0.40	0.40	18.170	96.20	0.6506
1/07/2021	47	0	19	7.00	6.90	6.90	0.30	0.40	18.755	102.43	0.6715
2/07/2021	48	0	19	6.50	6.40	6.60	0.30	0.30	18.914	108.67	0.6772
3/07/2021	49	0	19	6.50	6.30	6.50	0.30	0.30	18.702	114.83	0.6696
4/07/2021	50	4	16	5.70	5.80	5.80	0.30	0.30	19.020	121.10	0.6810
5/07/2021	51	5	18	5.20	5.60	5.40	0.20	0.30	18.755	127.23	0.6715
6/07/2021	52	4	18	5.00	4.90	5.10	0.20	0.20	17.958	133.07	0.6430
7/07/2021	53	3	20	4.00	4.10	4.30	0.20	0.20	17.108	138.63	0.6125
8/07/2021	54	3	20	3.90	3.90	3.90	0.20	0.20	16.895	144.13	0.6049
9/07/2021	55	2	20	3.40	3.70	3.30	0.20	0.20	16.258	149.43	0.5821
10/07/2021	56	4	19	3.10	3.00	3.00	0.20	0.20	15.514	154.50	0.5555
11/07/2021	57	5	16	2.50	2.10	2.40	0.10	0.20	14.929	159.33	0.5345
12/07/2021	58	5	17	1.90	1.70	2.00	0.10	0.10	13.601	163.70	0.4870
13/07/2021	59	5	17	1.60	1.50	1.40	0.10	0.10	13.282	167.97	0.4756
14/07/2021	60	2	17	1.20	1.30	1.10	0.00	0.00	12.857	172.00	0.4603

## Anexo 16: Resumen del análisis de regresión lineal de las pruebas BP1, BP2, BP3 y BP4.

### BP1:

```
> summary(lm_biogas)

Call:
lm(formula = biogas$PROD_BG ~ biogas$T_PROM)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-10.080  -9.079  -4.366   9.416  17.941

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)    4.0762    11.8363   0.344   0.732
biogas$T_PROM  0.5003     1.1481   0.436   0.665

Residual standard error: 10.26 on 59 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.003209, Adjusted R-squared:  -0.01369
F-statistic: 0.1899 on 1 and 59 DF,  p-value: 0.6646
```

### BP2:

```
> summary(lm_biogas)

Call:
lm(formula = biogas$PROD_BG ~ biogas$T_PROM)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-9.611  -8.681  -2.846   9.507  13.846

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)    6.7330    10.4011   0.647   0.520
biogas$T_PROM  0.1948     1.0089   0.193   0.848

Residual standard error: 9.013 on 59 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.0006315, Adjusted R-squared:  -0.01631
F-statistic: 0.03728 on 1 and 59 DF,  p-value: 0.8476
```

**BP3:**

```
> summary(lm_biogas)
```

Call:

```
lm(formula = biogas$PROD_BG ~ biogas$T_PROM)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-9.558	-8.632	-4.412	9.582	15.838

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	5.6126	11.1290	0.504	0.616
biogas\$T_PROM	0.2876	1.0795	0.266	0.791

Residual standard error: 9.644 on 59 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.001201, Adjusted R-squared: -0.01573

F-statistic: 0.07097 on 1 and 59 DF, p-value: 0.7909

**BP4:**

```
> summary(lm_biogas)
```

Call:

```
lm(formula = biogas$PROD_BG ~ biogas$T_PROM)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-8.431	-6.963	-2.287	7.388	10.762

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	9.9911	8.3686	1.194	0.237
biogas\$T_PROM	-0.1733	0.8117	-0.214	0.832

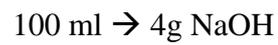
Residual standard error: 7.252 on 59 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.0007723, Adjusted R-squared: -0.01616

F-statistic: 0.0456 on 1 and 59 DF, p-value: 0.8316

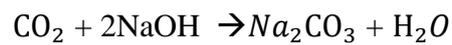
## Anexo 17: Preparación de la trampa de CO<sub>2</sub>

Para preparar la solución de NaOH con concentración 1 Molar que funcionará como trampa de CO<sub>2</sub> se tendrá en cuenta las siguientes cantidades:

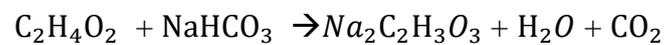


### Reacciones químicas:

- **Trampa de CO<sub>2</sub>:**



- **Generador de CO<sub>2</sub>:**



## Anexo 18: Definiciones

- **Anaeróbico o anaerobio:** Degradación biológica de la MO en ausencia de oxígeno.
- **Acidogénesis:** Segunda etapa de la DA. Reacción biológica donde monómeros simples (molécula que puede combinarse con otros monómeros iguales para formar un polímero) son convertidos en ácidos grasos.
- **Acético:** Es el principal responsable de darle al vinagre su olor y sabor característico. Producido por microorganismos mediante la fermentación. Su fórmula química es  $CH_3COOH$ .
- **Acetogénesis:** Proceso por el cual las bacterias acetogénicas producen acetato (ion acetato -  $C_2H_3O_2$ ). Es la base conjugada del ácido acético.
- **Ácidos grasos:** Son ácidos orgánicos compuestos principalmente por C, H y O, que forman moléculas lipídicas, las cuales, según su tamaño variarán en su nomenclatura.
- **Aerobio o anaeróbico:** Medio con presencia de oxígeno que también es utilizado para denominar a los organismos que necesitan de este para su subsistencia.
- **Aminoácidos:** Molécula orgánica que presenta un grupo amino ( $NH_2$ ) en un extremo y un grupo carboxilo en el otro ( $COOH^-$ ). Participan en la formación de moléculas más complejas como las proteínas. Pueden dividirse entre esenciales y no esenciales.
- **Azúcares:** También conocidos como monosacáridos simples. Están compuestos por C, H y O, siguiendo la fórmula química  $C_nH_{2n}O_n$ .
- **Bacterias acidogénicas:** Son los microorganismos responsables de llevar a cabo la acidogénesis. Convirtiendo los azúcares y aminoácidos en  $CO_2$ , H,  $NH_3$  y ácidos orgánicos, los cuales sirven como base para la acetogénesis.
- **Bacterias acetogénicas:** Son los microorganismos responsables de llevar a cabo la acetogénesis. Donde producen acetato a partir de ciertos compuestos generados en la acidogénesis como el  $CO_2$ .
- **Bacterias hidrolíticas:** Son los microorganismos encargados de degradar ciertos compuestos complejos en moléculas más simples mediante la hidrólisis.
- **Bacterias metanogénicas:** Son los microorganismos responsables de llevar a cabo la metanogénesis. Generalmente son estrictamente anaerobios (ausencia de oxígeno), donde producen metano.
- **Bacterias productoras de hidrógeno:** Son microorganismos que, como producto de su metabolismo, liberan hidrógeno al medio para que pueda ser utilizado por otras bacterias.

- **Desechos orgánicos:** desechos que pueden ser degradados por microorganismos vivos en una determinada cantidad de tiempo razonable.
- **Biodisponibilidad:** Fracción de una sustancia o químico puede ser absorbido por bacterias u otros organismos vivos.
- **Biodegradable:** Sustancia capaz de ser descompuesta por bacterias u otros organismos vivos.
- **Biodigestor:** Envase cerrado herméticamente para evitar fugas, donde la materia orgánica utilizada como sustrato es degradada por microorganismos anaerobios transformándose en digestato y biogás.
- **Biodigestor a pequeña escala (BPA):** Son biodigestores construidos a pequeña escala cuya función es representar el funcionamiento y las condiciones de un biodigestor. Son utilizados para conocer el desempeño de un tipo de sustrato que sea de interés.
- **Biodigestor de carga fija o tipo “Batch”:** Representan un tipo de biodigestor cuya característica es que son de carga fija. Lo cual significa que son cargados una sola vez y luego quedan cerrados hasta que la producción de biogás se detenga.
- **Biogás:** Gas rico en metano producido por la descomposición o fermentación de la materia orgánica. Es el nombre popular usado para nombrar la mixtura de gases inflamables que se generan cuando la materia orgánica está sujeta a descomposición anaeróbica.
- **Biomasa:** Material proveniente de organismos vivos, recientemente vivos u organismos biológicos. En un contexto energético es utilizado frecuentemente para materia antes, específicamente para madera.
- **Blanco o control:** Biodigestores que solo contienen inóculo. La producción neta de metano se asume como la diferencia entre el promedio de producción de las muestras menos el promedio de producción de los blancos o controles.
- **Butírico:** Es uno de los compuestos que se pueden obtener como subproducto de la fermentación.
- **Cámara de fermentación:** Zona del biodigestor donde se almacena la biomasa o sustrato durante el proceso de la DA.
- **Celulosa:** Polisacárido que es el principal componente de las paredes celulares vegetales.
- **Codigestión:** Se le conoce así al proceso de digestión anaeróbica compuesto por dos o más sustratos a la vez.
- **Densidad:** En física representa la medida de la relación entre masa y volumen de un cuerpo. Generalmente se representa en  $kg/m^3$ .

- **Demanda química de oxígeno (DQO):** Al igual que los SV, son indicadores indirectos de la cantidad de carbono orgánico presente en el sustrato. Sin embargo, se diferencian en que el DQO es utilizado para sustratos líquidos y los VS para los sustratos sólidos. Una correlación teórica entre ambos se daría si por ejemplo asumimos que el 50 por ciento de SV representa la cantidad de C, por lo tanto, 32g de  $O_2$  es necesario para oxidar 12 g de C, entonces la **DQO = 1.333 SV**.
- **Digestato:** Es el lodo resultante después del proceso de la DA el cual es un residuo estabilizado que de acuerdo con sus características químicas puede ser utilizado como fertilizante.
- **Digestión anaeróbica (DA):** Proceso fermentativo en el cual los microorganismos que degradan la materia orgánica, produciendo metano y dióxido de carbono como resultado final.
- **Digestor:** Contenedor en la cual la DA toma lugar.
- **Etanol:** Conocido también como alcohol etílico, el cual forma parte de los alcoholes ( $OH^-$ ). Su fórmula química es  $C_2H_5OH^-$ .
- **Fertilizante:** Es una sustancia que puede ser de origen orgánico o inorgánico que le brinda al suelo los nutrientes necesarios para que sean asimilados por las plantas, los cuales favorecen su crecimiento y desarrollo.
- **Fórmico:** Es uno de los compuestos que se pueden obtener como subproducto de la fermentación.
- **Fracción orgánica:** Es la fracción que representan la parte orgánica de un sustrato. Generalmente es la fracción asimilable por los microorganismos encargados de la digestión anaeróbica.
- **Glicerol:** Es parte de la familia de los alcoholes, cuya característica es que posee tres grupos hidroxilos ( $OH^-$ ).
- **Gnathotomiasis:** Es una zoonosis producida por un nemátodo del género *Gnathostoma*. La cual se produce por el consumo de carne cruda contaminada por este parásito. El humano es considerado como huésped accidental, pero también puede ser adquirido por los PD.
- **“Headspace”:** Porción dentro del biodigestor ocupado por biogás.
- **Hemicelulosa:** Es un polisacárido formado por varios monosacáridos diferentes. El cual es componente de las paredes de las células vegetales.

- **Hidatidosis:** Enfermedad producida por larvas del género *Echinococcus granulosus*. Esta puede tener como huésped final el intestino delgado de animales carnívoros como el PD.
- **Hidratos de carbono:** Son moléculas compuestas principalmente por C, H y O. Los cuales de acuerdo con su tamaño se pueden clasificar en hidratos de carbono simples o compuestos. Su fórmula química es  $(CH_2O)_n$ .
- **Hidrólisis:** Primera etapa de la DA. Descomposición o rotura de enlaces químicos mediante su reacción con el agua o la conversión catalítica de almidón en glucosa.
- **Humedad:** Se denomina así a la cantidad de agua o vapor de agua presente en el aire o compuesto orgánico.
- **Inóculo:** Biomasa con un alto contenido de microorganismos que son necesarios para el arranque y mantenimiento del proceso de la DA.
- **Inorgánico:** Materia no proveniente de organismos vivos.
- **Metanogénesis:** Tercera etapa de la DA, se produce metano por las bacterias y otros organismos.
- **Láctico:** Es uno de los compuestos que se pueden obtener como subproducto de la fermentación.
- **Larva migrans:** Enfermedad producida por un helminto del género *Ancylostoma*. Los PD sirven como huésped y pueden transmitir la enfermedad hacia los humanos por medio de sus heces.
- **Ley de Boyle:** afirma que “para una cierta cantidad de gas a una temperatura constante, el volumen del gas es inversamente proporcional a su presión”.
- **Ley de Charles:** afirma que “el volumen del gas aumenta cuando aumenta la temperatura o disminuye si la temperatura desciende”.
- **Lignina:** Es un polímero orgánico que es componente de los tejidos estructurales de las plantas.
- **Lípidos:** Son compuestos principalmente por C, H y O. Son macromoléculas que dentro de los seres humanos cumplen funciones de señalización, almacenamiento de energía o como componentes estructurales dentro de las células.
- **Orgánico:** Relacionado o proveniente de la materia viva.
- **Parásito:** Es el nombre con el que se conoce a un organismo que vive a costa de otro, ocasionándole un efecto negativo.
- **Pasteurización:** Se le conoce así al proceso de esterilización de ciertos microorganismos patógenos por medio de calor.

- **Péptidos:** Son moléculas que están formadas por dos o más aminoácidos mediante enlaces peptídicos.
- **Perro doméstico (PD):** *Canis lupus familiaris* que es un animal mamífero carnívoro que pertenece a la familia *Canidae*.
- **Potencial bioquímico de metano (PBM):** Es la cantidad promedio de metano producido por un sustrato mediante la DA en un tiempo dado. Es convencional asumir que la prueba dura 30 días. Si está acompañado por un sufijo, este representa la cantidad de días que dura el experimento, ej.  $PBM_{30}$ .
- **Potencial de hidrógeno (pH):** Es la medida de la actividad del radical OH en un medio acuoso, en una escala que va del 1 al 14. Si el pH tiene un valor de 7, se dice que la solución es neutra, si es menor a 7, la solución será ácida y si es mayor a 7, la solución será básica o alcalina.
- **Propiónico:** Es uno de los compuestos que se pueden obtener como subproducto de la fermentación.
- **Proteínas:** Son macromoléculas que están formadas por una o varias cadenas de aminoácidos. Las cuales tienen distintas funciones dentro de los seres vivos.
- **Sustrato:** Biomasa de origen animal o vegetal que puede ser empleado como materia prima para la DA para su descomposición y producción de biogás.
- **Tiempo de retención:** Es la cantidad de tiempo promedio que el sustrato se encuentra dentro del biodigestor.
- **Materia orgánica (MO):** Fracción de los sólidos totales que se asume que es la porción asimilable o digestible. Se puede asociar la misma definición de sólidos volátiles.
- **Residuos sólidos (RS):** Se les denomina así a los desechos provenientes de las distintas actividades económicas. Los cuales de por sí no representan valor económico.
- **Siloxanos:** Compuestos orgánicos que contienen un enlace sílice – oxígeno (Si-O) y radicales orgánicos (metil, etil y otros grupos orgánicos). En el biogás se pueden encontrar siloxanos lineales y cíclicos.
- **Sólidos totales (ST):** Toda MO está compuesta por la fracción sólida conocida como sólidos totales y agua. Los sólidos totales representan el porcentaje de sólidos que posee el sustrato sin contar su contenido de agua. Por lo tanto,  $ST = WW - \text{Contenido de humedad}$ .
- **Sólidos volátiles (SV):** Es la porción de sólidos totales que contiene los componentes orgánicos, los que teóricamente son digestibles para los microorganismos y son convertidos a metano.  $SV = ST - \text{ceniza}$

- **Tasa de carga orgánica (TCO):** Es la cantidad de biomasa que será cargada diariamente al biodigestor.  $TCO = CO * V$
- **Tiempo de retención hidráulico (TRH):** tiempo promedio que un volumen de biomasa líquida permanece en el biodigestor.
- **Toxocariasis:** enfermedad producida por *Toxocara canis*, el cual es un helminto parásito, donde el perro se infecta al consumir huevos larvados. Los perros con estos parásitos contaminan los suelos por medio de su materia fecal donde se encuentran los huevos infectados, los cuales al entrar en contacto con los humanos provocan la infección. Los huevos llegan a los intestinos y son diseminados por el torrente sanguíneo hasta establecerse en las vísceras dando lugar a granulomas que producen la enfermedad. La hembra contaminada puede transmitir las larvas a su descendencia por medio de la leche materna.
- **Valérico:** Es uno de los compuestos que se pueden obtener como subproducto de la fermentación.
- **Vía acetoclásica:** Es la vía metanogénica que utiliza como sustrato el ácido acético.
- **Vía hidrogenotrófica:** Es la vía metanogénica que utiliza como sustrato  $H_2$ .
- **“Wet weight (WW)”:** Representa el peso de la muestra, incluido su contenido de humedad.

## Anexo 19: Unidades y abreviaturas

<b>a:</b>	Largo
<b>B:</b>	Boro
<b>BAP:</b>	Biodigestores anaerobios a pequeña escala
<b>C:</b>	Carbono
<b>Ca:</b>	Calcio
<b>CH<sub>3</sub>COO<sup>-</sup>:</b>	Acetato
<b>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>:</b>	Ácido acético
<b>CH<sub>4</sub>:</b>	Metano
<b>cm:</b>	Centímetros
<b>cm<sup>3</sup>:</b>	Centímetros cúbicos
<b>Co:</b>	Cobalto
<b>CO<sub>2</sub>:</b>	Dióxido de carbono
<b>Cr:</b>	Cromo
<b>Cu:</b>	Cobre
<b>DA:</b>	Digestión anaeróbica
<b>DQO:</b>	Demanda química de oxígeno
<b>FORS:</b>	Fracción orgánica de los residuos sólidos
<b>Fe:</b>	Hierro
<b>GPC:</b>	Generación per cápita
<b>h:</b>	Ancho
<b>H<sub>2</sub>O d:</b>	Agua destilada
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:</b>	Ácido sulfúrico
<b>HC:</b>	Heces caninas
<b>H<sub>2</sub>:</b>	Hidrógeno molecular
<b>K:</b>	Potasio
<b>kg:</b>	Kilogramos
<b>m:</b>	Masa
<b>m<sup>3</sup>:</b>	Metros cúbicos
<b>mg:</b>	Miligramos
<b>ml:</b>	Mililitros
<b>Mg:</b>	Magnesio

<b>mm:</b>	Milímetros
<b>Mn:</b>	Manganeso
<b>MO:</b>	Materia orgánica
<b>Mo:</b>	Molibdeno
<b>N:</b>	Nitrógeno
<b>Na:</b>	Sodio
<b>NaOH:</b>	Hidróxido de sodio (conocido como soda cáustica)
<b>NaHCO<sub>3</sub>:</b>	Bicarbonato de sodio
<b>Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>:</b>	Carbonato de sodio
<b>Na<sub>2</sub>C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>O<sub>3</sub>:</b>	Acetato de sodio
<b>NH<sub>3</sub>:</b>	Amoníaco
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>:</b>	Ion amonio
<b>Ni:</b>	Níquel
<b>l:</b>	Litros
<b>PD:</b>	Perros domésticos
<b>PBM:</b>	Potencial bioquímico de metano
<b>p:</b>	Profundidad
<b>PH:</b>	Potencial de hidrógeno
<b>RS:</b>	Residuos sólidos
<b>RSM:</b>	Residuos sólidos municipales
<b>RSO:</b>	Residuos sólidos orgánicos
<b>RSU:</b>	Residuos sólidos urbanos
<b>Se:</b>	Selenio
<b>SV:</b>	Sólidos volátiles
<b>ST:</b>	Sólidos totales o “dry weight” (DW)
<b>Ton:</b>	Toneladas
<b>VOC:</b>	Compuestos orgánicos volátiles
<b>v:</b>	Volumen
<b>W:</b>	Wolframio o tungsteno
<b>Ww:</b>	“Wet weight” o materia seca
<b>Zn:</b>	Zinc
<b>ρ:</b>	densidad