

CAPITULO I
MARCO TEORICO

1.1. Estiércol vacuno.

Es una mezcla de materia fecal y alimento rechazado, procedente del tracto digestivo de las vacas y los bueyes, contienen residuos no digeridos de alimentos, y factores digestivos como enzimas, jugos gástricos, pancreáticos y células muertas de la mucosa intestinal, bacterias vivas y muertas del colon y productos del desecho del metabolismo.

El estiércol es el excremento de animales de ganadería, el cual se compone de una mezcla de material orgánico digerido y orina, que es utilizada para fertilizar el suelo.

La aplicación del estiércol en el suelo permite el aporte de nutrientes, incrementa la retención de la humedad, y mejora la actividad biológica, con lo cual se incrementa la fertilidad del suelo y por ende su productividad. (Moreira, 2013)

1.1.1. Contaminación por el estiércol.

El sector ganadero es uno de los principales responsables del efecto invernadero en el mundo y resulta más nocivo que el sector del transporte, según la Organización de Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

El sector ganadero genera más gases de efecto invernadero, principalmente por el metano producido, los cuales al ser medidos en su equivalente en dióxido de carbono (CO₂) son más altos que los del sector del transporte. La ganadería no sólo amenaza al medio ambiente sino que también es una de las principales causas de la degradación del suelo y de los recursos hídricos.

Para muchos campesinos pobres en los países en desarrollo, el ganado es también una fuente de energía como fuerza de tiro y una fuente esencial de fertilizante orgánico para las cosechas. Durante mucho tiempo el estiércol se utilizó como abono natural para fertilizar el suelo, proporcionándole nutrientes, por lo que se pudo aplicar a la mayoría de suelos de cultivos, a través del proceso de compostaje para ayudar a la fertilización del mismo. (HIVOS, 2013)

1.1.2. Composición del estiércol.

El estiércol no es un abono de composición fija. Esta depende de la edad de los animales de que se procede, de la especie, de la alimentación a que están sometidas, trabajo que realizan, aptitud, naturaleza y composición de camas, etc. Un animal joven consume mayor cantidad

de nitrógeno y fósforo que un animal viejo; las deyecciones que de aquel proceden contienen, pues, menor cantidad de esos elementos. Los animales viejos habiendo cesado de crecer, asimilan los alimentos únicamente las cantidades necesarias para cubrir las pérdidas y dan estiércoles más ricos en elementos fertilizantes. (Moreira, 2013)

Las diversas especies animales producen excremento de composición química diferente. Resulta que los orines del ganado abundan en nitrógeno (N) y, sobre todo en potasio (K), y en cambio apenas contienen ácido fosfórico, que se encuentra todo en las deyecciones sólidas. (Ver Tabla I-1).

Tabla I-1: Composición media de estiércoles frescos de diferentes animales domésticos (% materia seca).

Nutriente	Vacunos	Porcinos	Caprinos	Conejos	Gallinas
Materia orgánica (%)	48,9	45,3	52,8	63,9	54,1
Nitrógeno Total (%)	1,25	1,36	1,55	1,94	2,38
Calcio (CaO %)	2,03	2,72	3,2	2,36	3,63
Potasio (K ₂ O %)	0,84	0,66	0,74	0,95	1,39
Magnesio (MgO %)	0,51	0,65	0,57	0,45	0,77

Fuente: (Moreira, 2013)

1.2. Residuos sólidos vegetales.

Los residuos sólidos vegetales, constituyen aquellos que se desechan del aprovechamiento del vegetal, y que por lo general por sí solos carecen de valor económico.

Se componen principalmente de desechos procedentes de materiales utilizados en la transformación o utilización de bienes de consumo. Todos estos residuos sólidos, en su mayoría son susceptibles de reaprovecharse o transformarse con un correcto reciclado. Los principales "productores" de residuos sólidos somos los ciudadanos de las grandes ciudades, con un porcentaje muy elevado, en especial por la poca conciencia del reciclaje que existe en la actualidad. Afortunadamente esto está cambiando poco a poco, y problemas como el cambio climático, son ahora una amenaza real y a corto plazo.

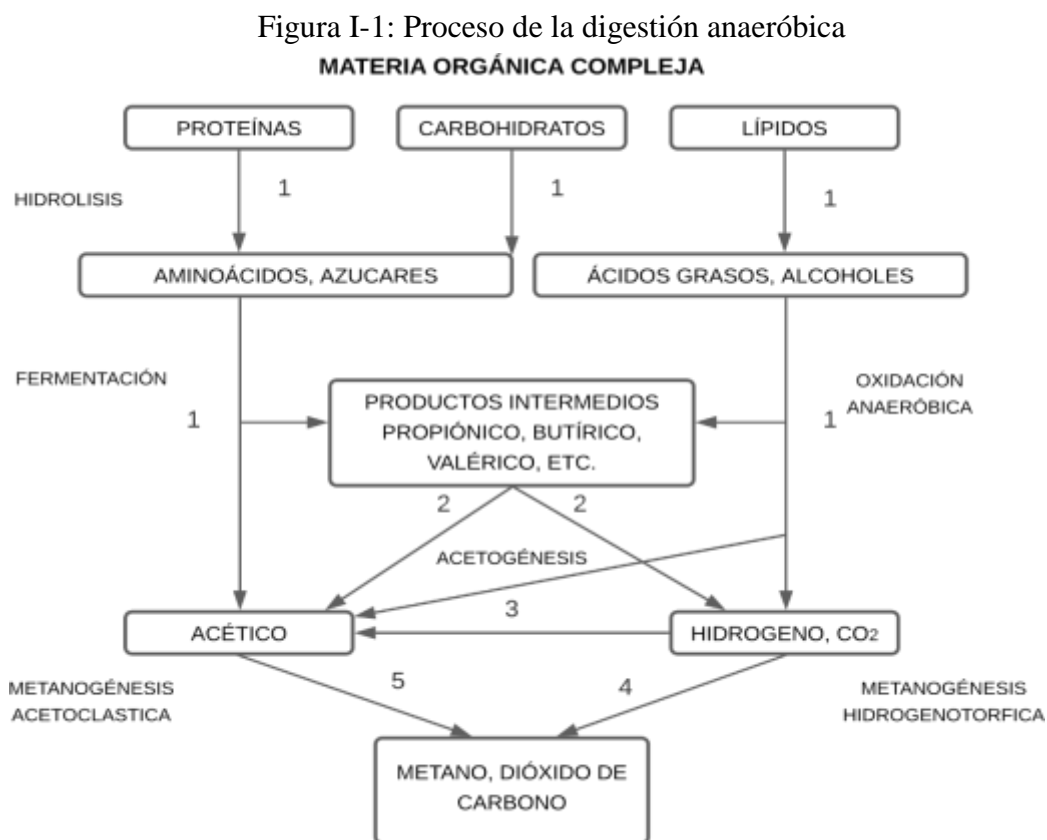
1.3. Definición de biomasa.

La biomasa es materia orgánica utilizada como fuente energética. Por su amplia definición, la biomasa abarca un amplio conjunto de materias orgánicas que se caracteriza por su heterogeneidad, tanto por su origen como por su naturaleza.

La valoración de la biomasa puede hacerse a través de cuatro procesos básicos mediante los que puede transformarse en calor y electricidad: combustión, digestión anaerobia, gasificación y pirolisis.

1.4. Digestión anaeróbica.

La digestión anaeróbica es la degradación biológica u oxidación del material orgánico, donde interviene microorganismos específicos en ausencia de aire. (Ver Figura I-1).



Fuente: Elaboración propia, basado en (Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2011)

En este proceso el material a degradar se transforma en dos productos utilizables, el uno en un producto estable e inerte llamado biol y el otro en biogás con un alto contenido de metano, ambos productos de este proceso poseen cualidades energéticas.

1.4.1. Etapas de la digestión anaeróbica.

Los estudios bioquímicos y microbiológicos realizados hasta ahora, dividen el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica en cuatro fases o etapas:

Etapa 1: Hidrólisis

La hidrólisis es el primer paso necesario para la degradación anaeróbica de sustratos orgánicos complejos. Por tanto, es el proceso de hidrólisis el que proporciona sustratos orgánicos para la digestión anaeróbica. La hidrólisis de estas moléculas complejas es llevada a cabo por la acción de enzimas extracelulares producidas por microorganismos hidrolíticos. Esta es la etapa donde las proteínas, carbohidratos y grasas son transformados en compuestos solubles por acción de bacterias proteolíticas, celulíticas y lipolíticas, respectivamente. Esta etapa es fundamental para suministrar los compuestos orgánicos necesarios para la estabilización anaeróbica en forma que pueden ser utilizados por las bacterias responsables de las dos etapas siguientes. (Moreira, 2013)

Etapa 2: Acidogénesis o fermentativa

Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico, hidrogeno) y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso. La importancia de la presencia de este grupo de bacterias no sólo radica en el hecho que produce el alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente, sino que, además eliminan cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema. (Hilbert, 2010)

Etapa 3: Acetogénesis

Aprovechan los compuestos que no pueden ser metabolizadas por las bacterias metanogénicas (etanol, ácidos grasos, y compuestos aromáticos) y los transforman en compuestos más simples como acetato e hidrógeno. Unos microorganismos acetogénicos muy especiales, denominados homoacetogénicos son capaces de solo producir acetato y pueden ser empleados para mantener bajas presiones parciales de gas hidrógeno ya que no lo producen. (Moreira, 2013)

A esta altura del proceso, la mayoría de las bacterias anaeróbicas han extraído todo el alimento de la biomasa y, como resultado de su metabolismo, eliminan sus propios productos de desecho de sus células. Estos productos, ácidos volátiles sencillos, son los que van a utilizar como sustrato las bacterias metanogénicas en la etapa siguiente.

Etapa 4: Metanogénesis

En esta etapa, un amplio grupo de bacterias anaeróbicas estrictas, actúa sobre los productos resultantes de las etapas anteriores. Los microorganismos metanogénicos pueden ser considerados como los más importantes dentro del consorcio de microorganismos anaerobios, ya que son los responsables de la formación de metano y de la eliminación del medio de los productos de los grupos anteriores, siendo, además, los que dan nombre al proceso general de biometanización. Los microorganismos metanogénicos completan el proceso de digestión anaeróbica mediante la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, hidrogeno/dióxido de carbono, formato, metanol y algunas metilaminas. (Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2011)

1.5. Biogás.

Es una mezcla de gases cuyos principales componentes son el metano y el dióxido de carbono, el cual se produce como resultado de la fermentación de la materia orgánica en ausencia de aire por la acción de un grupo de microorganismos que interactúan con otros factores.

El biogás es la fase gaseosa; mezcla de metano, dióxido de carbono, nitrógeno, gas sulfuroso y vapor de agua.

El contenido de gases combustibles lo hacen muy útil como recurso energético en una granja. El metano es un combustible inodoro, incoloro, cuya combustión produce una llama azul y productos no contaminantes, es el principal contribuyente del gas natural, ya que más del 90% de este combustible es metano. (Moreira, 2013)

1.5.1. Composición y características del biogás

Se llama biogás a la mezcla constituida por metano en una proporción que oscila entre un 50% a un 70% y dióxido de carbono conteniendo pequeñas proporciones de otros gases

como hidrógeno, nitrógeno y sulfuro de hidrógeno. Sus características han sido resumidas en la Tabla I-2.

Tabla I-2: Composición y características del biogás

Características	Descripción
Composición	50 – 70 % metano (CH ₄) 25 – 40 % dióxido de carbono (CO ₂) Trazas de otros gases
Densidad	1.2 kg/m ³
Equivalente de Combustible	0,60 – 0,65 l petróleo/m ³ biogás
Límite de explosión	6 – 12 % biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 – 750 °C
Presión crítica	74 – 88 atm.
Temperatura crítica	-82 °C
Olor	Huevo podrido (el olor a biogás desulfurado es imperceptible)

Fuente: (Hilbert, 2010)

1.5.2. Usos del biogás.

El biogás producido en procesos de digestión anaerobia puede tener diferentes usos:

- ✚ En una caldera para generación de calor o electricidad.
- ✚ En motores o turbinas para generar electricidad.
- ✚ En pilas de combustible, previa realización de una limpieza de ácido sulfhídrico y otros contaminantes de las membranas.
- ✚ Purificarlo y añadir los aditivos necesarios para introducirlo en una red de transporte de gas natural.
- ✚ Uso como material base para la síntesis de productos de elevado valor añadido como es el metanol o el gas natural licuado.

Combustible de automoción.

El biogás, además de metano tiene otra serie de compuestos que se comportan como impurezas: agua, sulfuro de hidrógeno, monóxido de carbono y compuestos orgánicos volátiles como hidrocarburos halogenados, entre otros. Por tanto, es necesaria la limpieza del combustible, dependiendo del uso final. Una aplicación tipo de la digestión anaerobia es en las granjas de ganado bovino y porcino de gran tamaño o como planta comarcal de gestión de residuos en zonas de alta concentración de ganado estabulado, por el gran problema que generan los purines. En este caso se puede proponer y proyectar una planta de digestión anaerobia de producción de biogás como auto abastecimiento energético según las necesidades. (Moreira, 2013)

1.6. Biol.

El Biol es un abono orgánico líquido que se origina a partir de la descomposición de materiales orgánicos, como estiércoles de animales, plantas verdes, frutos, entre nosotros, e ausencia de oxígeno. Es una especie de vida (bio), muy fértil (fertilizante), rentables ecológicamente y económicamente. Contiene nutrientes que son asimilados fácilmente, por las plantas haciéndolas más vigorosas y resistentes. La técnica empleada para obtener biol es a través de biodigestores.

“El Biol es el resultado de la fermentación de estiércol y agua a través de la descomposición y transformaciones químicas de residuos orgánicos en un ambiente anaerobio” (Sistema Biobolsa, 2010)

Tras salir del biodigestor, este material ya no huele y no atrae insectos una vez utilizado en los suelos. El biol como abono es una fuente de fitoreguladores que ayudan a las plantas a tener un óptimo desarrollo, generando mayor productividad a los cultivos. Es un mejorador de la disponibilidad de nutrientes del suelo, aumenta su disponibilidad hídrica, y crea un micro clima adecuado para las plantas. Debido a su contenido de fitoreguladores promueve actividades fisiológicas y estimula el desarrollo de las plantas, favorece su enraizamiento, alarga la fase de crecimiento de hojas (quienes serán las encargadas de la fotosíntesis), mejora la floración, activa el vigor y poder germinativo de las semillas. Todos estos factores

resultaran en mayor productividad de los cultivos y generación de material vegetal. (Sistema Biobolsa, 2010)

La Tabla I-3 presenta las características y la composición del biol, obtenidos del estiércol de ganado bobino y porcino. Donde C.E. es la conductividad eléctrica expresada en milisiemens sobre centímetros.

Tabla I-3: Características y composición del biol

Muestra	pH	C. E. (mS/cm)	Densidad (g/cm³)	N t (%)	P₂O₅ (%)	ST (%)
Ganado Bovino	6,91	6,7	1	0,25	0,17	2,86
Ganado Porcino	7,29	10,3	0,97	0,41	0,05	0,48

Fuente: (Sistema Biobolsa, 2010)

1.7. Biodigestor.

1.7.1. Tipos de biodigestores.

Los biodigestores se pueden clasificar de diversas formas, pero la importancia radica en la frecuencia de cargado, ya que esta determina la cantidad de sustrato o biomasa que entrará en el proceso de digestión anaerobia. Es así que tenemos la siguiente clasificación.

1.7.1.1. Biodigestores continuos.

Son aquellos biodigestores que una vez realizado carga del sustrato, se puede meter o sacar el material, sin que afecte la producción de biogás, sin embargo es recomendable hacer una limpieza en intervalos de tiempo definidos, donde se vaciará y volverá a cargar nuevamente con el sustrato para iniciar con el proceso. (Echeverria y Carrasco, 2018)

1.7.1.2. Biodigestores semi-continuos.

Son aquellos en los que se cargan una porción de biomasa por intervalo de tiempo definido, en estos biodigestores se mantiene el volumen constante de sustrato en el interior. Una limitante importante es la disponibilidad para el contenido de agua, debido a que el sustrato que ingresará al proceso de biodigestión debe componerse de una relación 1:4, es decir una parte del material orgánico y cuatro partes de agua. (Echeverria y Carrasco, 2018)

1.7.2. Características de un biodigestor para que opere correctamente,

- ✚ Evitar la entrada de aire, cerrándolo herméticamente y así evitar también fugas del Biogás producido.
- ✚ Evitar cambios bruscos de temperaturas aislándolos térmicamente.
- ✚ Deberá contener una válvula de control del biogás generado.
- ✚ Deberá contar con medios para efectuar la carga y la descarga del sistema.
- ✚ Fácil acceso para limpiar la cámara de biodigestión, como también para hacer un mantenimiento adecuado.

1.8. Compost.

Se puede definir al compost como una mezcla de materia orgánica en descomposición, que se usa para mejorar la estructura del suelo y proporcionar nutrientes.

El proceso para la obtención se denomina compostaje, este proceso de muchas formas. El presente proyecto pretende obtener el compost como un subproducto de la generación del biogás por la descomposición de la materia orgánica anaeróbica. Dando como resultado un compost libre de olores y de patógenos.

1.9. Factores a tomar en cuenta para la producción de biogás.

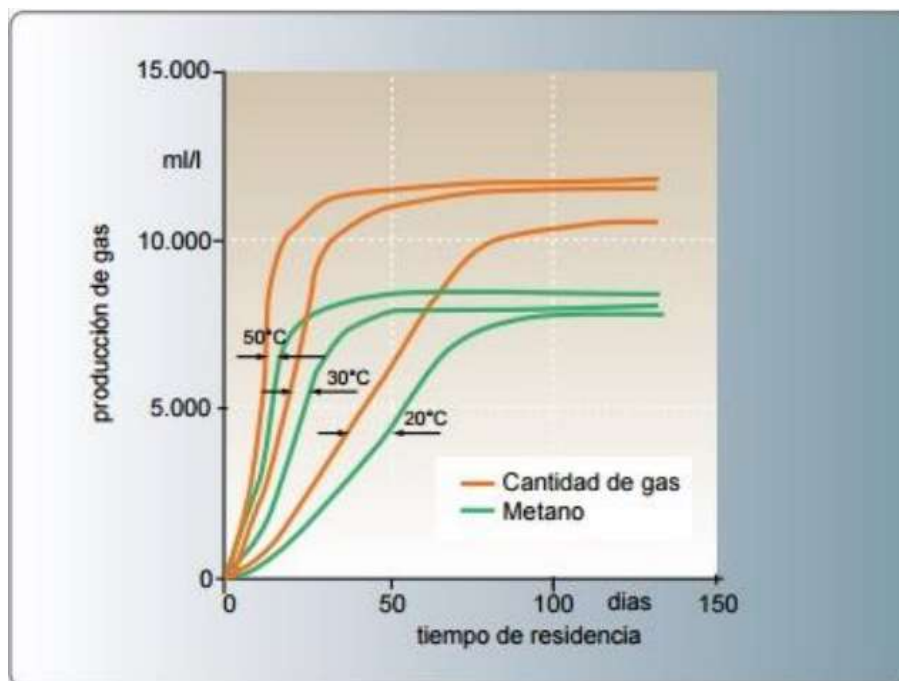
1.9.1. Temperatura.

Los procesos anaeróbicos, al igual que muchos otros sistemas biológicos, son fuertemente dependientes de la temperatura. La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados que a su vez, dependen de la temperatura. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogás. **(Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2011)**

La temperatura de operación del digestor, es considerada uno de los principales parámetros de diseño, debido a la gran influencia de este factor en la velocidad de digestión anaeróbica.

En la Figura I-2 se observa la variación de la temperatura en el interior del biodigestor con respecto a la cantidad de biogás generado.

Figura I-2: Variación de temperatura en el interior de un biodigestor con respecto a la cantidad de biogás generado



Fuente: (Ortiz, 2017)

Existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaeróbicos: psicrófilos (por debajo de 25°C), mesófilos (entre 25 y 45°C) y termófilos (entre 45 y 65°C). Dentro de cada rango de temperatura, existe un intervalo para el cual dicho parámetro se hace máximo, determinando así la temperatura de trabajo óptima en cada uno de los rangos posibles de operación. (Ver Tabla I-4).

Tabla I-4: Rangos de Temperatura y Tiempo de fermentación Anaeróbica

Fermentación	Mínimo	Optimo	Máximo	T. de fermentación
Psycrophilica	4 – 10 °C	15 – 18 °C	20 – 25 °C	Sobre 100 días
Mesophilica	15 – 20 °C	25– 35 °C	35 – 45 °C	20 – 60 días
Thermophilica	25 – 45 °C	50 – 60 °C	75 – 80 °C	10 – 15 días

Fuente: (Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2011)

Hasta el momento, el rango psicrófilico ha sido poco estudiado y, en general, se plantea como poco viable debido al gran tamaño del reactor necesario. Sin embargo, presenta menores problemas de estabilidad que en los otros rangos de temperatura de operación.

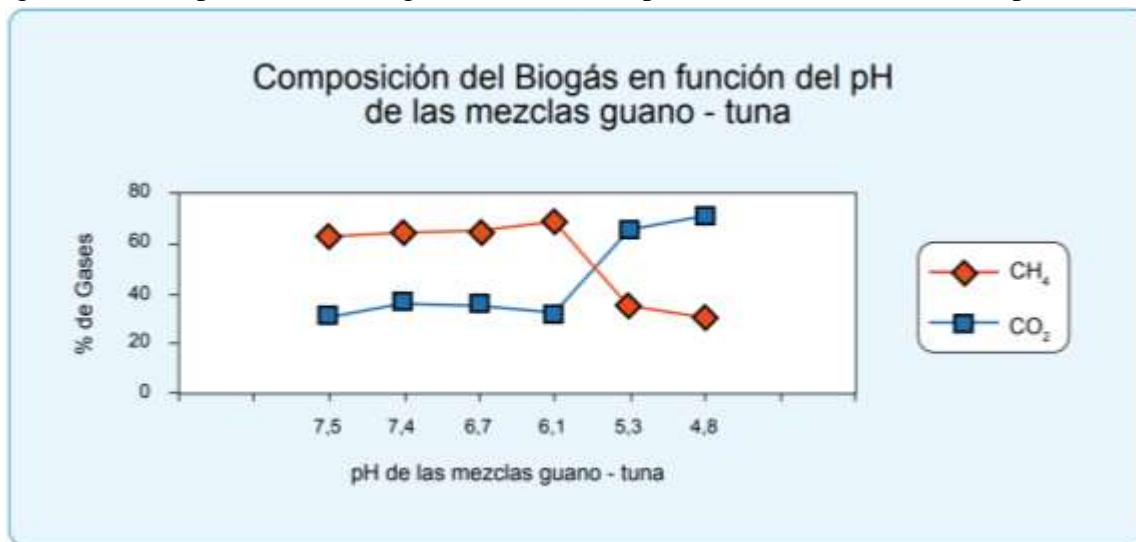
1.9.2. pH y alcalinidad.

El proceso anaeróbico es afectado adversamente con pequeños cambios en los niveles de pH (que se encuentran fuera del rango óptimo). Los microorganismos metanogénicos son más susceptibles a las variaciones de pH que los otros microorganismos de la comunidad microbiana anaeróbica. El pH óptimo para cultivos mixtos se encuentra en el rango entre 6.8 y 8.5, siendo el pH neutro el ideal. (Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2011).

Para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe bajar de 6.0 ni subir de 8.5. El valor del pH en el digestor no sólo determina la producción de biogás sino también su composición. Una de las consecuencias de que se produzca un descenso del pH a valores inferiores a 6 es que el biogás generado es muy pobre en metano y, por tanto, tiene menores cualidades energéticas.

En la Figura I-3 se observa como varia la composición de biogás respecto al pH de la biomasa (en este caso; guano – tuna).

Figura I-3: Composición del biogás en función del pH de la mezcla de materias primas.



Fuente: (Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2011)

Los valores de pH bajos reducen la actividad de los microorganismos metanogénicos, provocando la acumulación de ácido acético e hidrogeno. Al aumentar la presión parcial del hidrogeno, las bacterias que degradan el ácido propiónico serán severamente inhibidas, causando una excesiva acumulación de ácidos grasos volátiles de alto peso molecular,

particularmente ácidos propiónico y butírico, los cual disminuirá la producción de ácido acético, generando una disminución del pH. Si la situación no se corrige, el proceso eventualmente fallará.

1.9.3. Tiempo de retención.

Con este término se designa al tiempo que permanecerá el sustrato orgánico cargado al biodigestor. El sustrato orgánico y el tiempo de retención tienen un tipo de relación inversa, dado que a medida que se incrementa la carga volumétrica disminuye el tiempo de retención. El tiempo de retención, junto con la velocidad de carga orgánica determinada por el tipo de sustrato, son los principales parámetros de diseño, definiendo el volumen del digestor. La materia orgánica o sólidos volátiles (SV) se refiere a la parte de la materia seca (MS) o sólidos totales (ST), que se volatilizan durante la incineración a temperaturas superiores a 550°C. Los residuales de animales pueden tener un contenido de MS mayor del 10 % de la mezcla agua estiércol. (Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2011)

Las bacterias requieren de un cierto tiempo para degradar la materia orgánica. La velocidad de degradación depende en gran parte de la temperatura; mientras mayor sea la temperatura, menor es el tiempo de retención o fermentación para obtener una buena producción de biogás.

En la Tabla I-5 se presenta el tiempo de retención que se recomienda para la obtención de biogás de acuerdo a las características de distintos climas.

Tabla I-5: Tiempo de retención hidráulico de estiércol de ganado en distintas regiones

Tiempo de retención hidráulico	Características
25 – 40 días	Clima tropical con regiones planas. Ej. Indonesia, Venezuela, América Central.
40 – 60 días	Regiones cálidas con inviernos fríos cortos. Ej. India, Filipinas, Etiopía.
60 – 90 días	Clima temperado con inviernos fríos. Ej. China, Corea, Turquía.

Fuente: (Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2011)

CAPITULO II
PARTE EXPERIMENTAL

2.1. Metodología de la parte experimental.

El presente proyecto usara la metodología cuantitativa, donde a través de la parte experimental realizaremos una serie de combinaciones de insumos para obtener el nuevo producto, que se llevara a un análisis de laboratorio para determinar sus características.

Para llevar a cabo el proyecto se hará la construcción de un biodigestor anaeróbico semi-continuo a escala laboratorio.

2.1.1. Selección del proceso.

Existe solo un proceso para la obtención del biogás, que es el proceso de digestión anaeróbica, sin embargo, existen muchas materias primas de las cuales se puede generar biogás. Para el presente proyecto se hará el estudio para las materias primas; **estiércol ovino, residuos sólidos urbanos, estiércol vacuno/tuna y estiércol vacuno/residuos sólidos vegetales.**

Una vez definidas las materias primas a ser evaluadas, es importante definir los factores más importantes que se pueda considerar a la hora de realizar la parte experimental. (Ver Tabla II-1).

Tabla II-1 Descripción de factores

FACTOR	DESCRIPCION
1	Acceso a la materia prima
2	Estudios realizados
3	Producción de biogás
4	Composición de metano
5	Requerimientos (costos)
6	Tratamiento de residuos
7	Preferencia personal

Fuente: Elaboración propia, 2021.

A continuación se procede a evaluar la importancia de los factores con una matriz de enfrentamientos, donde se enfrenta todos los factores entre sí, y en caso de tener incidencia

entre factores se califica con 1, y en caso de no tener ninguna incidencia con 0. Se suma el total y se saca el valor ponderado de cada factor. (Ver Tabla II-2).

Tabla II-2 Matriz de enfrentamiento

FACTOR	1	2	3	4	5	6	7	TOTAL	PESO PONDERADO (%)
1	-	0	1	1	1	1	1	5	25 %
2	1	-	1	1	0	1	0	4	20 %
3	1	1	-	1	0	0	0	3	15 %
4	1	1	1	-	0	0	0	3	15 %
5	1	0	0	1	-	0	0	2	10 %
6	0	1	0	0	1	-	0	2	10 %
7	0	0	0	0	1	0	-	1	5 %
TOTAL								20	100 %

Fuente: Elaboración propia, 2021.

En la Tabla II-3 se presenta la escala de puntuación para poder hacer la evaluación.

Tabla II-3: Escala de calificación por puntuación del 1 al 10

Escala de puntuación	Puntuación
Excelente	9 - 10
Muy buena	7 - 8
Buena	5 - 6
Regular	3 - 4
Mala	1 - 2

Fuente: (Normas Sobre Evaluación y Calificación, Programa de Magister)

Finalmente en la Tabla II-4 se hace la evaluación y la materia prima con una mayor puntuación será la seleccionada para el proceso.

Tabla II-4: Evaluación de alternativas de materia prima para la producción de biogás

FACTOR	PESO ASIGNADO (%)	Estiércol Ovino		Residuos Sólidos Urbanos		Estiércol Vacuno/Tuna		Estiércol Vacuno/Residuos Sólidos Vegetales	
		Calificación	Valor ponderado	Calificación	Valor ponderado	Calificación	Valor ponderado	Calificación	Valor ponderado
Acceso a la materia prima	25	7	1,75	8	2	8	2	10	2,5
Estudios realizados	20	6	1,2	9	1,8	7	1,4	8	1,6
Producción de biogás	15	7	1,05	7	1,05	8	1,2	7	1,05
Composición de metano	15	7	1,05	6	0,9	7	1,05	7	1,05
Requerimientos (costos)	10	6	0,6	7	0,7	8	0,8	7	0,7
Tratamiento de residuos	10	7	0,7	8	0,8	9	0,9	8	0,8
Preferencia personal	5	7	0,35	9	0,45	6	0,3	7	0,35
TOTAL	100	47	6,7	54	7,7	53	7,65	54	8,05

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Según la evaluación realizada de las alternativas de materia prima para la producción de biogás, la mejor alternativa es: Estiércol Vacuno / Residuos Sólidos Vegetales. Esta será la materia prima principal para la producción de biogás del presente proyecto.

La parte experimental del presente trabajo “Obtención de Biogás a partir de Residuos Sólidos Vegetales y Estiércol Vacuno a Escala Laboratorio en el Departamento de Tarija” se realizó en la Barrio San Mateo de Tarija.

2.2. Construcción del biodigestor.

Para la obtención de biogás por el proceso de digestión anaeróbica es imprescindible contar con un biodigestor, en tal sentido, se hizo la construcción del biodigestor, es muy importante aclarar que el presente trabajo no pretende hacer énfasis en el diseño de un biodigestor, puesto que el objetivo principal es la obtención del biogás, es por ello que para la construcción del mismo se tomó criterios básicos para el correcto funcionamiento de un biodigestor semi continuo a escala laboratorio.

Criterios tomados en cuenta para construcción del biodigestor.

A. Volumen del biodigestor.

Según (Moreira, 2013), el volumen del biodigestor está en función al volumen de sustrato (volumen depositado en el interior del biodigestor), considerando que el biodigestor tiene que tener un volumen libre para la formación del biogás. Este tiene que ser el 30% del volumen total de materia prima como máximo y del 10% como mínimo.

B. Material del biodigestor.

El material que se usa normalmente para la construcción de biodigestores son de polímeros (plásticos), es en tal sentido, que el presente trabajo “saliendo” de lo común seleccionó como material a usar para construcción del biodigestor, el acero inoxidable, ya que tiene una conductividad térmica muy elevada, y de esta forma aportar con estudios de obtención de biogás en un biodigestor de acero inoxidable.

2.2.1. Materiales usados.

Se detallan los materiales utilizados para la construcción del biodigestor.

2.2.1.3. Olla a presión.

Se utilizó una olla a presión como el cuerpo principal del biodigestor (Ver Figura II-1). El material tiene las siguientes especificaciones técnicas:

Marca:	ROMANIA
Material:	Acero inoxidable 18/10 de serie AISI 304
Capacidad:	2.000 ml
Industria:	Alemana
Dimensiones:	

Figura II-1: Olla a presión



Fuente: Elaboración propia, 2021.

2.2.1.4. Termómetro digital.

Se utilizó un termómetro digital, que sirvió para controlar la temperatura del sustrato dentro del biodigestor (Ver Figura II-2). El material tiene las siguientes especificaciones técnicas:

Marca:	Winco
Material:	Talco de acero inoxidable
Talco:	12 cm de largo
Rango de temperatura:	-45 a 150°C
Error de precisión:	+/- 1°C
Industria:	U.S.A.

Figura II-2: Termómetro digital



Fuente: Mercado libre Argentina, 2021.

2.2.1.5. Manómetro.

Se utilizó un manómetro para hacer la prueba de hermeticidad del biodigestor (Ver Figura II-3). El material tiene las siguientes especificaciones técnicas:

Marca:	SKU: DT302-SP
Rango de temperatura:	0 a 6 Bar
Industria:	U.S.A.

Figura II-3: Manómetro



Fuente: Elaboración propia, 2021.

2.2.1.6. Equipo para suero.

Se utilizó el equipo para suero para transportar el biogás formado en el biodigestor a una probeta recolector de biogás. (Ver Figura II-4)

Figura II-4: Equipo para suero



Fuente: Elaboración propia, 2021.

2.2.3. Ensamblado del biodigestor.

Conseguidos los materiales requeridos, se llevaron los mismos a una tornería - metalúrgica para el ensamblado hermético (Ver Figura II-5). Se hizo la prueba de hermeticidad con aire comprimido.

Figura II-5: Biodigestor



Fuente: Elaboración propia, 2021.

2.3. Materiales de laboratorio.

En la realización de la parte experimental se utilizaron los siguientes materiales. (Ver Tabla II-5)

Tabla II-5: Tabla de materiales.

Material	Tipo	Capacidad/Tamaño	Cantidad
Vaso de precipitado	Plástico	500 ml	1
Probeta	Plástico	250ml	1
Recipiente	Plástico	3000 ml	1
Espátula	Metálica	Pequeña	1
Soporte de Probeta	Metálica	Mediana	1

Fuente: Elaboración propia, 2021.

2.4. Diseño factorial.

En el diseño factorial se realizan todas las combinaciones posibles de los niveles de varios factores que intervienen en el experimento.

Los diseños factoriales más sencillos son los diseños 2^k , k corresponde al número de factores que intervienen en el proceso, con dos niveles cada uno y requieren de 2^k experimentos. Cada factor se estudia a dos niveles: nivel o valor alto (+) y nivel o valor bajo (-).

Los experimentos a realizarse incluyen todas las combinaciones de cada nivel de un factor con todos los niveles de los otros factores.

k = número de factores; número de columnas

(+) = nivel o valor alto

(-) = nivel o valor bajo

2^k = número de experimentos; número de filas

Existen varios factores que pueden afectar en mayor o menor proporción al proceso de obtención de biogás, entre ellos se encuentran: relación del estiércol vacuno con los residuos sólidos vegetales, tiempo de retención. Estos factores pueden condicionar las variables de respuesta como lo es el volumen obtenido.

2.4.1. Construcción del diseño factorial 2^k

Los factores escogidos y el dominio experimental se muestran a continuación.

Tabla II-6: Niveles y factores que intervienen.

Factores	Dominio experimental	
	Nivel (-)	Nivel (+)
A: Relación EV - RSV	1 - 0,3	1 - 0,6
B: Tiempo de retención (días)	19	22
Respuesta: Volumen (ml)	Volumen (ml)	

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Donde:

A: Relación EV – RSV, es la relación entre el estiércol vacuno y los residuos sólidos vegetales.

B: Tiempo de retención, es el tiempo de biodigestión de la biomasa alimentada.

Respuesta: Volumen, es el volumen de biogás recolectado, expresado en mililitros.

Para conocer los efectos de un factor es suficiente hacerlo variar entre los extremos de su dominio experimental: entre el nivel -1 y +1. Y además de su variación se debe realizar para cada posible combinación de los valores de los demás factores. Esto permitirá descubrir si el efecto depende de qué valor tomen los otros factores.

Todas estas combinaciones están contempladas en el diseño factorial completo 2^2 . En total 4 experimentos correspondientes a 2 niveles de la relación EV – RSV x 2 niveles del tiempo de retención. Además se hará dos replicas para cada experimento, haciendo un total de 8 experimentos. (Ver Tabla II-7)

Tabla II-7: Matriz de experimentos.

Nº	Matriz de experimentos		Plan de experimentación			
	A	B	Relación EV - RSV	Tiempo de retención (días)	Replica 1	Replica 2
1	-1	-1	1 – 0,3	19	y ₁	y ₅
2	+1	-1	1 – 0,6	19	y ₂	y ₆
3	-1	+1	1 – 0,3	22	y ₃	y ₇
4	+1	+1	1 – 0,6	22	y ₄	y ₈

Fuente: Elaboración propia, 2021.

El modelo de regresión

Para el experimento del proceso químico de 2², el modelo de regresión es:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon$$

Donde:

y: Modelo de regresión

X₁: Variable codificada que representa la relación EV – RSV (estiércol vacuno – residuos sólidos vegetales)

X₂: Variable codificada que representa el tiempo de retención

β: Coeficientes de regresión

ε: Error

Los coeficientes de regresión, nos lo brindara el análisis estadístico hecho en el programa de SPSS.

Para la estimación de efectos se puede aplicar las siguientes formulas:

Para el efecto A.

$$A = \frac{1}{2n} \{[a + ab] - [(1) + b]\}$$

Para el efecto B

$$B = \frac{1}{2n} \{[b + ab] - [(1) + a]\}$$

Para la interacción A*B

$$A * B = \frac{1}{2n} \{[(1) + ab] - [a + b]\}$$

Donde:

n: Numero de replicas

(1): Resultado del primer tratamiento

a: Resultado del segundo tratamiento

b: Resultado del tercer tratamiento

ab: Resultado del cuarto tratamiento

Estas fórmulas permiten saber si el efecto es significativo o es irrelevante.

Para la suma de cuadrados es muy importante, pues ayuda a estimar el análisis de varianza, se puede aplicar las siguientes formulas.

Suma de cuadrados para A.

$$SS_A = \frac{\{[a + ab] - [(1) + b]\}^2}{4n}$$

Suma de cuadrados para B.

$$SS_B = \frac{\{[b + ab] - [(1) + a]\}^2}{4n}$$

Suma de cuadrados para la interacción A*B.

$$SS_{AB} = \frac{\{[(1) + ab] - [a + b]\}^2}{4n}$$

Donde:

SS: Suma de cuadrados

n: Numero de replicas

(1): Resultado del primer tratamiento

a: Resultado del segundo tratamiento

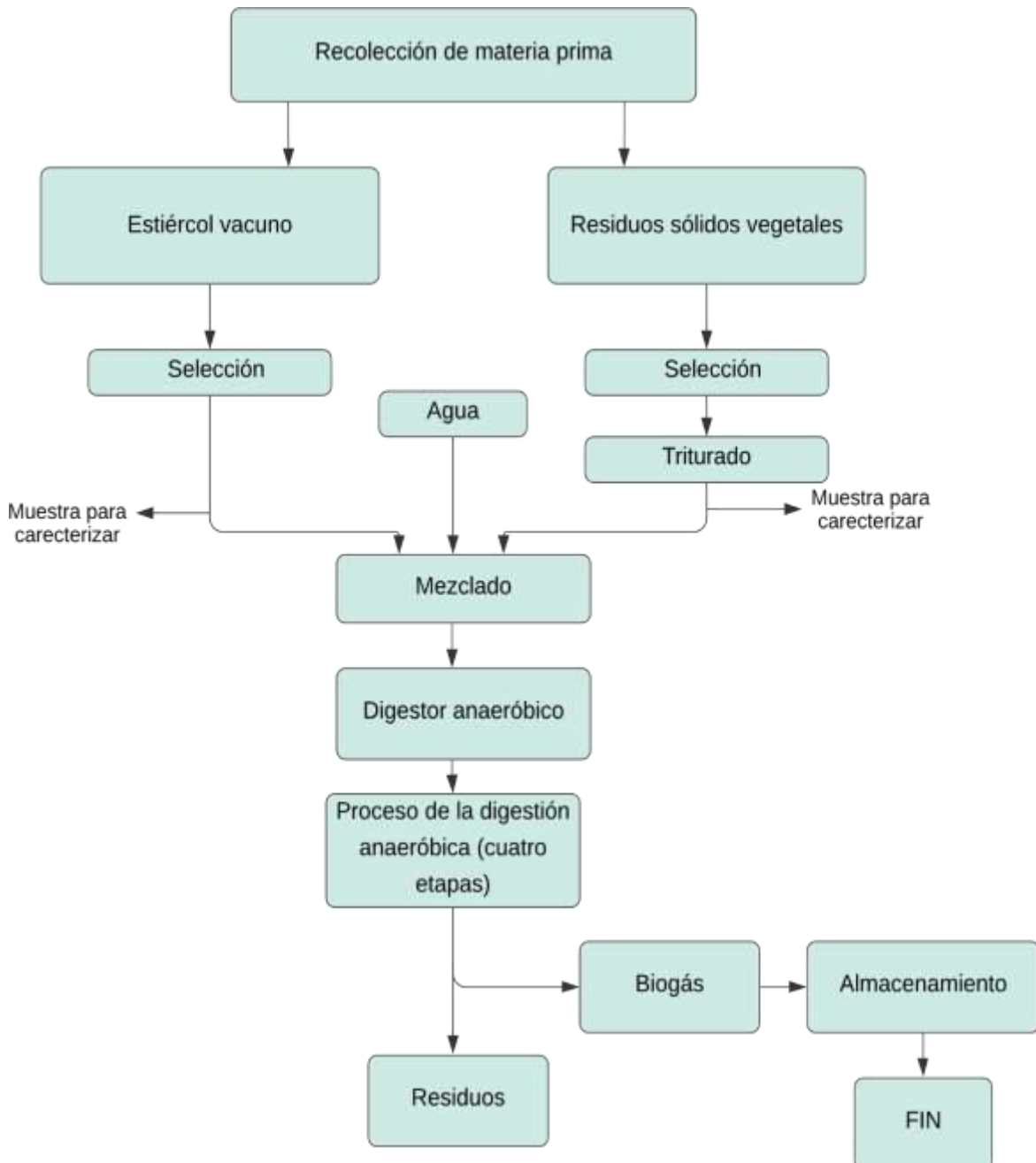
b: Resultado del tercer tratamiento

ab: Resultado del cuarto tratamiento

2.5. Descripción del proceso de obtención de biogás a partir de residuos sólidos vegetales y estiércol de vaca a escala laboratorio.

Identificado el proceso de digestión anaeróbica y definida la materia prima, a continuación se describe un esquema del proceso. (Ver Figura II-6).

Figura II-6: Esquema del proceso de obtención de biogás a partir de residuos sólidos vegetales y estiércol vacuno



Fuente: Elaboración propia, 2021.

La descripción del proceso por etapas, es descrita a continuación:

2.5.1. Recolección de la materia prima

a) Residuos sólidos vegetales

Se realizó la recolección de los residuos sólidos vegetales del domicilio personal del autor, ubicado en el Barrio San Mateo Sud, de la provincia Cercado, Tarija. (Ver Figura II-7).

Con ubicación geográfica de:

Sur: $21^{\circ}29'19.3''$

Oeste: $64^{\circ}45'04.5''$

Figura II-7: Ubicación de la zona de recolección de los residuos sólidos vegetales.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

b) Estiércol vacuno

Se realizó la recolección del estiércol vacuno de una granja de vacas, ubicado en el Barrio San Mateo Sud, de la provincia Cercado, Tarija. (Ver Figura II-8).

Con ubicación geográfica de:

Sur: $21^{\circ}29'27.9''$

Oeste: $64^{\circ}45'14.2''$

Figura II-8: Ubicación de la zona de recolección del estiércol vacuno.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

2.5.2. Selección de la materia prima.

a) Residuos sólidos vegetales

Se descartó los vegetales cítricos como ser cáscara de naranja y residuos de limón, ya que estos pueden alterar considerablemente la digestión anaeróbica (Ver Figura II-9), porque como menciona el (Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2011) “El pH óptimo para cultivos mixtos se encuentra en el rango entre 6.8 y 8.5, siendo el pH neutro el ideal”

Figura II-9: Residuos sólidos vegetales seleccionados.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

b) Estiércol vacuno

De manera continua se realizó la selección del estiércol vacuno, realizando manualmente el buscado de impurezas como ser: piedras y metales, ya que estos pueden alterar considerablemente la digestión anaeróbica. (Ver Figura II-10)

Figura II-10: Selección del estiércol vacuno.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

2.5.3. Pesado y triturado de los residuos sólidos vegetales.

Se realizó el pesado de los residuos sólidos vegetales. (Ver Figura II-11).

Figura II-11: Pesado de los residuos sólidos vegetales.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Y se procedió a triturar en una licuadora. (Ver Figura II-12)

Figura II-12: Triturado de los residuos sólidos vegetales.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Posterior a la trituración se volvió a pesar, para el balance de materia.

2.5.4. Mezclado.

Se mezcló el estiércol vacuno con los residuos sólidos vegetales y con agua. La relación EV – RSV fue de 1:0.3; 1:0.4, 1:0.5 y 1:0.6, y el resultado de estas (en masa) se mezcló con el doble de agua.

En tabla II-8 se resume las cantidades en masa que se usaron para los cuatro experimentos.

Tabla II-8: Resumen de las cantidades en masa que se usaron para los cuatro experimentos.

Nº	Masa EV (g)	Masa RSV (g)	Masa H ₂ O (g)	Total (g)
1	400	120	1.040	1.560
2	400	240	1.280	1.920
3	400	120	1.040	1.560
4	400	240	1.280	1.920

Fuente: Elaboración propia, 2021.

En la Figura II-13 se observa como se llevó a cabo el pesando del estiércol vacuno.

Figura II-13: Pesado del estiércol vacuno.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Y finalmente se realizó el mezclado de los residuos sólidos vegetales, estiércol vacuno y el agua. (Ver Figura II-14)

Figura II-14: Mezclado de los RSV, EV y agua.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

2.5.5. Biodigestor.

Una vez que la mezcla lista se llevó una muestra de ella para el análisis del pH. El pH obtenido de estos análisis está entre el rango permitido (6,5 a 8,5). Por lo cual se procedió al llenado en el biodigestor.

Se procedió a sellarlo herméticamente y esperar que los microorganismos de las cuatro etapas de la digestión anaeróbica hagan su trabajo. Se controló la temperatura de la mezcla en el biodigestor, tres veces al día. .

2.5.6. Recolección de biogás.

Para ello se utilizó un recipiente de 5000 ml de capacidad, que se llenó de agua hasta la mitad. Una probeta de 250 ml postrada en un soporte, boca abajo y llena de agua, la cual se introdujo al recipiente, y por desplazamiento, el biogás formado se fue acumulando en la probeta. Se procedió a medir el volumen. (Ver Figura II-15).

Figura II-15: Recolección del biogás formado.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

2.5.7. Recolección de los residuos.

Se abrió el biodigestor y se midió el volumen y se procedió a pesar. (Ver Figura II-16)

Figura II-16: Recolección de los residuos.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

2.6. Balance de materia.

Se realizó el balance de materia del experimento que mayor volumen de biogás (variable respuesta) produjo (807 ml), para el cual se tomó 400 gramos de estiércol de vaca, 240 gramos de residuos sólidos vegetales y 1.280 gramos de agua para obtención de biogás, ya que fue el experimento que obtuvo un mayor volumen (variable respuesta) de biogás con respecto a los demás experimentos.

En la Tabla II-9 se presenta la nomenclatura y simbología que se utilizó para el balance de materia.

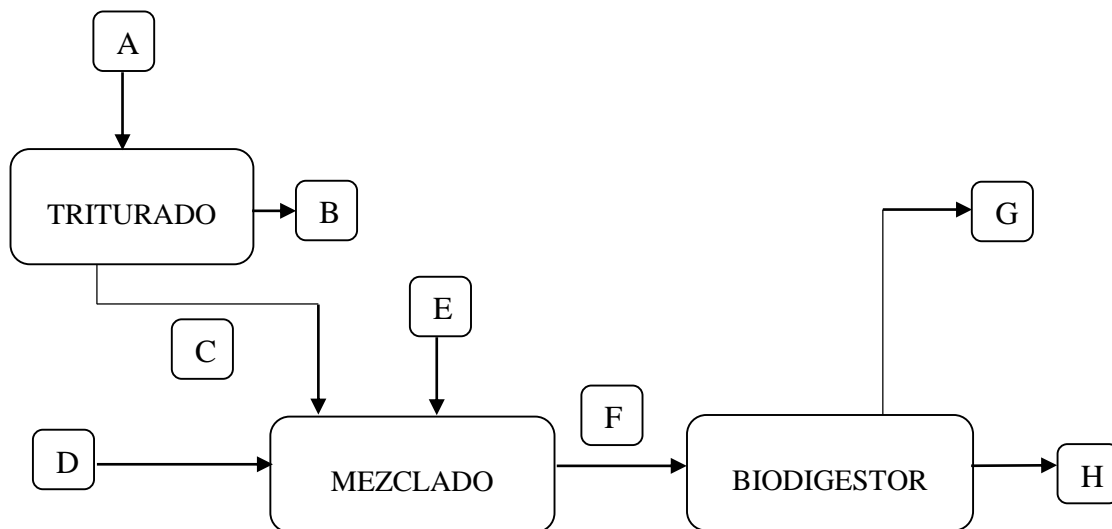
Tabla II-9: Nomenclatura utilizada en el balance de materia

Nomenclatura utilizada	Especiación
A,B,C.....H Corriente másica global	A,B,C.....H = Corriente másica
X_{ZY} Fracción másica de cada componente	X = Fracción másica Z = Corriente a la que corresponde la fracción másica Y = Abreviatura del componente de la corriente, sus significados son: ST: Solidos Totales H ₂ O: Agua SV: Solidos Volátiles MI: Materia Inorgánica
(X_{ZST}) Fracción de la fracción de Solidos Totales	Z = Corriente a la que corresponde la fracción másica ST: Solidos Totales

Fuente: Elaboración propia, 2021.

En la Figura II-17 se puede apreciar el diagrama de bloques del proceso de obtención de biogás a partir de residuos sólidos vegetales y estiércol vacuno.

Figura II-17: Diagrama de bloques del proceso.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Se resume el diagrama de bloques con la Tabla II-10.

Tabla II-10: Resumen del curso de las corrientes.

Entradas	Equipos o etapa	Salidas
A	Triturado	B + C
C + D + E	Mezclado	F
F	Biodigestor	G + H

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Se identifica las especificaciones de las distintas corrientes que interviene en el proceso de obtención de biogás. (Ver Tabla II-11)

Tabla II-11: Corrientes del proceso.

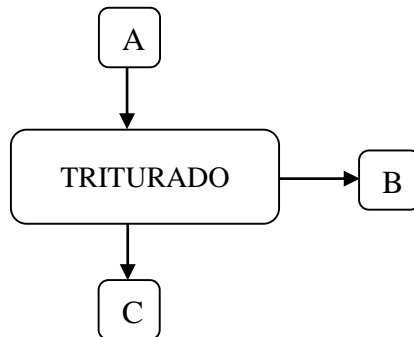
Corriente	Especificación
A	Residuos sólidos vegetales
B	Perdida por triturado
C	Residuos sólidos vegetales triturados
D	Estiércol vacuno
E	Agua
F	Alimentación
G	Biogas
H	Residuos

Fuente: Elaboración Propia, 2021.

A continuación se presenta el cálculo detallado del balance de materia para la obtención de biogás a partir de residuos sólidos vegetales y estiércol vacuno a escala laboratorio, por etapas.

Triturado

Se trituro 240 gramos de residuos sólidos vegetales.



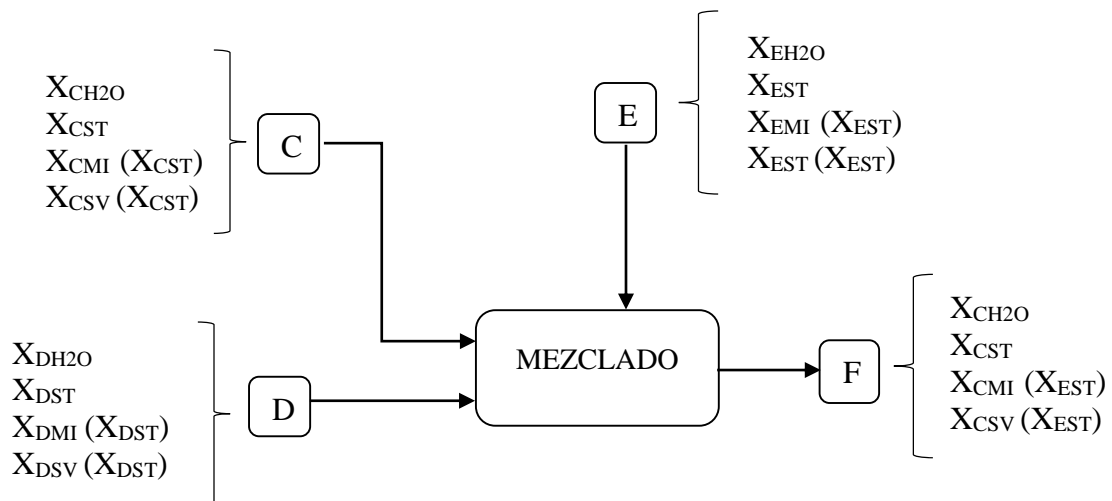
Donde:

A: Masa de residuos sólidos vegetales = 240 g

B: Masa de pérdida por triturado = 3,10 g

C: Masa de residuos sólidos vegetales triturados = 236,9 g

Mezclado



Donde:

D: Masa de estiércol vacuno = 400 g

C: Masa de residuos sólidos vegetales = 236,9 g

E: Masa de agua = 1.280 g

F: Masa de alimentación

Balance global del bloque:

$$C + D + E = F \quad \text{Ec. II - 1}$$

$$F = 400 + 236,9 + 1.280 = 1.916,9 \text{ g}$$

Cálculos para la corriente C

Según datos obtenidos en los análisis realizados en el CEANID.

Tabla II-12: Valores de parámetros para la corriente C

Parámetro	Valor	Unidad
Humedad	88,60	%
Cenizas	0,88	%

Fuente: CEANID, 2021.

$$X_{CH_2O} = \frac{88,60\%}{100\%}$$

$$X_{CH_2O} = 0,886$$

Para la fracción de sólidos totales (ST), lo hacemos a través del porcentaje de humedad, con la siguiente expresión:

$$\% \text{ Sólidos totales} = 100\% - \% \text{ Humedad} \quad \text{Ec. II - 2}$$

$$\% \text{ Sólidos totales} = 100\% - 88,60\%$$

$$\% \text{ Sólidos totales} = 11,4\%$$

Entonces:

$$X_{CST} = \frac{11,4\%}{100\%}$$

$$\mathbf{X_{CST} = 0,114}$$

Para la fracción de materia inorgánica (MI) que esta fracción de los sólidos totales, lo hacemos a través del porcentaje de cenizas, primero llevamos que porcentaje de materia inorgánica tiene 0,88% en 11,4%, que es el porcentaje de sólidos totales.

$$\frac{0,88\%}{100\%} = 0,0088$$

$$\frac{11,4\%}{100\%} = 0,114$$

$$\%MI = \frac{0,0088}{0,114} * 100 = 7,71\%$$

Entonces:

$$X_{CMI} = \frac{7,71\%}{100\%}$$

$$\mathbf{X_{CMI} = 0,0771 (X_{CST})}$$

Para la fracción de sólidos volátiles podemos emplear la fórmula:

$$X_{CMI} + X_{CSV} = 1 \quad \mathbf{Ec. II - 3}$$

$$X_{CSV} = 1 - X_{CMI}$$

Entonces:

$$X_{CSV} = 1 - 0,0771$$

$$\mathbf{X_{CSV} = 0,9229 (X_{CST})}$$

Cálculos para la corriente D

Según datos obtenidos en los análisis realizados en el CEANID.

Tabla II-13: Valores de parámetros para la corriente D

Parámetro	Valor	Unidad
Humedad	81,52	%
Cenizas	4,11	%

Fuente: CEANID, 2021.

$$X_{DH_2O} = \frac{81,52\%}{100\%}$$

$$X_{DH_2O} = \mathbf{0,8152}$$

Para la fracción de sólidos totales (ST), lo hacemos a través del porcentaje de humedad, con la siguiente expresión:

$$\% \text{ Sólidos totales} = 100\% - \% \text{ Humedad}$$

$$\% \text{ Sólidos totales} = 100\% - 81,52\%$$

$$\% \text{ Sólidos totales} = 18,48\%$$

Entonces:

$$X_{DST} = \frac{18,48\%}{100\%}$$

$$X_{DST} = \mathbf{0,1848}$$

Para la fracción de materia inorgánica (MI) que esta fracción de los sólidos totales, lo hacemos a través del porcentaje de cenizas, primero llevamos que porcentaje de materia inorgánica tiene 4,11% en 18,48%, que es porcentaje de sólidos totales.

$$\frac{4,11\%}{100\%} = 0,0411$$

$$\frac{18,48\%}{100\%} = 0,1848$$

$$\%MI = \frac{0,0411}{0,1848} * 100 = 22,24\%$$

Entonces:

$$X_{DMI} = \frac{22,24\%}{100\%}$$

$$X_{DMI} = 0,2224 (X_{DST})$$

Para la fracción de sólidos volátiles (SV) que pertenece a la fracción de sólidos totales, podemos emplear la fórmula:

$$X_{DMI} + X_{DSV} = 1$$

$$X_{DSV} = 1 - X_{DMI}$$

Entonces:

$$X_{DSV} = 1 - 0,2224$$

$$X_{DSV} = 0,7776(X_{DST})$$

Cálculos para la corriente E

La corriente E representa una corriente de agua, que para el presente trabajo se utilizó agua potable del Barrio San Mateo.

Se utilizaron los datos del Comité de agua “Loma Alta de Tomatitas” (Ver Anexo 4).

Tabla II-14: Valores de algunos parámetros del agua potable utilizados en el proyecto.

Parámetro	Valor
Sólidos totales	870 mg/l
Sólidos Volátiles	250 mg/l

Fuente: Comité de agua “Loma Alta de Tomatitas”

La densidad del agua es de 1 g/ml (Comité de agua “Loma Alta de Tomatitas”), con este dato podemos calcular la fracción de sólidos totales.

1 litro = 1.000 g

870 mg = 0,87 g

$$X_{EST} = \frac{0,87 \text{ g}}{1.000 \text{ g}}$$

$$X_{EST} = \mathbf{0,00087}$$

Para la fracción de agua.

$$X_{EH_2O} = 1 - X_{ST}$$

$$X_{EH_2O} = 1 - 0,00087$$

$$X_{EH_2O} = \mathbf{0,99913}$$

Para la fracción de sólidos volátiles (SV), que pertenece a la fracción de sólidos totales.

La densidad del agua es de 1 g/ml. (Comité de agua “Loma Alta de Tomatitas”)

1 litro = 1.000 g

250 mg = 0,25 g

$$X_{SV} = \frac{0,25 \text{ g}}{1.000 \text{ g}}$$

$$X_{SV} = 0,00025$$

Llevamos a fracción de sólidos totales, con:

$$X_{ESV} = \frac{0,00025}{0,00087}$$

$$X_{ESV} = 0,29 (X_{EST})$$

Para la fracción de materia inorgánica (MI) que pertenece a la fracción de sólidos totales, podemos emplear la fórmula:

$$X_{EMI} + X_{ESV} = 1$$

$$X_{EMI} = 1 - X_{ESV}$$

Entonces:

$$X_{EMI} = 1 - 0,29$$

$$X_{EMI} = 0,71 (X_{EST})$$

Cálculos para la corriente F

Con los datos obtenidos, podemos calcular los datos para la corriente F

Para la fracción de agua:

$$X_{FH2O} = \frac{X_{CH2O} + X_{DH2O} + X_{EH2O}}{3} \quad \text{Ec. II - 4}$$

Remplazando valores y resolviendo la Ec. II-4:

$$X_{FH2O} = \frac{0,886 + 0,8152 + 0,999}{3}$$

$$X_{FH2O} = 0,90$$

Para la fracción de sólidos totales:

$$X_{FST} = \frac{X_{CST} + X_{DST} + X_{EST}}{3} \quad \text{Ec. II - 5}$$

Remplazando valores y resolviendo la Ec. II-5:

$$X_{FST} = \frac{0,114 + 0,1848 + 0,00087}{3}$$

$$\mathbf{X_{FST} = 0,099}$$

Para la fracción de materia inorgánica (MI) que pertenece a la fracción de sólidos totales, podemos emplear la fórmula:

$$X_{FMI} = \frac{X_{CMI} + X_{DMI} + X_{EMI}}{3} \quad \mathbf{Ec. II - 6}$$

Remplazando valores y resolviendo la Ec. II-6:

$$X_{FMI} = \frac{0,0711 + 0,2224 + 0,71}{3}$$

$$\mathbf{X_{FMI} = 0,33 (X_{FST})}$$

Para la fracción de sólidos volátiles (SV) que pertenece a la fracción de sólidos totales, podemos emplear la fórmula:

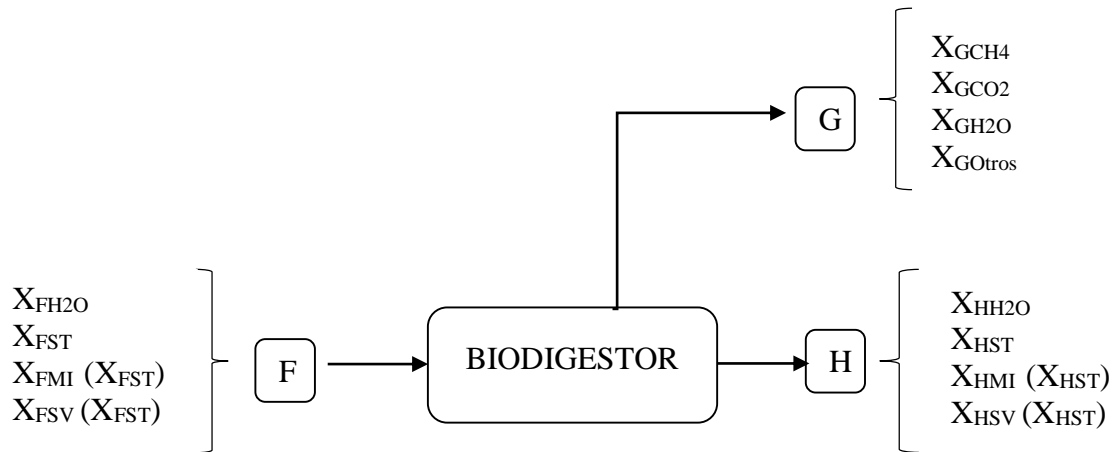
$$X_{FSV} = \frac{X_{CSV} + X_{DSV} + X_{ESV}}{3} \quad \mathbf{Ec. II - 7}$$

Remplazando valores y resolviéndola Ec. II-7:

$$X_{FSV} = \frac{0,9229 + 0,7776 + 0,29}{3}$$

$$\mathbf{X_{FSV} = 0,66 (X_{FST})}$$

Biodigestor



Donde:

F: Masa de Alimentación = 1916,9 g

G: Masa de Biogas = 1,1g

Que se determinó con:

$$M_{biogas} = M_{biodigestor\ final} - M_{biodigestor\ inicial}$$

Donde:

M_{biogas} : masa de biogás

$M_{biodigestor\ final}$: masa del biodigestor al final del proceso = 2296,43 g

$M_{biodigestor\ inicial}$: masa del biodigestor al inicio del proceso = 2295,33 g

$$M_{biogas} = 2296,43\ g - 2295,33\ g$$

$$M_{biogas} = 1,1\ g$$

H: Masa de residuos = 1915,8 g

Se determinó:

$$M_{residuos} = M_{Alimentacion} - M_{biogas}$$

$$M_{residuos} = 1916,9\ g - 1,1\ g = 1915,8\ g$$

Cálculos para la corriente H

Según datos obtenidos en los análisis realizados en el CEANID

Tabla II-15: Valores de parámetros para la corriente H

Parámetro	Valor	Unidad
Humedad	95,90	%
Cenizas	1,18	%

Fuente: CEANID, 2021.

Para la fracción de agua.

$$X_{FH2O} = \frac{95,90\%}{100\%}$$

$$X_{FH2O} = \mathbf{0,9590}$$

Para la fracción de sólidos totales (ST), lo hacemos a través del porcentaje de humedad, con:

$$\% \text{ Sólidos totales} = 100\% - \text{Humedad}$$

$$\% \text{ Sólidos totales} = 100\% - 95,90\%$$

$$\% \text{ Sólidos totales} = 4,1\%$$

Entonces:

$$X_{FST} = \frac{4,1\%}{100\%}$$

$$X_{FST} = \mathbf{0,041}$$

Para la fracción de materia inorgánica (MI) que esta fracción de los sólidos totales, lo hacemos a través del porcentaje de cenizas, primero llevamos que porcentaje de materia inorgánica tiene 1,18 % en 4,1 %, que es porcentaje de sólidos totales.

$$\frac{1,18\%}{100\%} = 0,0118$$

$$\frac{4,1\%}{100\%} = 0,041$$

$$\%MI = \frac{0,0118}{0,041} * 100 = 28,78$$

Entonces:

$$X_{FMI} = \frac{28,78\%}{100\%}$$

$$X_{FMI} = 0,289 (X_{FST})$$

Para la fracción de sólidos volátiles (SV) que pertenece a la fracción de sólidos totales, podemos emplear la fórmula:

$$X_{FMI} + X_{FSV} = 1$$

$$X_{FSV} = 1 - X_{FMI}$$

Entonces:

$$X_{FSV} = 1 - 0,289$$

$$X_{FSV} = 0,711 (X_{DST})$$

Cálculos para la corriente G

Según los análisis realizados.

Tabla II-16: Valores para la corriente G

Parámetro	Valor	Unidad
Metano (CH ₄)	51,2596	%
CO ₂	35,0684	%
Otros	13,6720	%

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Para el metano (CH₄).

$$X_{GCH_4} = \frac{51,2596 \%}{100 \%} = \mathbf{0,513}$$

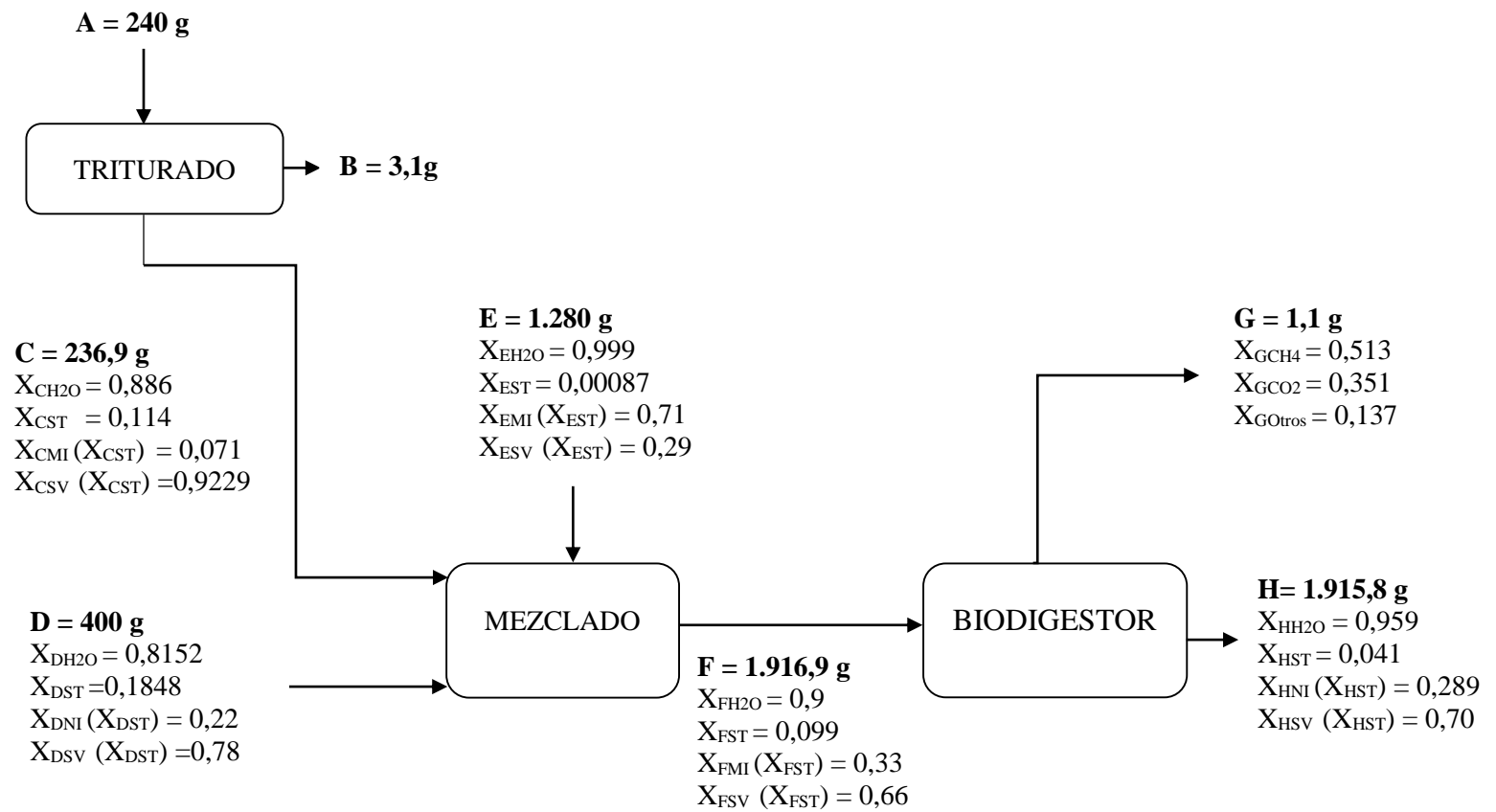
Para el dióxido de carbono (CO₂).

$$X_{GCO_2} = \frac{35,0684\%}{100 \%} = \mathbf{0,351}$$

Para el restante (Otros)

$$X_{Gotros} = \frac{13,6720\%}{100 \%} = \mathbf{0,137}$$

Figura II-18: Balance de materia para la obtención de biogás.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Tabla II-17: Resultados de corrientes en el balance de materia

Balance de Materia		
Corriente	Definición	Gramos (g)
A	Residuos sólidos vegetales	240
B	Perdida por triturado	3,1
C	Residuos sólidos vegetales triturados	236,9
D	Estiércol vacuno	400
E	Agua	1.280
F	Alimentación	1.916,9
G	Biogas	1,1
H	Residuos	1.915,8

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Tabla II-18: Resultado de fracciones en cada corriente del balance de materia

Balance de Materia			
Corriente	Fracciones	Definición	Fracción
C	X_{CH_2O}	Fracción másica de agua	0,886
	X_{CST}	Fracción másica de sólidos totales	0,114
	$X_{CMI} (X_{CST})$	Fracción másica de materia inorgánica de la X_{CST}	0,071
	$X_{CSV} (X_{CST})$	Fracción másica de sólidos volátiles de la X_{CST}	0,9229
D	X_{DH_2O}	Fracción másica de agua	0,8152
	X_{DST}	Fracción másica de sólidos totales	0,1848
	$X_{DMI} (X_{DST})$	Fracción másica de materia inorgánica de la X_{DST}	0,220
	$X_{DSV} (X_{DST})$	Fracción másica de sólidos volátiles de la X_{DST}	0,780

Balance de Materia			
Corriente	Fracciones	Definición	Fracción
E	X_{EH2O}	Fracción másica de agua	0,999
	X_{EST}	Fracción másica de sólidos totales	0,00087
	$X_{EMI} (X_{EST})$	Fracción másica de materia inorgánica de la X_{EST}	0,71
	$X_{ESV} (X_{EST})$	Fracción másica de sólidos volátiles de la X_{EST}	0,29
F	X_{FH2O}	Fracción másica de agua	0,90
	X_{FST}	Fracción másica de sólidos totales	0,099
	$X_{FMI} (X_{FST})$	Fracción másica de materia inorgánica de la X_{FST}	0,33
	$X_{FSV} (X_{FST})$	Fracción másica de sólidos volátiles de la X_{FST}	0,66
G	X_{GCH4}	Fracción másica de metano (CH_4)	0,513
	X_{GCO2}	Fracción másica de dióxido de carbono (CO_2)	0,351
	X_{GOTros}	Fracción másica de otros gases	0,137
H	X_{HH2O}	Fracción másica de agua	0,959
	X_{HST}	Fracción másica de sólidos totales	0,041
	$X_{HMI} (X_{DST})$	Fracción másica de materia inorgánica de la X_{HST}	0,289
	$X_{HSV} (X_{DST})$	Fracción másica de sólidos volátiles de la X_{HST}	0,700

Fuente: Elaboración propia, 2021.

2.7. Balance de energía.

Se realizó el balance de materia del experimento que mayor volumen de biogás (variable respuesta) produjo (807 ml).

Triturado.

Para el triturado se utilizó la potencia de la licuadora que es igual a 0.6 kW, y el tiempo que se trituró, que fue por el periodo de 1min.

Podemos expresar la energía consumida como:

$$Q = 0,6 \text{ kW} * 0,017\text{h}$$

$$Q = 0,0102 \text{ kWh}$$

Biodigestor.

Se realiza el balance de energía en el biodigestor, de tal forma que se calcula el calor necesario para que una muestra de 1.916,9 g de sustrato pueda elevar su temperatura de 15°C a 41,5 °C.

Podemos expresar el calor, como:

$$Q = m * Cp * (T_2 - T_1) \quad \text{Ec. II - 8}$$

Donde:

m: Masa de sustrato en el biodigestor = 1.916,9 g = 1,9169 kg

Cp: Capacidad calorífica del sustrato en el biodigestor

T₁: Temperatura inicial = 15 °C

T₂: Temperatura final = 41,5 °C

Capacidad calorífica del sustrato en el biodigestor (Cp)

La capacidad calorífica del sustrato está compuesto por varios componentes, como son: estiércol de vaca, residuos sólidos vegetales y agua. Principios de Termodinámica Para Ingenieros de Howell y Buckuis nos permite expresar el Cp de la mezcla como la suma de la fracción por el Cp de cada componente.

$$Cp = (X * Cp)_{EV} + (X * Cp)_{RSV} + (X * Cp)_{H2O} \quad \text{Ec. II - 9}$$

Donde:

$(X * Cp)_{EV}$: Fracción por la capacidad calorífica del estiércol de vaca

$(X * Cp)_{RSV}$: Fracción por la capacidad calorífica de los residuos sólidos vegetales

$(X * Cp)_{H_2O}$: Fracción por la capacidad calorífica del agua

De la misma manera podemos expresar el Cp_{RSV} que están en función de la composición del mismo.

$$Cp_{RSV} = (X * Cp)_{Papa} + (X * Cp)_{plátano} + (X * Cp)_{zanahoria} + (X * Cp)_{manzana} \\ + (X * Cp)_{tomate} + (X * Cp)_{lechuga} \quad \text{Ec. II - 10}$$

Donde:

$(X * Cp)_{papa}$: Fracción por la capacidad calorífica de la papa

$(X * Cp)_{plátano}$: Fracción por la capacidad calorífica del plátano

$(X * Cp)_{zanahoria}$: Fracción por la capacidad calorífica de la zanahoria

$(X * Cp)_{manzana}$: Fracción por la capacidad calorífica de la manzana

$(X * Cp)_{tomate}$: Fracción por la capacidad calorífica del tomate

$(X * Cp)_{lechuga}$: Fracción por la capacidad calorífica de la lechuga

Tabla II-19: Capacidades caloríficas.

Nº	Compuesto	Cp (kJ/kg°C)
1	estiércol de vaca	1,86
2	H ₂ O	4,19
3	Papa	2,03
4	Plátano	3,5
5	Zanahoria	3,6
6	Tomate	3,9
7	Lechuga	4,02
8	Manzana	2,68

Fuente: Transferencia de Calor y Masa Yunus Cengel Tercera Edición.

En la parte experimental se usó la misma cantidad de cada especie de vegetal, entonces:

$$X = 1/8 = 0,166$$

Factorizando X y reemplazando las capacidades caloríficas Ec. II-10:

$$Cp_{RSV} = 0,166 * (2,03 + 3,5 + 3,6 + 2,68 + 3,9 + 4,02) \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

$$Cp_{RSV} = 3,27 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

Fracciones del Estiércol de Vaca (EV)

$$X_{EV} = \frac{400 \text{ g}}{1.961,9 \text{ g}}$$

$$X_{EV} = 0,203$$

Fracciones de los Residuos Sólidos Vegetales (RSV)

$$X_{RSV} = \frac{236,9 \text{ g}}{1.961,9 \text{ g}}$$

$$X_{RSV} = 0,121$$

Fracciones del Agua (H₂O)

$$X_{EV} = \frac{1.280 \text{ g}}{1.961,9 \text{ g}} = 0,652$$

Reemplazando las capacidades caloríficas y las fracciones en la Ec. II-9:

$$Cp = 0,203 * 1,86 + 0,121 * 3,27 + 0,652 * 4,19$$

$$Cp = 3,5 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

Y finalmente reemplazando Cp en la Ec. II-8:

$$Q = 1,9169 \text{ kg} * 3,5 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} * (41,5^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C})$$

$$Q = 177,79 \text{ kJ} = 0,0494 \text{ kWh}$$

Se necesitaron 177,79 kJ de energía (suministrada por la radiación solar) para que una masa 1,9169 kg eleve su temperatura de 15°C a 41,5°C.

CAPITULO III
RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. Caracterización de la materia prima.

3.1.1. Estiércol Vacuno.

3.1.1.1. Densidad.

Se calculó la densidad del estiércol vacuno con la masa y el volumen previamente medidos, reemplazando en la ecuación:

$$\rho_{EV} = \frac{m_{EV}}{V_{EV}}$$

Se pesó una masa de 100 g que ocupaba un volumen de 130 ml.

$$\rho_{EV} = \frac{100 \text{ g}}{130 \text{ ml}}$$

$$\rho_{EV} = 0,77 \text{ g/ml}$$

3.1.1.2. Potencial de hidrogeno, pH.

Se midió el pH con el pHmetro de la marca HACH que fue facilitado por la Oficina Técnica Nacional de los Ríos Pilcomayo y Bermejo (OTN PB), sumergiendo el electrodo hasta que el valor se estabilice en la pantalla principal.

El valor de pH fue de 7,9. Está dentro del rango permisible para una producción de biogás que es entre 6,5 – 8,5.

3.1.1.3. Humedad.

Fue determinado por el CEANID, dando como resultado 81,52 % de humedad en una muestra de 100 g de estiércol vacuno.

3.1.1.4. Cenizas (Materia Inorgánica)

Fue determinado por el laboratorio CEANID, dando como resultado 4,11% de cenizas en una muestra de 100 g de estiércol vacuno.

3.1.1.5. Sólidos totales.

Se calculó con la ecuación:

$$\% \text{ Sólidos totales} = 100\% - \% \text{ Humedad}$$

$$\% \text{ Sólidos totales} = 100\% - 81,52\%$$

$$\% \text{ Sólidos totales} = 18,48\%$$

3.1.1.6. Sólidos Volátiles.

$$\% \text{ Sólidos totales} = \% \text{ Cenizas} + \% \text{ Sólidos Volátiles}$$

$$18,48 \% = 4,1 \% + \% \text{ Sólidos Volátiles}$$

$$\% \text{ Sólidos Volátiles} = 14,38 \%$$

3.1.1.7. Nitrógeno Total.

Fue realizado por el laboratorio CEANID, dando como resultado 0,41 % de nitrógeno total en una muestra de 100 g de estiércol vacuno.

3.1.1.8. Tabla resumen.

A continuación se resume las características del estiércol vacuno. (Ver Tabla III-1).

Tabla III-1 Características del estiércol vacuno.

Parámetro	Valor	Unidad
Densidad	0,77	g/ml
pH	7,9	-
Humedad	81,52	%
Sólidos Totales	18,18	%
Cenizas	4,11	%
Sólidos Volátiles	14,38	%
Nitrógeno total	0,41	%

Fuentes: Elaboración propia, CEANID. 2021.

3.1.2. Residuos Sólidos Vegetales.

3.1.2.1. Densidad.

Se calculó la densidad de los residuos sólidos vegetales con la masa y el volumen previamente medidos, reemplazando en la ecuación:

$$\rho_{RSV} = \frac{m_{RSV}}{V_{RSV}}$$

Se pesó una masa de 100 g que ocupaba un volumen de 94 ml.

$$\rho_{RSV} = \frac{100 \text{ g}}{94 \text{ ml}}$$

$$\rho_{RSV} = 1,06 \text{ g/ml}$$

3.1.2.2. Potencial de hidrogeno, pH.

Se midió el pH con el pHmetro de la marca HACH que fue facilitado por la Oficina Técnica Nacional de los Ríos Pilcomayo y Bermejo (OTN PB), sumergiendo el electrodo hasta que el valor se estabilice en la pantalla principal.

El valor de pH fue de 7,6. Está dentro del rango permisible para una producción de biogás que es entre 6,5 – 8,5.

3.1.2.3. Humedad.

Fue determinado por el CEANID, dando como resultado 88,60 % de humedad en una muestra de 100 g de residuos sólidos vegetales.

3.1.2.4. Cenizas (Materia Inorgánica)

Fue determinado por el laboratorio CEANID, dando como resultado 0,88 % de cenizas en una muestra de 100 g de residuos sólidos vegetales.

3.1.2.5. Sólidos totales.

Se calculó con la ecuación:

$$\% \text{ Sólidos totales} = 100\% - \% \text{ Humedad}$$

$$\% \text{ Sólidos totales} = 100\% - 88,60\%$$

$$\% \text{ Sólidos totales} = 11,4 \%$$

3.1.2.6. Sólidos Volátiles.

$$\% \text{ Sólidos totales} = \% \text{ Cenizas} + \% \text{ Sólidos Volátiles}$$

$$11,4 \% = 0,88 \% + \% \text{ Sólidos Volátiles}$$

$$\% \text{ Sólidos Volátiles} = 10,52 \%$$

3.1.2.7. Nitrógeno Total.

Fue realizado por el laboratorio CEANID, dando como resultado 0,26 % de nitrógeno total en una muestra de 100g de estiércol vacuno.

3.1.2.8. Tabla resumen.

A continuación se resume las características del estiércol vacuno. (Ver Tabla III-2).

Tabla III-2: Características de los residuos sólidos vegetales

Parámetro	Valor	Unidad
Densidad	1,06	g/ml
pH	7,6	-
Humedad	88,60	%
Sólidos Totales	11,4	%
Cenizas	0,88	%
Sólidos Volátiles	10,52	%
Nitrógeno total	0,26	%

Fuentes: Elaboración propia, CEANID. 2021.

3.2. Caracterización del biogás.

3.2.1. Densidad.

Se realizó el cálculo de la densidad, pesando el biodigestor con la mezcla al inicio del proceso y al final del mismo. De forma que la diferencia entre estas será la masa de que se transformó en biogás.

$$M_{biogas} = M_{biodigestor\ final} - M_{biodigestor\ inicial}$$

Donde:

M_{biogas} : masa de biogás

$M_{biodigestor\ final}$: masa del biodigestor al final del proceso = 2.296,43 g

$M_{biodigestor\ inicial}$: masa del biodigestor al inicio del proceso = 2.295,33 g

$$M_{biogas} = 2.296,43 \text{ g} - 2.295,33 \text{ g}$$

$$M_{biogas} = 1,1 \text{ g}$$

El volumen de biogás generado fue igual a 806 ml, reemplazando en la fórmula de la densidad:

$$\rho_{biogas} = \frac{1,1 \text{ g}}{806 \text{ ml}}$$

$$\rho_{biogas} = 1,36 * 10^{-3} \text{ g/ml}$$

Llevando de gramos por mililitro a gramos por litro:

$$\rho_{biogas} = 1,36 \text{ g/l}$$

3.2.2. Prueba de combustión.

La prueba de combustión se utilizó un pequeño frasco que se llenó con agua, y por desplazamiento se transportó el gas al frasco, se tapó. Posteriormente se encendió un cerillo de fosforo que se acercó al frasco, al estar a una distancia muy próximo, se abrió el frasco y se vio como se producía la combustión del biogás. (Ver Figura III-1).

Figura III-1: Prueba de combustión del biogás obtenido



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Se verifico que el biogás obtenido es un gas inflamable.

3.2.3. Olor.

Se hizo la prueba de olor personalmente, para ello lleno uno pequeño frasco de biogás por desplazamiento de agua, se tapó, y seguidamente se acercó hacia la nariz, al para liberar el biogás se sintió ese olor característico del huevo podrido. Esto debe al sulfuro de hidrogeno presente en el biogás.

3.2.4. Composición del biogás.

Según los análisis de cromatografía de gases realizada en el Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos IIDEPROQ - UMSA, La Paz. (Ver Tabla II-3).

Tabla III-3 Composición del biogás obtenido

Parámetro	Unidad	Valor
Metano (CH ₄)	%	51,2596
Dióxido de Carbono (CO ₂)	%	35,0684
Otros	%	13,6720

Fuente: IIDEPROQ, 2021.

3.2.5. Poder calorífico superior.

Para calcular el poder calorífico superior de una mezcla de gases se deben multiplicar cada porcentaje de gas componente por su poder calorífico y al final sumar estos productos el resultado es el poder calorífico superior de la mezcla de gases.

$$PCS (biogas) = X_{CH_4} * PCS_{CH_4} + X_{CO_2} * PCS_{CO_2} + X_{Otros} * PCS_{Otros}$$

El poder calorífico superior del metano es igual a 55.322 kJ/kg, para el CO₂ es igual a cero, y para los “otros” componentes, al ser desconocidos podemos asumir que serán igual a cero, el poder calorífico calculado será un aproximado, la ecuación queda:

$$PCS (biogas) = X_{CH_4} * PCS_{CH_4}$$

Remplazando:

$$PCS (biogas) = 0,512596 * 55.322 \text{ kJ/kg}$$

$$PCS (biogas) = 28.357,8 \text{ kJ/kg}$$

3.3. Caracterización de los residuos.

3.3.1. Densidad.

Se calculó la densidad de los residuos (biol) con la masa y el volumen previamente medidos, reemplazando en la ecuación:

$$\rho_R = \frac{m_{EV}}{V_{EV}}$$

Donde:

ρ_R : Densidad de los residuos ; m_{EV} : Masa de estiércol vacuno ;

V_{EV} : Volumen de estiércol vacuno

Se pesó una masa de 100 g de estiércol vacuno que ocupaba un volumen de 106 ml.

$$\rho_R = \frac{100 \text{ g}}{106 \text{ ml}} = 0,94 \text{ g/ml}$$

3.3.2. Potencial de hidrogeno, pH.

Fue determinado por el laboratorio CEANID.

El valor de pH fue de 8,04 (20°C), que está dentro del rango permisible para su uso como de biol es entre 7 – 8,5.

3.3.3. Humedad.

Fue determinado por el CEANID, dando como resultado 95,9 % de humedad en una muestra de 100 g de residuo.

3.3.4. Cenizas (Materia Inorgánica)

Fue determinado por el laboratorio CEANID, dando como resultado 1,18% de cenizas en una muestra de 100 g de residuo.

3.3.5. Sólidos totales.

Se calculó con la ecuación:

$$\% \text{ Sólidos totales} = 100\% - \% \text{ Humedad}$$

$$\% \text{ Sólidos totales} = 100\% - 95,9\%$$

$$\% \text{ Sólidos totales} = 4,1\%$$

3.3.6. Sólidos Volátiles.

$$\% \text{ Sólidos totales} = \% \text{ Cenizas} + \% \text{ Sólidos Volátiles}$$

$$4,1 \% = 1,18 \% + \% \text{ Sólidos Volátiles}$$

$$\% \text{ Sólidos Volátiles} = 2,3\%$$

3.3.7. Nitrógeno Total.

Fue realizado por el laboratorio CEANID, dando como resultado 0,16 % de nitrógeno total en una muestra de 100 g de estiércol vacuno.

3.3.8. Conductividad Eléctrica.

Fue determinado por el laboratorio CEANID.

El valor de conductividad eléctrica fue de 6190 uS/cm (15°C).

3.3.9. Tabla resumen.

A continuación se resume las características del estiércol vacuno. (Ver Tabla III-4).

Tabla III-4: Características de los residuos.

Parámetro	Valor	Unidad
Densidad	0,94	g/ml
pH	8,04	-
Humedad	95,9	%
Cenizas	1,18	%
Sólidos Volátiles	2,3	%
Sólidos Totales	4,1	%
Nitrógeno total	0,16	%
Conductividad Eléctrica	6.190	uS/cm

Fuentes: Elaboración propia, CEANID. 2021.

3.4. Análisis estadístico del diseño experimental.

Para el tratamiento estadístico de los datos del diseño factorial, se utilizó el programa SPSS STATISTICS 21 (Statistical Package for the Social Sciences).

En la Tabla III-5, se presenta los datos obtenidos de la parte experimental.

Tabla III-5 Datos de la parte experimental.

N°	Matriz de experimentos		Plan de experimentación		
	A	B	Relación EV (g) – RSV (g)	Tiempo de retención (días)	Volumen (ml)
1	-1	-1	400 - 120	19	641
2	+1	-1	400 - 240	19	686
3	-1	+1	400 - 120	22	726
4	+1	+1	400 - 240	22	787
5	-1	-1	400 - 120	19	659
6	+1	-1	400 - 240	19	675
7	-1	-1	400 - 120	22	704
8	+1	+1	400 - 240	22	806

Fuente: Elaboración propia SPSS 21, 2021.

3.4.1. Análisis de varianza univariante.

Se realiza un Análisis de Varianza Univariante, para poder determinar la influencia de los factores relación EV/RSV y el tiempo de retención, verificando si todos los factores y su combinación son significativos respecto a la variable respuesta, volumen de biogás obtenido.

Los factores inter-sujetos se muestran en la Tabla III – 6.

Tabla III-6: Factores Inter Sujetos.

Factores inter-sujetos		
		N
RelaciónEVRSV	-1,00	4
	1,00	4
Tiempo	-1,00	4
	1,00	4

Fuente: Elaboración propia SPSS 21, 2021.

Donde N es el número de datos.

Entre mayor sea el numero datos es mucho mejor para que la respuesta estadística sea confiable. En este caso en particular para cada factor (Relación EV/RSV y el Tiempo) tenemos 4 en su estado mínimo y 4 en su estado máximo, en caso de que N sea menor a 4 la respuesta estadística no sería confiable.

La Tabla III-7 nos muestra las pruebas inter-sujeto realizadas para determinar variables significativas.

Tabla III-7: Pruebas de los efectos Inter-Sujetos.

Pruebas de los efectos inter-sujetos

Variable dependiente: Volumen

Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	24763,000 ^a	3	8254,333	65,903	,001
Intersección	4089800,000	1	4089800,000	32653,094	,000
RelaciónEVRSV	4418,000	1	4418,000	35,273	,004
Tiempo	19800,500	1	19800,500	158,088	,000
RelaciónEVRSV * Tiempo	544,500	1	544,500	4,347	,105
Error	501,000	4	125,250		
Total	4115064,000	8			
Total corregida	25264,000	7			

a. R cuadrado = ,980 (R cuadrado corregida = ,965)

Fuente: Elaboración propia SPSS 21, 2021.

El análisis de la varianza reparte la variabilidad de la respuesta Volumen en segmentos separados para cada uno de los efectos, luego prueba la significancia estadística de cada efecto por comparación de la media cuadrada contra una estimación del error experimental, los efectos principales de Tiempo y Relación EV/RSV fueron altamente significativos para esta variable respuesta, puesto que tienen valores de P menores a 0.05, el efecto combinado Relación EV/RSV * Tiempo no fue significativo, por lo tanto no es representativo para el análisis.

3.4.2. Determinación del modelo matemático.

Para determinar el modelo matemático se realiza una regresión con todas las variables significativas; Relación EV/RSV y el Tiempo. Se excluye el efecto de la relación EV/RSV puesto que, como se dijo anteriormente, no tiene significancia. (Ver Tabla III-7).

Tabla III-8: Variables para la regresión.

Nº de muestra	Relación EV/RSV	Tiempo	Volumen (ml)
1	-1	-1	641
2	+1	-1	686
3	-1	+1	726
4	+1	+1	787
5	-1	-1	659
6	+1	-1	675
7	-1	+1	740
8	+1	-1	806

Fuente: Elaboración propia, 2021.

En la Tabla III-8 y Tabla III-9, se muestra un resumen del modelo matemático y del análisis Anova para el volumen de biogás donde el exponente hace referencia a las variables predictoras: (Constante), Tiempo, Relación EV/RSV

Tabla III-9 Resumen del modelo matemático.

Resumen del modelo ^b				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,979 ^a	,959	,942	14,46029

a. Variables predictoras: (Constante), Tiempo, RelaciónEVRSV

b. Variable dependiente: Volumen

Fuente:

Elaboración propia SPSS 21, 2021.

El análisis de varianza de Anova (Ver Tabla III-10) muestra un nivel de significación que tiende a cero, demostrando que el modelo matemático escogido es el correcto.

Tabla III-10: Resultados del análisis Anova.

ANOVA^a

Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1 Regresión	24218,500	2	12109,250	57,911	,000 ^b
Residual	1045,500	5	209,100		
Total	25264,000	7			

a. Variable dependiente: Volumen

b. Variables predictoras: (Constante), Tiempo, RelaciónEVR SV

Fuente: Elaboración propia SPSS 21, 2021.

En la Tabla III-11 se muestran los coeficientes para el modelo matemático de volumen de biogás.

Tabla III-11: Coeficientes del modelo matemático.

Coeficientes^a

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.	Intervalo de confianza de 95,0% para B	
	B	Error típ.	Beta			Límite inferior	Límite superior
(Constante)	715,000	5,112		139,854	,000	701,858	728,142
1 RelaciónEVR SV	23,500	5,112	,418	4,597	,006	10,358	36,642
Tiempo	49,750	5,112	,885	9,731	,000	36,608	62,892

a. Variable dependiente: Volumen

Fuente: Fuente: Elaboración propia SPSS 21, 2021.

Según los coeficientes indicados en la Tabla III-11, el modelo matemático para la obtención de biogás a partir de residuos sólidos y estiércol de vacuno, responde a:

$$Y = 715 + 23.5 * X_1 + 49.750 X_2$$

Donde:

Y: Volumen de biogás (ml)

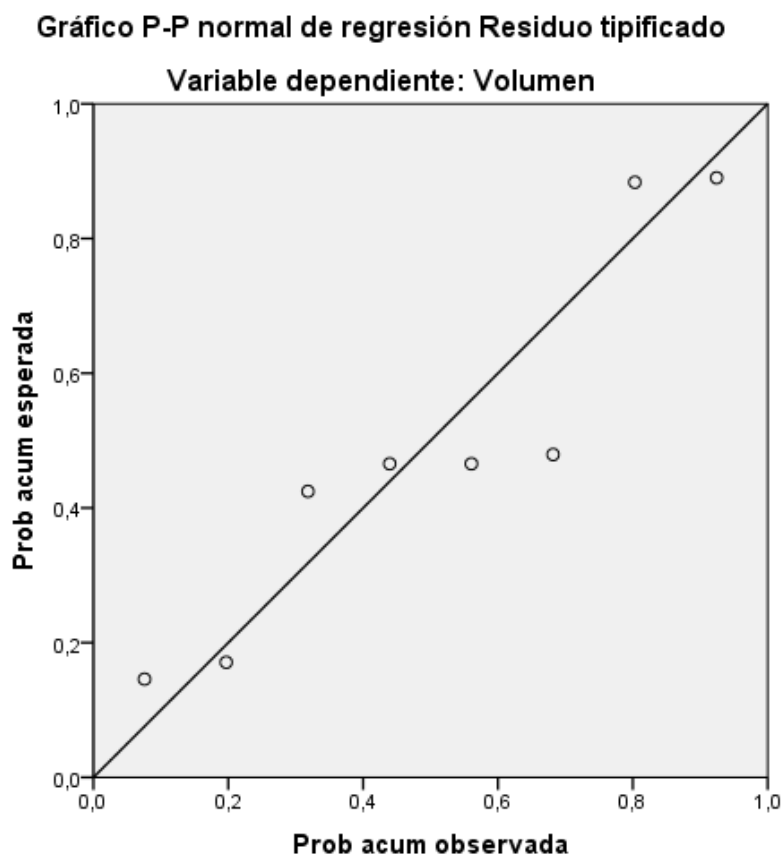
X₁: Relación EV/RSV (g)

X₂: Tiempo de retención (días)

Cada una de las variables introducidas y el rendimiento están relacionada con la ecuación.

En la Figura III-2 se puede observar el modelo escogido y la posición de los puntos respecto al modelo, algunos puntos no se ajustan al modelo, sin embargo, según el análisis Anova no muestra gran significancia el desajuste, motivo por el cual el modelo escogido es correcto.

Figura III-2: Modelo Lineal.



Fuente: Elaboración propia SPSS 21, 2021.

Según el modelo lineal; se obtiene un nuevo Volumen, recibe el nombre de Volumen ajustado, el que a continuación se gráfica junto al Volumen observado que fue obtenido de cada experimento, para poder verificar el ajuste de la ecuación al modelo matemático. (Ver Tabla III-12).

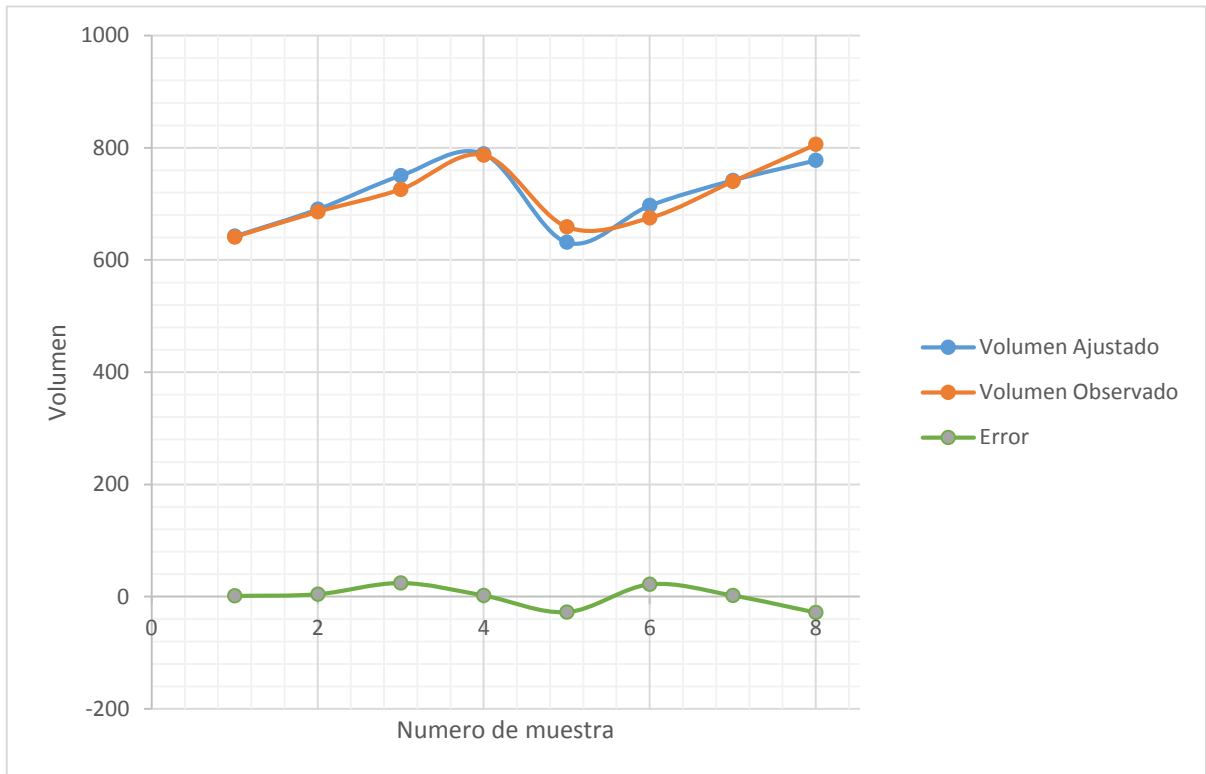
Tabla III-12 resultados del volumen ajustado y el error

Volumen observado (ml)	Volumen Ajustado (ml)	Error
641	642,2	1,2
686	690,4	4,4
726	750,4	24,4
787	789	2
659	631,4	-27,6
675	697	22
740	742	2
806	777,6	-28,4

Fuente: Elaboración propia, 2021.

En la figura III-3 se puede observar la gráfica de del volumen observado y el volumen ajustado y el error, donde se puede apreciar que valores entre el valor observado y el valor ajustado no varían drásticamente, por lo que podemos decir que el modelo matemático escogido es el correcto.

Figura III-3: Volumen Observado, Calculado y Error.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

3.5. Influencia de la Temperatura.

Como ya se había dicho, la temperatura es un factor que no podremos controlar, sin embargo es importante hacer el análisis, de cuanto influye este factor al proceso de obtención de biogás. Para ello se hará el análisis para el último experimento realizado y su réplica, esto debido a que el volumen (variable respuesta) varía en mayor medida que los demás experimentos, y a través del análisis ver si la temperatura repercute o no.

A continuación en la Tabla III-13 y Tabla III-14 se presenta un resumen los datos los experimentos 4 y 8 respectivamente.

Tabla III-13: Datos del experimento 4.

Parámetro	Valor
Masa de estiércol vacuno	400 g
Masa de residuos sólidos vegetales	240 g
Masa de agua	1.280 g
Volumen de biogás	787 ml

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Tabla III-14: Datos del experimento 8.

Parámetro	Valor
Masa de estiércol vacuno	400 g
Masa de residuos sólidos vegetales	240 g
Masa de agua	1.280 g
Volumen de biogás	806 ml

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Tabla III-15: Datos de temperatura y volumen obtenidos del experimento número 4.

día	Temperatura (° C)			Media	Volumen (ml)
	6:00	13:00	21:00		
1	12,8	39	25,3	25,70	-
2	12	38,1	25	25,03	-
3	11,3	37,5	24	24,27	-
4	10,5	38	25,5	24,67	-
5	11,2	36,6	19,4	22,40	-
6	12,8	39	25,3	25,70	-
7	13	37,6	23	24,53	-
8	12,7	38	24,9	25,20	35
9	13	38	24	25,00	36
10	11,5	33,2	20	21,57	31
11	13,5	37,5	26,1	25,70	39
12	13	41,1	25,6	26,57	38
13	10	34,2	20	21,40	32
14	14,2	37,4	24	25,20	37
15	12	37,9	24	24,63	38
16	13,1	36,4	22,4	23,97	35
17	14,4	39,5	21,5	25,13	37
18	12	37,5	21,9	23,80	33
19	11,2	36,2	21,6	23,00	35
20	11	39	21	23,67	33
21	12,5	35	21,8	23,10	37
22	10,3	34,8	22,4	22,50	35
			Media	24.17	

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Tabla III-16: Datos de temperatura y volumen obtenidos del experimento número 8.

día	Temperatura (° C)			Media	Volumen (ml)
	6:00	13:00	21:00		
1	13,6	40,1	24,6	26,10	-
2	12,4	38,6	26,8	25,93	-
3	11,2	36,2	25	24,13	-
4	10,5	37,4	25,5	24,47	-
5	11,2	36,6	19,4	22,40	-
6	13,7	40,5	26,4	26,87	-
7	14	37,6	24	25,20	-
8	14,6	39	23,6	25,73	37
9	12,8	37,5	21,8	24,03	36
10	11,5	34	19	21,50	32
11	14,4	40,2	27,9	27,50	41
12	13,8	38,6	24,3	25,57	37
13	12,9	36	23	23,97	35
14	14,2	37,4	24	25,20	38
15	15	40,3	24	26,43	39
16	15,2	41,5	28,3	28,33	42
17	14,4	39,5	21,5	25,13	37
18	9,8	35,9	20,9	22,20	35
19	10,5	37	25,9	24,47	36
20	12	38,4	25,6	25,33	37
21	14,3	38,6	25	25,97	38
22	11,1	36,9	26	24,67	36
			Media	24.998	

Fuente: Elaboración propia, 2021.

En las Tabla III-15 y Tabla III-16 se puede apreciar que cuando mayor es la temperatura se ve como incrementa el volumen de biogás producido, sin embargo para hacer el estudio correcto se debe tomar en cuenta la curva de crecimiento bacteriano, ya que el incremento al volumen puede ser debido a dicha curva y no así a la temperatura.

Según (Magaña R., Torres R., Martínez G., & Sandoval Juárez, 2006), los microorganismos presentes en la digestión anaeróbica, pasan la fase de latencia y la fase exponencial en los primeros 8 – 10 días, y la fase estacionaria, los próximos 15 – 20 días después de la fase anterior.

En la Tabla III-17 se muestra los datos para el análisis de la influencia de la temperatura, el experimento 4 con una temperatura media de 24,17 °C (Ver Tabla III-15), y el experimento 8 con una temperatura media de 24,998 °C. (Ver Tabla III-16).

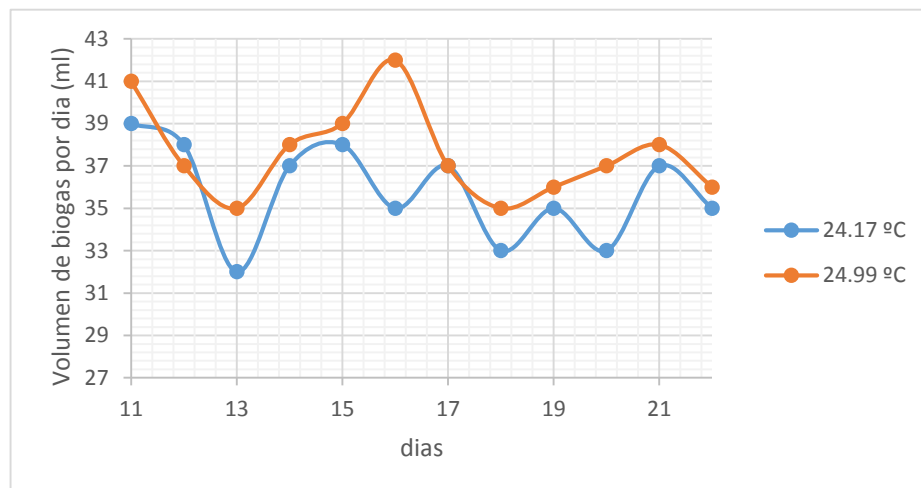
Tabla III-17: Datos para el análisis de la influencia de la temperatura.

Día	Experimento 4 (24,17 °C)	Experimento 8 (24.998 °C)
11	39	41
12	38	37
13	32	35
14	37	38
15	38	39
16	35	42
17	37	37
18	33	35
19	35	36
20	33	37
21	37	38
22	35	36

Fuente: Elaboración propia, 2021.

La Figura III-4 representa el comportamiento del volumen de biogás obtenido en relación con los días.

Figura III-4: Comportamiento del volumen de biogás producido vs el tiempo.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

De acuerdo a la gráfica se puede observar que mientras mayor sea la temperatura mayor sea el volumen de biogás obtenido, corroborando de esta forma las distintas fuentes bibliográficas.

3.6. Cálculo del Rendimiento.

Se calculó el rendimiento del proceso de obtención de biogás a partir de residuos sólidos vegetales y estiércol vacuno en base a la cantidad de masa de residuos y la cantidad de biogás obtenida como producto final.

$$\text{Rendimiento (\%)} = \left(\frac{m_{\text{biogas}}}{m_{\text{residuos}}} \right) * 100$$

Donde:

$$M_{\text{residuos}} = 1.915,8 \text{ g}$$

$$M_{\text{biogas}} = 1,1 \text{ g}$$

Remplazando:

$$\text{Rendimiento (\%)} = \left(\frac{1,1 \text{ g}}{1.915,8 \text{ g}} \right) * 100$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = 0,057\%$$

A priori puede aparentar un rendimiento muy bajo, sin embargo es importante considerar que los residuos que deja el proceso, como son el Biol y el Compost, no requieren un tratamiento complejo para que puedan ser usados como fertilizantes.

3.7. Condiciones de operación óptimas de máxima degradación de la materia prima.

La máxima degradación de la materia prima usada (residuos sólidos vegetales y estiércol vacuno) está ligada netamente a la producción de biogás, es decir que mientras más volumen de biogás se obtenga, la materia prima se degrada en mayor medida.

Ahora bien, es importante tomar en cuenta tres factores que pueden afectar a la degradación de la materia prima como son; tiempo de retención, masa alimentada al biodigestor y la temperatura.

De acuerdo a los datos de los experimentos realizados (Ver Tabla III-5), y los datos de la Tabla III-15 Y Tabla III-16, podemos decir:

- El tiempo de retención es directamente proporcional al volumen de biogás formado, por lo que un mayor tiempo de retención hace que la producción de biogás sea mayor, y por tanto se obtiene una mayor degradación de la materia prima (residuos sólidos vegetales y estiércol vacuno)
- El estiércol vacuno es el inóculo en la producción de biogás, entre mas masa de inóculo mayor producción de biogás, sin embargo en los experimentos se maneja una masa constante de 400 g, pero al añadir más materia orgánica (residuos sólidos vegetales), se puede maximizar la producción de biogás pues estas bacterias presentes en el estiércol vacuno se prestan para la degradación de los residuos sólidos vegetales.
- La temperatura es el factor más importante en la operación de biodigestión y quedo demostrado en todos los experimentos, pues en los días en los la temperatura era mayor, la producción de biogás (volumen) era mayor, haciendo de esta manera que la materia prima se degradé de forma más rápida.

3.8. Análisis de Costos.

3.8.1. Costos Indirectos.

Las siguientes tablas muestran los detalles de los costos indirectos.

Tabla II-18: Detalle de los costos de construcción del biodigestor.

Ítem	Unidad	Cantidad	Valor Unitario (Bs.)	Valor Total (Bs.)
Olla a presión	Pieza	1	100	100
Termómetro digital	Pieza	1	80	80
Manómetro para gases	Pieza	1	55	55
Equipo para suero	Pieza	1	10	10
Union	Pieza	1	10	10
Silicona líquida	ml	1	20	20
Trabajo de ensamblado	-	-	200	200
			Total₁	475

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Tabla II-19: Detalle de los costos del material de laboratorio.

Ítem	Unidad	Cantidad	Valor Unitario (Bs.)	Valor Total (Bs.)
Balanza electrónica	Pieza	1	100	100
Probeta de 250 ml	Pieza	1	65	65
Vaso precipitado de 250 ml	Pieza	1	40	40
Soporte de probeta	Pieza	1	80	80
Fracos de 10 ml	Pieza	2	20	40
Contenedor de para agua	Pieza	1	30	30
			Total₂	355

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Tabla II-20: Detalle de costos material de apoyo.

Descripción	Unidad	Cantidad	Valor Unitario (Bs.)	Valor Total (Bs.)
Análisis de laboratorio	-	-	-	745
Internet	Horas	140	3	420
Pasajes	-	40	1	40
Papel	-	300	0.1	30
Anillado	-	3	7	21
Empastado	-	3	50	150
			Total₃	1.406

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Tabla II-21: Detalle del costo de investigación.

Descripción	Unidad	Cantidad	Valor Unitario (Bs.)	Valor Total (Bs.)
Costo de investigación – mano de obra	horas	300	30	9.000
			Total₄	9.000

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Tabla II-22: Detalle de costos totales.

Descripción		Valor Unitario (Bs.)
Total ₁	Costos de construcción del biodigestor	475
Total ₂	Costos del material de laboratorio	355
Total ₃	Costos material de apoyo	1.406
Total ₄	Costo de investigación	9.000
TOTAL		11.236

Fuente: Elaboración propia, 2021.

3.8.2. Costo de producción.

Para determinar los costos de producción se tomó en cuenta los datos empleados en el balance de materia y los gastos energéticos de los equipos utilizados durante el proceso de obtención de biogás.

Tabla II-23: Detalle de los costos de la materia prima.

Descripción	Unidad	Cantidad	Valor Unitario (Bs.)	Valor Total (Bs.)
Estiércol vacuno	g	400	0	0
Residuos sólidos vegetales	g	240	0	0
Agua	g	1.280	0,000312	0,399
			Total	0,399

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Tabla II-24: Detalle de los costos de la energía.

Descripción	Potencia (kW)	Tiempo (h)	Energía (kWh)	Valor Unitario (Bs.)	Valor (Bs.)
Triturado	0,6	0,017	0,0102	39,216	0,4
biodigestión	0,049	528	25,87	0	0
				Total	0,4

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Es importante mencionar que el costo de la energía utilizada por el biodigestor el proveniente de la energía solar, por la cual no tiene costo alguno.

El costo total de producción fue la suma de los costos de materia prima y los costos energéticos.

$$\text{Costo total} = (0,399 + 0,4) \text{ Bs.}$$

$$\text{Costo total} = \mathbf{0,799 \text{ Bs.}}$$

Por lo tanto, para la producción de 807 ml de biogás a partir de residuos sólidos vegetales y estiércol vacuno tendría un costo de 0,799 Bs.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones.

Se logró obtener satisfactoriamente biogás a partir de residuos sólidos vegetales y estiércol vacuno, procedentes del barrio San Mateo Sud, Tarija, a escala laboratorio.

En consecuencia, se concluye diciendo:

Los parámetros fisicoquímicos más importantes analizados por el laboratorio del CEANID para los residuos sólidos vegetales fueron: Humedad 88,6 %, Cenizas 0,88 %, Nitrógeno total 0,26 %, y los parámetros realizados personalmente fueron: Densidad 1,06 g/ml, pH 7.6, Sólidos totales 11,4 % y Sólidos volátiles 10,52 %.

Los parámetros fisicoquímicos más importantes analizados por el laboratorio del CEANID para el estiércol vacuno fueron: Humedad 81,52 %, Cenizas 4,11 %, Nitrógeno total 0,41%, y los parámetros realizados personalmente fueron: Densidad 0,77 g/ml, pH 7.9, Sólidos totales 18,18 % y Sólidos volátiles 14,38 %.

Se construyó un biodigestor a escala laboratorio, con material de acero inoxidable, y con todos los accesorios necesarios para la obtención de biogás a partir de residuos sólidos vegetales y estiércol vacuno.

Las variables estudiadas en el proceso de obtención biogás a partir de residuos sólidos vegetal estiércol vacuno fueron: relación de masa entre el estiércol vacuno - residuos sólidos vegetales y el tiempo de retención, en la parte experimental se observó que la relación EV/RSV igual a 1: 0.6 y un tiempo de retención de la mezcla dentro del biodigestor igual a 22 días, se obtuvo un mayor volumen de biogás, 807 ml.

Se obtuvo las condiciones óptimas para la máxima degradación de la materia prima mediante los ocho experimentos realizados, observando en cada experimento el comportamiento de las variables: masa alimentada, tiempo de retención y la temperatura. Un indicador de óptima degradación de materia prima es el volumen de biogás generado, en tal sentido, y de acuerdo a las experiencias realizadas se determinó que el tiempo de retención y la temperatura son directa proporcional a la óptima degradación de la materia prima, es decir, a mayor tiempo de retención y a mayor temperatura, existe una mayor degradación de la materia prima.

Los parámetros fisicoquímicos realizados personalmente para el biogás obtenido fueron: Densidad 1.36 g/L, Poder Calorífico 28.367,83 KJ/Kg, y de acuerdo a la cromatografía de gases realizada por el Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos IIDEPROQ, la composición de metano (CH₄) es igual a 51,25% y de dióxido de carbono 35,06 (CO₂).

De acuerdo al balance de materia y el balance de energía, el costo de la obtención experimental (a escala laboratorio) de biogás a partir de residuos sólidos vegetales de estiércol vacuno fue de 2,98 Bs. por 807 mililitros.

Basados en el poder calorífico del biogás obtenido, se puso un precio al biogás igual a por 807 mililitros de biogás.

De acuerdo a la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) el metro cubico de gas natural con un poder calorífico de 50.310 KJ/Kg tiene un precio de 2,6 Bs., de acuerdo a esos datos el valor del biogás producido con un poder calorífico de 28.367,83 KJ/Kg tendría un costo de 1,47 Bs el metro cubico.

4.2. Recomendaciones.

Para futuras experiencias iguales o similares.

- ✚ Se recomienda revisar el biodigestor que se vaya a utilizar, no presente fugas de ningún tipo (sellado hermético), ya que esto puede significar que no se forme el biogás.
- ✚ Se recomienda comparar la obtención de biogás mediante un biodigestor de acero inoxidable con biodigestores contruidos de otros materiales, y de esta forma poder observar el comportamiento simultaneo, con el fin de determinar cual tiene un mayor efecto en la formación de biogás.
- ✚ Se recomienda hacer ensayos utilizando diferentes tipos de estiércoles, con el fin de determinar cual tiene un mayor efecto en la formación de biogás.
- ✚ Se recomienda estudiar el proceso de obtención de biogás a partir de residuos sólidos vegetales y estiércol vacuno controlando la variable de la temperatura en el proceso de digestión y comparar el volumen de biogás de formado en distintas temperaturas.
- ✚ Se recomienda hacer un análisis de solidos totales a la mezcla que se alimentara al biodigestor, este valor debe estar dentro de un intervalo alrededor del 4 al 16 %. Un mayor valor puede influenciar la digestión, debido a que la movilidad de las bacterias metanogénicas se encuentra limitada.

Para familias que crían ganado vacuno.

- ✚ Investigar sobre las ventajas y desventajas del proceso de digestión anaeróbica para la producción de biogás.
- ✚ Construir un biodigestor para la producción de biogás, de preferencia a escala “familiar”, con el fin de aprovechar el estiércol vacuno producido.

Para la U.A.”J.M.S.”

- ✚ Realizar el proyecto de obtención de biogás a partir de residuos sólidos vegetales y estiércol vacuno con un estudio detallado de costos para determinar si el mismo es factible a un nivel de producción industrial.
- ✚ Dar a conocer en mayor medida el tema de energías alternas, ayudando de esta manera a la contaminación y el calentamiento global.

