

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**TESIS**

**“USO DE MICROORGANISMOS BENÉFICOS PARA MEJORAR LA CALIDAD Y CANTIDAD DE BIOGÁS PRODUCIDO A PARTIR DE DESECHOS ORGÁNICOS DEL COMEDOR UNI, CONTROLANDO LA TEMPERATURA MEDIANTE BIODIGESTORES AUTOMATIZADOS”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

**INGENIERO AMBIENTAL**

ELABORADO POR:

**STEFAN OSVALDO RUMICHE PEÑA**

ASESOR:

Mg. GILBERTO ALEJANDRO MENDOZA ROJAS

LIMA - PERÚ

2021

## **DEDICATORIA**

A Karina y Oswaldo, mis padres, por su amor inefable  
y por su vehemencia en el quehacer de la vida.

A mis hermanas por el cariño incontrastable  
que radica en cada una de ellas.

## **AGRADECIMIENTO**

A mis tíos y primos, por su inmensurable entereza puesta en mí y por sus palabras oportunas para cada ocasión.

A mi abuela por todo el afecto que desprende y sus incontenibles abrazos confortables, a mi abuelo, por enseñarme que el trabajo es un eje fundamental en la vida.

Al Mg. Alejandro Mendoza Rojas, asesor de tesis y docente de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, por su asesoría y consejos durante el desarrollo de esta investigación.

A Víctor Tomanguila y George Quispe, por su ayuda y aporte en el diseño del circuito eléctrico electrónico.

A Israel De Lama, por su ayuda en la diagramación del circuito eléctrico-electrónico.

A Sebastián Velásquez, por el soporte logístico y los monitoreos como asistente de tesis.

A los trabajadores de la Facultad de Ingeniería Ambiental, por el apoyo al utilizar las instalaciones de la FIA-UNI para el desarrollo experimental de la presente investigación.

A mis amigos de la FIA-UNI, por la convicción de ser mejores cada día, y el compromiso de hacer, genuinamente, ingeniería ambiental.

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación surgió por la necesidad de estudiar la influencia de diversos microorganismos benéficos en la producción de biogás en condiciones de temperatura controlada. Además, se diseñó un prototipo de biodigestor utilizando un sistema embebido con Arduino. Para el control de la temperatura interna se utilizó una resistencia de 1000 watts, para el calentamiento interno, utilizando un dispositivo electrónico como el sensor de temperatura DS18B20.

La investigación inició en julio del 2019 y culminó en marzo del 2020. Para el ensayo se diseñó un biodigestor tipo batch de 60 litros con un sistema de control de la temperatura interna en tiempo real utilizando el microcontrolador Arduino Mega 2560. Como inóculo se utilizó estiércol de gallina de la granja del programa de aves de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

Se analizaron 3 tratamientos utilizando el mismo sustrato, el que consistió en la mezcla de: gallinaza, desechos de comida del comedor de la Universidad Nacional de Ingeniería y aserrín. Los tratamientos fueron: Tratamiento 1 (Tratamiento C), se realizó un pre-compostaje al sustrato, se cargó al biodigestor y se adicionó agua; Tratamiento 2 (Tratamiento EM 1), se realizó abono bocashi al sustrato con microorganismos benéficos, obtenidos según metodología de Cárdena (2012), se cargó el biodigestor y se adicionó 50% (del volumen líquido del biodigestor) de agua y 50% (del volumen líquido del biodigestor) de aguas residuales del Centro de Investigación de Tratamiento de Aguas Residuales (CITRAR) de la Universidad Nacional de Ingeniería; Tratamiento 3 (Tratamiento EM 2), se realizó abono bocashi al sustrato con microorganismos benéficos, obtenidos según metodología utilizada por el Instituto Nicaragüense de Tecnología Agraria (INTI), se cargó el biodigestor y se adicionó 50% (del volumen líquido del biodigestor) de agua y 50% (del volumen líquido del biodigestor) de aguas residuales del Centro de Investigación de Tratamiento de Aguas Residuales (CITRAR) de la Universidad Nacional de Ingeniería. El objetivo es comparar la cantidad y la calidad del biogás producido.

La mayor producción de cantidad se obtuvo en el Tratamiento EM 1 en comparación con el Tratamiento C y el Tratamiento EM 2. Los valores máximos en los resultados del porcentaje de metano del biogás producido fueron: Para el Tratamiento C, 58.4% de CH<sub>4</sub>; para el Tratamiento EM 1, 62.3% de CH<sub>4</sub>; para el Tratamiento EM 2, 62% de CH<sub>4</sub>.

**Palabras claves:** Microorganismo benéficos, abono bocashi, Arduino, sensores, biogás.

**ABSTRACT**

The present research work arose from the need to study the influence of various beneficial microorganisms in the production of biogas under controlled temperature conditions. In addition, a biodigester prototype was designed using an embedded system with Arduino. To control the internal temperature, a 1000 Watt resistor was used for internal heating, using an electronic device such as the DS18B20 temperature sensor.

The research began in July 2019 and culminated in March 2020. For the trial, a 60-liter batch biodigester was designed with a real-time internal temperature control system using the Arduino Mega 2560 microcontroller. Manure was used as inoculum. of hen from the farm of the poultry program of La Molina National Agrarian University.

Three treatments were analyzed using the same substrate, which consisted of a mixture of: chicken manure, food waste from the dining room of the National University of Engineering and sawdust. The treatments were: Treatment 1 (Treatment C), the substrate was pre-composted, the biodigester was loaded and water was added; Treatment 2 (Treatment EM 1), bocashi fertilizer was made to the substrate with beneficial microorganisms, obtained according to the methodology of Cárdena (2012), the biodigester was loaded and 50% (of the liquid volume of the biodigester) of water and 50% (of the liquid volume of the biodigester) of wastewater from the Residual Water Treatment Research Center (CITRAR) of the National University of Engineering; Treatment 3 (EM Treatment 2), bocashi fertilizer was made to the substrate with beneficial microorganisms, obtained according to the methodology used by the Nicaraguan Institute of Agrarian Technology (INTI), the biodigester was loaded and 50% (of the liquid volume of the biodigester) of water and 50% (of the liquid

cantidad were added. biodigester) of wastewater from the Wastewater Treatment Research Center (CITRAR) of the National University of Engineering. The objective is to compare the volume and quality of the biogas produced.

The highest volume production was obtained in Treatment EM 1 in comparison with Treatment C and Treatment EM 2. The maximum values in the results of the percentage of methane of the biogas produced were: For Treatment C, 58.4% of CH<sub>4</sub>; for EM Treatment 1, 62.3% CH<sub>4</sub>; for EM Treatment 2, 62% CH<sub>4</sub>.

**Keywords:** Beneficial microorganisms, bocashi compost, arduino, sensors, biogas.

## PROLOGO

La investigación tuvo como propósito evaluar el mejoramiento de la calidad y cantidad de biogás producido a partir de desechos orgánicos del comedor UNI, utilizando microorganismos benéficos y controlando la temperatura mediante biodigestores automatizados.

Durante el desarrollo del trabajo de investigación, se estudió la influencia que tienen los microorganismos benéficos sobre la actividad microbiana en un proceso de biodigestión anaeróbica. Para ello, se utilizaron dos metodologías para la obtención de microorganismos benéficos. La primera fue la realizada por Cárdenas (2012) en la cual, utilizando hígado de res, fuente de microorganismos benéficos; melaza y col, alimento para los microorganismos y agua para establecer un medio acuoso es como se logran activar los microorganismos benéficos, denominados, para fines de la investigación, como EM1. La segunda metodología es del Instituto Nicaragüense de Tecnología Ambiental (INTA), en el cuál utiliza como principal fuente de microorganismo benéficos la levadura, la leche y tierra fértil; melaza como fuente de alimento y agua para establecer un medio acuoso; denominados, para fines de la investigación, como EM2.

Asimismo, se logró diseñar un circuito eléctrico – electrónico para la automatización del control de la temperatura en el interior de los biodigestores, utilizando elementos electrónicos como: microprocesador, relay, sensor de temperatura, entre otros; así como la implementación de un circuito eléctrico mediante una resistencia de 1000W que otorgue calor al sustrato líquido al interior del biodigestor. Con este diseño se logró mantener la temperatura interna, del biodigestor, constante en un rango de 30 a 40 °C, otorgándoles un entorno de temperatura óptima para la actividad microbiana en este proceso de biodigestión anaeróbica.

Para comprobar la hipótesis, se planteó un Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) con 3 tratamiento y 3 repeticiones cada uno. Es así que, el experimento consistió en el diseño de 9 biodigestores bajo las mismas características físicas



dividido en 3 tratamiento: EM1, EM2 y el tratamiento C, que será aquel que no contenga microorganismos.

Los resultados muestran que existe una mejora en la reducción del tiempo para la producción de biogás, sin embargo, la calidad del biogás se mantiene en variaciones no significativas según el resultado del diseño estadístico.

Las recomendaciones apuntan a realizar una mejora en el diseño eléctrico – electrónico e incorporar mayores sensores para el estudio de la variación de los parámetros fisicoquímicos en el interior del biodigestor, así como el uso de microprocesadores a través de la programación en Python. Asimismo, tener presente los errores de conexión que presentan los dispositivos electrónicos. Finalmente, surge la necesidad de impulsar la investigación de la etapa metanogénica durante el proceso de biodigestión, ya que, si bien los microorganismos benéficos influyen en la primera etapa del proceso anaeróbico, no ocurre lo mismo en la producción de metano durante la etapa metanogénica.

## ÍNDICE GENERAL

<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>II</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>III</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>VI</b>
<b>PROLOGO</b> .....	<b>VIII</b>
<b>ÍNDICE GENERAL</b> .....	<b>X</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>INDICE DE TABLAS</b> .....	<b>XIV</b>
<b>INDICE DE IMÁGENES</b> .....	<b>XV</b>
<b>INDICE DE GRÁFICOS</b> .....	<b>XVI</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>2</b>
1.1 <i>GENERALIDADES</i> .....	2
1.2 <i>PROBLEMÁTICA</i> .....	4
1.3 <i>JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN</i> .....	4
1.4 <i>OBJETIVO GENERAL</i> .....	5
1.5 <i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i> .....	5
1.6 <i>HIPÓTESIS</i> .....	6
<b>CAPÍTULO 2: FUNDAMENTO TEÓRICO</b> .....	<b>7</b>
2.1 <i>BIODIGESTOR</i> .....	7
2.2 <i>ABONOS ORGÁNICOS</i> .....	7
2.2.1 <i>Microorganismos en el proceso de compostaje</i> .....	7
2.2.2 <i>Abono Bocashi</i> .....	8
2.2.3 <i>Principales factores en la elaboración del compostaje</i> .....	9
2.3 <i>INÓCULO</i> .....	10
2.3.1 <i>Efectos de la aplicación de microorganismos inoculantes</i> .....	10

2.3.2	Ventajas y desventajas de bocashi frente al compost .....	10
<b>2.4</b>	<b><i>DIGESTIÓN ANAERÓBICA</i></b> .....	<b>11</b>
2.4.1	Hidrólisis .....	13
2.4.2	Acidogénesis .....	13
2.4.3	Acetogénesis .....	14
2.4.4	Metanogénesis .....	15
2.4.5	Microorganismos en cada fase de la digestión anaeróbica .....	16
2.4.6	Beneficios ambientales de la digestión anaeróbica .....	16
<b>2.5</b>	<b><i>BIOGÁS</i></b> .....	<b>16</b>
<b>2.6</b>	<b><i>FACTORES QUE DETERMINAN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS</i></b> .....	<b>18</b>
2.6.1	Bioquímica de las materias primas .....	18
2.6.2	Relación C/N .....	20
2.6.3	Sólidos totales y sólidos volátiles.....	22
2.6.4	Temperatura .....	23
2.6.5	Rangos de pH.....	23
2.6.6	Tiempo de retención hidráulico (TRH) .....	24
2.6.7	Promotores de la metanogénesis .....	24
2.6.8	Agitación.....	25
<b>2.7</b>	<b><i>USOS DEL BIOGÁS</i></b> .....	<b>25</b>
2.7.1	Producción de calor o vapor (combustión) .....	25
2.7.2	Generación de electricidad o sistema híbrido de calor y electricidad .....	26
2.7.3	Combustible para vehículos .....	27
<b>2.8</b>	<b><i>SISTEMA EMBEBIDO ARDUINO</i></b> .....	<b>27</b>
2.8.1	Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) .....	27
2.8.2	Lenguaje de Programación.....	28
2.8.3	Microcontrolador Arduino.....	29
<b>2.9</b>	<b><i>RELAY ARDUINO</i></b> .....	<b>30</b>
<b>2.10</b>	<b><i>PROTOBOARD</i></b> .....	<b>30</b>
<b>CAPÍTULO 3: DISEÑO ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO.....</b>		<b>31</b>
<b>3.1</b>	<b><i>SISTEMA ELÉCTRICO - ELECTRÓNICO</i></b> .....	<b>31</b>
3.1.1	Sistemas de Sensores.....	31
3.1.2	Sistema de control.....	33
3.1.3	Sistema de actuadores .....	34
<b>CAPÍTULO 4: MATERIAL Y MÉTODO .....</b>		<b>38</b>

4.1	<i>TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN</i> .....	38
4.2	<i>UBICACIÓN</i> .....	39
4.3	<i>DURACIÓN</i> .....	39
4.4	<i>Cronograma de actividades</i> .....	40
4.5	<i>MATERIALES, MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS</i> .....	43
4.5.1	Materiales y procedimiento para instalación del circuito eléctrico-electrónico 43	
4.5.2	Diseño del circuito eléctrico-electrónico.....	44
4.5.3	Conexiones del circuito electrónico .....	45
4.5.4	Conexiones del circuito eléctrico .....	46
4.5.5	Materiales y procedimiento para construcción de biodigestores .....	46
4.5.6	Material para activación de Microorganismos Benéficos .....	47
4.5.7	Material para compostaje y abono Bocachi .....	49
4.6	<i>DISEÑO ESTADÍSTICO DEL EXPERIMENTO</i> .....	51
<b>CAPÍTULO 5: RESULTADOS</b> .....		<b>52</b>
5.1	<i>ACTIVACIÓN DE MICROORGANISMOS BENÉFICOS</i> .....	52
5.1.1	Microorganismos benéficos tipo 1 .....	52
5.1.2	Microorganismos benéficos tipo 2 .....	53
5.2	<i>PARÁMETROS DE ENSAYO</i> .....	56
5.2.1	Temperatura .....	56
5.2.2	Cantidad de biogás producido .....	56
5.2.3	Metano producido .....	71
5.2.4	Dióxido de carbono producido .....	76
5.2.5	Análisis estadístico .....	77
<b>CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....		<b>78</b>
6.1	<i>DISCUSIÓN</i> .....	78
6.2	<i>CONCLUSIONES</i> .....	84
6.3	<i>RECOMENDACIÓN</i> .....	86
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....		<b>89</b>
<b>ANEXOS</b> .....		<b>93</b>

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 2-1: Prueba del puño para determinar la humedad ..... 9

Figura 2-2: Diagrama de fases de la digestión anaerobia y los microorganismos involucrados ..... 17

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Efecto de inóculos .....	11
Tabla 2-2: Características del biogás .....	19
Tabla 2-3: Valores promedios aproximados de la relación C/N de algunos residuos .....	22
Tabla 2-4: Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica .....	23
Tabla 2-5: Comportamiento del sustrato en el interior del biodigestor, de acuerdo al valor de pH.....	24
Tabla 2-6: Energía equivalente.....	26
Tabla 3-1: Especificaciones técnicas del sensor DS18B20.....	32
Tabla 3-2: Resistencia pull-up según longitud del cable de datos.....	33
Tabla 4-1: Cronograma de actividades de la investigación .....	42
Tabla 5-1: Registro de la generación diaria de biogás de las unidades experimentales del tratamiento C (compostaje).....	60
Tabla 5-2: Producción diaria de biogás de las unidades experimentales del tratamiento EM 1 (microorganismos benéfico tipo 1).....	63
Tabla 5-3: Producción diaria de biogás de las unidades experimentales del tratamiento EM 2 (microorganismos benéfico tipo 2).....	66
Tabla 5-4: Resumen del análisis estadístico de la producción diaria de biogás .....	69
Tabla 5-5: Resumen del análisis estadístico de la producción acumulada de biogás .....	70
Tabla 5-6: Producción de metano por unidad experimental por fecha de medición .	72
Tabla 5-7: Producción promedio de metano por tratamiento por fecha de medición	72
Tabla 5-8: Resumen del análisis estadístico de la producción de metano.....	75
Tabla 6-1: Balance energético de las unidades experimentales .....	82

**INDICE DE IMÁGENES**

Imagen 2-1: Entorno de Desarrollo Integrado de Arduino .....	28
Imagen 2-2: Uso de código C++ en el IDE de Arduino .....	28
Imagen 2-3: Placa Arduino Mega 2560 .....	29
Imagen 3-1: Sensor DS18B20 y conexiones .....	32
Imagen 3-2: Resistencia de 1000 W .....	36
Imagen 4-1: Residuos de comida preparada del comedor de la Universidad Nacional de Ingeniería .....	38
Imagen 4-2: Mapa de ubicación del proyecto de investigación .....	39
Imagen 5-1: Activación de microorganismos benéficos tipo 1 .....	54
Imagen 5-2: Humedecimiento del abono con microorganismos tipo 1 .....	54
Imagen 5-3: Activación de microorganismos benéficos tipo 2 .....	55
Imagen 5-4: Humedecimiento del abono con microorganismos tipo 2 .....	55
Imagen 5-5: Flotadores utilizados como recipientes de almacenamiento de biogás .....	59
Imagen 5-6: Recipiente para la medición de cantidad de biogás .....	59

**INDICE DE GRÁFICOS**

Gráfico 3-1: Esquema del diseño electrónico.....	31
Gráfico 5-1: Producción diaria de biogás de las unidades experimentales del tratamiento C (Compostaje).....	61
Gráfico 5-2: Cantidad de biogás acumulado de cada unidad experimental del tratamiento C (compostaje).....	61
Gráfico 5-3: Producción diaria de biogás de las unidades experimentales del tratamiento EM 1 (microorganismos benéfico tipo 1).....	64
Gráfico 5-4: Cantidad de biogás acumulado de cada unidad experimental del tratamiento EM1 (microorganismos benéficos tipo 1).....	64
Gráfico 5-5: Producción diaria de biogás de las unidades experimentales del tratamiento EM 2 (microorganismos benéfico tipo 2).....	67
Gráfico 5-6: Cantidad de biogás acumulado de cada unidad experimental del tratamiento EM2 (microorganismos benéficos tipo 2).....	67
Gráfico 5-7: Comparación del volumen de biogás acumulado promedio en cada tratamiento .....	68
Gráfico 5-8: Producción promedio de metano para cada tratamiento.....	74
Gráfico 5-9: Producción promedio de CO <sub>2</sub> para cada tratamiento.....	76



## INTRODUCCIÓN

A pesar de los estudios sobre digestión anaeróbica en biodigestores tipo batch, existen pocos trabajos de investigación donde se controle las variables físico - químicas intervinientes durante el proceso como: pH, temperatura y presión.

El tiempo prolongado que se necesita durante la producción de biogás a temperatura ambiente, conlleva a que se requiera de extensas áreas para disponer de un biodigestor y un gasómetro, lugar donde se almacena el gas. Países como China y Tailandia han sido los pioneros en el desarrollo de biodigestores económicos principalmente para zonas rurales donde se tiene disponible el estiércol, principal componente del sustrato para la digestión, y el espacio necesario para la producción del biogás.

El control de la temperatura interna de los biodigestores representaría una reducción significativa del tiempo en la digestión anaeróbica, otorgándole las condiciones óptimas a los microorganismos que intervienen en cada fase de la producción de biogás. El monitoreo del pH representa una condición indispensable durante el proceso de generación de metano, debido a que una variación del pH en las fases de la digestión anaeróbica podría inhibir la actividad microbiana.

En Perú, la universidad que mayor investigación ha realizado en producción de biogás es la Universidad Nacional Agraria La Molina, dicha universidad presenta trabajos de investigación sobre la influencia de diferentes tipos de estiércol en la calidad del biogás, en la influencia de microorganismos benéficos en la producción de biogás, remoción de gases no combustibles presentes en el biogás como métodos de refinamiento, entre otros; empero no se encuentran estudios donde las variables físico-químicas mencionadas estén controladas y monitoreadas en tiempo real.

En base a dicha indagación sobre producción de biogás se propone estudiar la influencia microorganismos benéficos en condiciones de temperatura controlada utilizando dispositivos electrónicos, elaborando un diseño electrónico integrado al biodigestor para el control de la temperatura y el monitoreo del pH.

## **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

### **1.1 GENERALIDADES**

Varnero (2011) menciona que, el metano tomó un papel protagónico en el transcurso de la segunda guerra mundial a causa de la ausencia de combustibles. Finalizada la guerra, la presencia de combustibles fósiles ocasionó el cese del funcionamiento de las plantas industriales y disminuyó el interés por la digestión anaeróbica. En la década de los 60, India impulsó la tecnología en producción de biogás y en la década de los 70, China fomentó la construcción de biodigestores, ambos países tuvieron como finalidad el aprovechamiento energético del biogás y el uso del biol como biofertilizante (Varnero, 2011). Casos diferentes ocurren en países industrializados, donde el desarrollo de la tecnología en digestión anaeróbica responde a necesidades ambientales más que el aprovechamiento energético, priorizándose como método de estabilización de lodos activados provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas. Algunos países industrializados han impulsados programas de desarrollo de plantas de biogás a escala doméstica (Varnero, 2011).

Según Varnero (2011), en algunos países desarrollados y en vías desarrollo, la digestión anaeróbica ayuda a cubrir tres necesidades básicas: a) Mejorar las condiciones ambientales y sanitarias evitando la contaminación; b) generación de energía limpia para uso doméstico; y c) suministrar material estabilizado (biol) como biofertilizante.

El proceso de digestión anaeróbica tiene 4 fases importantes: Hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis; tienen gran incidencia las bacterias que intervienen en el proceso. Para mejorar la eficiencia en la producción de biogás, es necesario reducir el tiempo de descomposición de las macromoléculas que ocurre durante la hidrólisis, otorgarle condiciones físicas óptimas durante la acidogénesis y acetogénesis y acelerar el crecimiento de bacterias metanogénicas durante la metanogénesis.

Torres (2012), Cárdenas (2012) y Cóndor (2019), utilizaron microorganismos benéficos empleando la metodología bocashi en el proceso de descomposición de las macromoléculas para estudiar su impacto en la producción de biogás en condiciones de temperatura ambiente.

Diversos autores establecen 3 rangos de temperatura para la actividad microbiana: psicrófilico (por debajo de los 25°C), mesófilico (entre 25° C y 45° C) y termófilico (entre 45° C y 65° C)

En general, los biodigestores se diseñan para su funcionamiento en el rango mesófilico, debido a que se puede estabilizar sin requerir grandes transferencias de calor en el interior del biodigestor. Para el óptimo funcionamiento del biodigestor, Chávez y Velazco (2015) recomiendan que las variaciones de temperatura de los biodigestores no excedan los 0.6 – 1.2 °C/día

En la producción de biogás no solo la temperatura determina el crecimiento microbiano entre otras variables tenemos: el pH, la relación carbono – nitrógeno, niveles de sólidos totales y agitación.

Aguilar (2013), planteó el control térmico de un biodigestor de tipo continuo a diferentes temperaturas para las fases de hidrólisis, acetogénesis y metanogénesis. Este es un caso particular del estudio de la influencia de la temperatura en las fases del proceso, empero no permite el estudio de muestras independientes al ser un modelo de varias fases.

Chávez y Velazco (2015), plantean un prototipo automatizado de una micro planta de producción de biogás con un diseño electrónico que utiliza sensores y actuadores para el control de la temperatura, pH y presión interna, así como la automatización de un agitador mecánico.

Basándose en estos antecedentes, el control en los parámetros físico-químicos y la contribución de microorganismos benéficos para aumentar la eficiencia en la producción de biogás toma relevante importancia en la reducción de residuos sólidos orgánicos y en la obtención de fuentes energéticas alternativas.

## 1.2 PROBLEMÁTICA

El estudio del proceso de producción de biogás pese a presentar diversas variables intervinientes entre ellas: temperatura, pH, presión, relación carbono – nitrógeno, nivel de sólidos totales, entre otros, no se realiza un control de todos estos parámetros. Para el caso de la temperatura, usualmente, se estudia a temperatura ambiente dependiendo de la estación del año. Las bacterias que intervienen durante el proceso de digestión anaeróbica en el interior de los biodigestores son muy sensibles a la variación de los parámetros mencionados, especialmente de la temperatura y el pH.

Actualmente la Universidad Nacional Agraria La Molina es quién presenta la mayor cantidad de aporte científico en producción de biogás mediante biodigestores en el Perú, pero sus estudios están enfocados en la influencia que tienen diversos microorganismos en la generación de metano y del volumen de biogás producido, así como en el uso de bacterias para el refinamiento del biogás, de manera puntual, en la eliminación del ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) utilizando bacterias sulforeductoras. Empero, es necesario contar con diseños de biodigestores que puedan controlar la temperatura tanto como el pH para mantener las condiciones óptimas durante el proceso de digestión anaeróbica y estudiar con mayor precisión la influencia que tiene los microorganismos benéficos durante el proceso de producción de biogás.

Bajo estas premisas se plantea la pregunta de investigación: ¿Cuál es la variación porcentual de la calidad y cantidad del biogás producido a partir de desechos orgánicos del comedor UNI, utilizando microorganismos benéficos y controlando la temperatura mediante biodigestores automatizados?

## 1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El Perú promueve el uso de biodigestores a nivel rural, más no a nivel urbano doméstico. Esto se debe a la escasa disponibilidad de estiércol que se puede encontrar en la zona urbana, al espacio para la instalación de biodigestores tubulares u otros diseños adecuados para uso doméstico y, más importante, al prolongado

tiempo del proceso de digestión anaeróbica que condiciona la disponibilidad del metano para su uso como biocombustible doméstico.

Es por tal motivo que la reducción del tiempo para la generación de biogás es de gran importancia para promover el tratamiento de los desechos orgánicos domésticos e incentivar el uso del metano como un biocombustible.

El estudio de la influencia de diversos microorganismos benéficos en la producción de biogás, parte de la necesidad de reducir el tiempo en la descomposición de la materia orgánica para entrar en las siguientes fases de la digestión anaeróbica y así obtener metano en un menor tiempo.

El uso de la tecnología contribuye en el control de los parámetros físico-químicos del proceso de digestión anaeróbica. Debido al bajo costo de los dispositivos electrónicos y el desarrollo de microcontroladores, se pueden diseñar sistemas económicos de control remoto en tiempo real que mejoren el monitoreo de los parámetros intervinientes en la digestión anaeróbica. Es así que, con un diseño eléctrico – electrónico se lograría un ambiente mesofílico (30 - 40 °C) en el interior del biodigestor y así reducir de manera significativa el tiempo de generación de metano hasta en 1/3 con respecto al tiempo de generación en condiciones ambientales.

#### **1.4 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el mejoramiento en la calidad y cantidad del biogás producido a partir de desechos orgánicos del comedor UNI, utilizando microorganismos benéficos y controlando la temperatura mediante biodigestores automatizados.

#### **1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Diseñar un circuito eléctrico-electrónico para el control de la temperatura interna de los biodigestores.

- Determinar la cantidad de biogás producido a partir de desechos orgánicos del comedor UNI, utilizando microorganismos benéficos y controlando la temperatura mediante biodigestores automatizados, en los tratamientos.
- Evaluar la calidad del biogás producido a partir de desechos orgánicos del comedor UNI, utilizando microorganismos benéficos y controlando la temperatura mediante biodigestores automatizados, en los tratamientos.
- Analizar la curva, biogás producido a partir de desechos orgánicos del comedor UNI vs tiempo, al utilizar microorganismos benéficos y un biodigestor automatizado, en los tratamientos.
- Analizar la correlación entre biogás producido a partir de desechos orgánicos del comedor UNI y microorganismos benéficos en un biodigestor automatizado, en los tratamientos.

## **1.6 HIPÓTESIS**

La variación de la calidad y cantidad del biogás producido a partir de desechos orgánicos del comedor UNI, utilizando microorganismos benéficos y controlando la temperatura mediante biodigestores automatizados, aumentará:

- El porcentaje de metano máximo alcanzado, contenido en el biogás producido, en un mínimo de 10%.
- El porcentaje de cantidad de biogás producido en un mínimo de 20%.

## CAPÍTULO 2: FUNDAMENTO TEÓRICO

### 2.1 BIODIGESTOR

López (2011), nos menciona de manera sencilla que un biodigestor es un contenedor hermético, el mismo que puede ser construido con materiales como: metal, ladrillo y cemento o plástico, en el interior de estos recipientes se introduce materia orgánica que en el transcurso del tiempo será descompuesta por un gran número de bacterias, entre las más importante están las bacterias metanogénicas, para la producción de biogás. Se menciona a las bacterias metanogénicas como importantes debido a que son las encargadas de la producción de metano, aprovechado como generador de calor o energía eléctrica.

Biodigestores tipo batch: Este tipo de biodigestores consisten de depósitos herméticos con una salida de biogás conectada a un recipiente de almacenamiento de este biogás llamado gasómetro (Mandujano et al, 1981 citado por Varnero, 2011).

En la presente investigación utilizaremos este tipo de biodigestor porque el objetivo es el estudio de la influencia de microorganismos benéficos bajo el control de la temperatura interna.

### 2.2 ABONOS ORGÁNICOS

Los residuos orgánicos de tipo doméstico, industrial o de cualquiera otra actividad generadora de este tipo de residuos, al ser expuestos al ambiente empiezan un proceso de descomposición oxidativa o fermentación aeróbica. En este trabajo de investigación someteremos a la materia orgánica al proceso de fermentación aeróbica controlando la humedad y la temperatura para su descomposición durante 40 días, a este proceso se le denomina compostaje.

#### 2.2.1 Microorganismos en el proceso de compostaje

Durante este proceso de fermentación anaeróbica los tipos de microorganismos varían dependiendo de los sustratos y las condiciones ambientales del proceso.

Bacterias y hongos se encargan de la fase mesofílica, especialmente de las bacterias del género *Bacillus* sp y en algunos casos existen *Bacillus* termófilos. Entre el 15 – 30 % de la descomposición es realizado por actinomicetes (Soto, 2005 citado por Piedrahita, 2012).

### **2.2.2 Abono Bocashi**

Este abono es una técnica japonesa basada en la aireación constante de la materia orgánica para su descomposición y con temperaturas por debajo de los 45°C hasta reducir la actividad reduciendo la humedad del material (Piedrahita, 2012). Usualmente, para la preparación del Bocashi los agricultores japoneses utilizan materia orgánica como: harina de pescado, semolina de arroz, soya y suelo de bosques como inóculo de microorganismos (EARTH, 2000).

Piedrahita (2012) menciona que, el proceso de fermentación aeróbica con la acción de microorganismos facultativos fermentadores es conocido como abono orgánico fermentado bocashi. Entre estos microorganismos tenemos los productores de ácido láctico, levaduras, hongo, mohos, entre otros. La materia orgánica con microorganismos fermentadores mantiene el proceso de bajas temperaturas, lo que permite que la energía sea aprovechada al máximo al no ser liberada al exterior (Rodríguez, 1994).

Piedrahita (2012), señala los siguientes beneficios del abono bocashi:

- No se forman gases tóxicos ni malos olores.
- La cantidad producido se puede adaptar a las necesidades.
- No causa problemas en el almacenamiento y transporte.
- Desactivación de agentes patógenos.
- El abono se elabora en un periodo corto (dependiendo de la temperatura ambiental en 12 a 24 días).
- El producto puede ser utilizado inmediatamente después de la preparación.
- Bajo costo de producción.



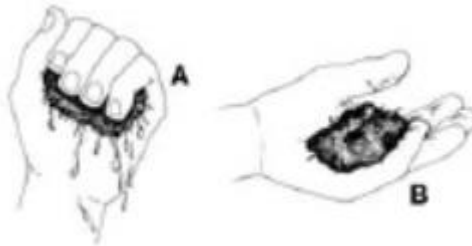
### 2.2.3 Principales factores en la elaboración del compostaje

**Temperatura:** Varía según la actividad microbiana del abono, con el inicio de la mezcla de los componentes del abono. Después de 14 horas luego de su preparación, el abono no debe presentar temperaturas mayores a 50°C (Restrepo, 1996).

**Humedad:** Para un proceso óptimo en la obtención de abono se debe contener entre 50% y 60% de humedad en relación con el peso de la mezcla. Si la humedad es baja, la actividad microbiana disminuye; si la humedad es alta con ausencia de oxígeno, se podría iniciar un proceso de putrefacción debido a que el agua obstruirá el ingreso del oxígeno volviéndose un proceso anaeróbico. Se obtendría como resultado una mezcla de mal olor y textura muy suave por exceso de agua (Picado & Añasco, 2005).

Soto (2005), recomienda el método del puño para corroborar la humedad del proceso de obtención de abono, en cual consiste en apretar con el puño una muestra, luego abrir la mano y si el montón se desmorona está muy seco, si escurre agua es muy húmedo; si se siente la humedad y mantiene su forma al soltarlo, el abono tiene la humedad correcta (Figura 2-1).

**Figura 2-1: Prueba del puño para determinar la humedad**



Fuente: Soto, 2005

A. Muy húmedo    B. Humedad indicada

**Aireación:** Es la presencia de oxígeno en el interior de la mezcla de la materia orgánica, necesaria para la fermentación aeróbica del abono. Se estima que debe

existir una concentración de 6 a 10% de oxígeno en la mezcla. Se debe evitar el exceso de humedad, ya que se crearía un estado anaeróbico al no ingresar oxígeno por los microporos obteniéndose un producto de mala calidad (Picado & Añasco, 2005).

Relación carbono-nitrógeno: La relación ideal para la fermentación óptima del abono es de 25:35, una relación menor traería pérdidas significativas de nitrógeno por volatilización, a diferencia de una relación mayor alargaría el proceso de fermentación (Piedrahita, 2012).

## **2.3 INÓCULO**

Según Piedrahita (2012), es un producto que contiene una cepa o combinación de diferentes cepas de microorganismos vivos, los cuales pueden mejorar la calidad del abono orgánico. El inóculo, en general está compuesto por:

- Microorganismos vivos.
- Medio nutritivo (gallinaza, melaza, entre otros).
- Otros materiales adicionales (vitaminas, aceite vegetal, entre otros)

### **2.3.1 Efectos de la aplicación de microorganismos inoculantes**

El efecto que producen los microorganismos inoculantes son variables según las características de los microorganismos presentes. En muchos casos el efecto no es único, si no se presentan una variedad de efectos.

### **2.3.2 Ventajas y desventajas de bocashi frente al compost**

Según Okumoto (2002), el compostaje es el proceso de descomposición oxidativa, donde las altas temperaturas durante el proceso aseguran la eliminación de microorganismos patógenos que podrían competir por los nutrientes. Mientras que el bocashi se basa en un proceso de descomposición fermentativa que mantiene mayor contenido energético de materia orgánica y al no alcanzar altas temperaturas se tiene menos pérdidas por volatilización, además que otorga otros compuestos (vitaminas, enzimas, aminoácido, ácidos orgánicos, etc.).

Tabla 2-1: Efecto de inóculos

<i>Uso de producto (efecto)</i>	<i>Función de microorganismos</i>
<i>Descomposición de materia orgánica</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aceleración de compostaje.</li> <li>2. Descomposición de materia orgánica en el suelo.</li> </ol>
<i>Mejoramiento del suelo</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Formación de suelo agregado.</li> <li>2. Cambio de pH.</li> </ol>
<i>Efecto nutricional para la planta</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Fijación de N.</li> <li>2. Mineralización (N inorgánico, etc.).</li> <li>3. Nitrificación.</li> <li>4. Biomasa N y P.</li> </ol>
<i>Crecimiento de la planta</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Producción de hormona, vitaminas, etc.</li> </ol>
<i>Control de enfermedades y plagas</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Efecto supresivo a patógenos nematodos.</li> </ol>

Fuente: Okumoto, 2002

## 2.4 DIGESTIÓN ANAERÓBICA

La degradación anaeróbica de la materia orgánica compleja tiene lugar, de manera natural, en diversos ambientes, ya sea en el fondo de los ríos, pantanos, lagunas, vertederos y el tracto digestivo de los humanos (Chynoweth 2001, citado por Ramos, 2014).

Actualmente, la aplicación del proceso de digestión anaeróbica en la degradación de los residuos orgánicos, el tratamiento de las aguas residuales y la estabilización de los lodos activados de las plantas de tratamiento de aguas residuales, se entiende

como una cadena de procesos biológicos complejos, donde los microorganismos degradan la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Ramos (2014) menciona que, durante el proceso anaeróbico, la materia orgánica se transforma en una mezcla de gases conocida como biogás, cuyos principales componentes son: metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), con trazas de nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), vapor de agua, amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y otros componentes dependiendo del sustrato de origen.

Entre los diferentes materiales capaces de ser degradados anaeróbicamente encontramos cualquier tipo de deyecciones ganaderas (estiércol vacuno, oveja y cabra, gallinaza, pollinaza, etc.), cultivos energéticos (cáscara de maíz, microalgas, entre otros), cultivos no energéticos y residuos de cosecha (alfalfa, trigo, cebada, etc.), aguas residuales de origen urbano e industrial (Ramos, 2014).

La principal función que cumplen las bacterias metanogénicas es de enzimas respiratorias. De esta manera, la materia orgánica se transforma completamente en biogás, sin embargo, este biogás presenta diversas trazas de gases que puede complicar el manejo y aprovechamiento del mismo (Varnero, 2011).

El proceso de digestión anaeróbica tiene varias etapas sucesivas, pero normalmente se describen en 4 etapas, aunque algunos autores reducen los procesos a 3 etapas. Para este trabajo de investigación se describirán 4 etapas, estas son: hidrólisis (1), acidogénesis (2), acetogénesis (3) y metanogénesis (4). También se puede encontrar la sulfurogénesis como una etapa alternativa (5) (Ramos, 2014). Los productos de entrada y salida para cada etapa del proceso de digestión anaeróbica se pueden observar en la Figura 2-3.

Cualquier sustrato compuesto de materia orgánica tiene 3 tipos básico de macromoléculas: carbohidratos, proteínas y lípidos.

### **2.4.1 Hidrólisis**

Es el inicio del proceso anaeróbico, donde se encuentran: lípidos, proteínas y carbohidratos, que sufren la ruptura de sus cadenas bioquímicas por enzimas producidas por bacterias acetogénicas o fermentativas, obteniendo compuestos solubles como: ácidos grasos de cadena larga, azúcares y aminoácidos (Ortega, 2006).

La etapa hidrolítica puede ser el proceso que establece un límite en cuanto a la velocidad del proceso, específicamente cuando existe grandes cantidades de residuos con alto contenido de sólidos (Pavlosthatis et al. 1991 citado por castillo, 2012).

Según Ortega (2006) la descomposición de los sustratos da como producto tres tipos básicos de macromoléculas.

- Proteínas: es un sustrato muy importante en el proceso de digestión anaeróbica ya que sus productos tienen un elevado valor nutricional. Las enzimas proteasas actúan sobre las proteínas, las mismas que son hidrolizadas en péptidos y aminoácidos, parte de estos son usados de la síntesis del nuevo material y lo que queda son degradados a sulfuro, amonio, hidrógeno, dióxido de carbono y ácidos grasos volátiles en las siguientes fases del proceso.
- Lípidos: por la acción de enzimas lipasas su descomposición inicia con la ruptura de las grasas dando lugar a ácidos grasos de cadena larga y glicerol.
- Celulosa y hemicelulosa, compuestos principales por lignina, materiales lignocelulósicos, su descomposición es retardada y en consecuencia actúa como limitante del proceso de hidrolítico, debido a la alta resistencia de la lignina a la degradación por parte de las bacterias anaerobias

### **2.4.2 Acidogénesis**

En la acidogénesis las moléculas orgánicas solubles que se produjeron durante la primera fase son degradadas a compuestos acéticos y liberado como productos

hidrógeno y dióxido de carbono que son utilizados directamente por las bacterias metanogénicas. (Ortega, 2006). En esta fase se generan ácidos sin un donador o aceptor externo de electrones (Gujer y Zehnder, 1983 citado por Carhuancho, 2012). En esta etapa, las moléculas orgánicas solubles se fermentan en compuestos que serán usados por las bacterias metanogénicas y compuestos orgánicos más reducidos (Figura 2-3) que serán oxidadas por bacterias acetogénicas (Ortega, 2006). El pH se encuentra en la zona ácida 5.1 a 6.8 (Guevara, 1996 citado por Páucar & Quispe, 2015).

En esta fase se dan los siguientes procesos:

- Fermentación de carbohidratos solubles, la principal ruta metabólica para la degradar ácidos orgánicos a glucosa es Embden – Meyerhof, esta fermentación se realiza por diferentes microorganismos. Los *Clostridium* son los principales microorganismos que convierten la glucosa en butírico, acético, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>.
- Fermentación de aminoácidos, los principales productos son los ácidos grasos de cadena corta, succínico, aminovalérico e H<sub>2</sub>, este proceso no limita la velocidad de degradación de compuestos proteicos. Las bacterias que participan en el proceso son *Clostridium*, *Peptococcus* y *Bacteroides*.
- Oxidación anaerobia de ácidos grasos de cadena larga, estos mediante los mecanismos de  $\beta$ -oxidación son oxidados a ácidos grasos de cadena corta, que es un ciclo en espiral que va liberando un acetil-CoA en cada bucle produciéndose ácido acético. Es importante la acción simbiótica de los microorganismos consumidores de hidrógeno para producir este mecanismo pues en condiciones anaerobias es termodinámicamente inestable.

### **2.4.3 Acetogénesis**

Esta fase intermedia, la degradación de ácidos orgánicos a acetatos, es un proceso de oxidación sin un aceptor de electrones, por lo cual se necesita organismos que oxidan los ácidos orgánicos para utilizar un aceptor de electrones adicional como el ion hidrógeno o el CO<sub>2</sub>, y estos son consumidos por organismos metanogénicos (Bastone et. al 2002 citado por Paucar & Quispe, 2015). El pH se encuentra en la zona ácida 6.6 y 6.8 (Guevara, 1996 citado por Paucar & Quispe, 2015).

En tanto que, algunos resultados de la fermentación pueden ser metabolizados organismos metanogénicos, otros deben ser convertidos en productos más simples a través de bacterias acetogénicas (*Syntrophomas wolfey* y *Syntrophobacter wolini*) (Ortega, 2006).

#### **2.4.4 Metanogénesis**

La metanogénesis es llevada a cabo por un grupo particular de microorganismos productores de metano, representados por 83 especies. Todos los microorganismos son anaeróbicos estrictos, presentando una tasa de crecimiento menor que del resto de microorganismos implicados en la digestión (García et al. 2000),

Las arqueobacterias metanogénicas pueden utilizar sólo un número restringido de sustratos, principalmente acetato, hidrógeno, y dióxido de carbono. Pueden clasificarse, según el sustrato que utilizan en dos grupos: hidrogenofílicas y acetoclásticas (Ruiz, 2002).

Las metanogénicas hidrogenofílicas como *Methano bacterium*, *Methanococcus* y *Methanobrevi bacter*; utilizan el hidrógeno y el dióxido de carbono, permitiendo disminuir la presión parcial de hidrógeno, y producen aproximadamente un 30% del metano, (Ferry, 1992 citado por Paucar & Quispe, 2015).

Las acetoclásticas producen el 70% restante a partir de acetato. Se encuentran reagrupadas en solo 9 especies y los géneros *Methanosaeta* (*Methanotrix*) y *Methanosarcina*, son los más frecuentemente encontrados en un digestor. Por lo general, los dos géneros compiten por el sustrato (Ruiz, 2002 citado por Paucar & Quispe, 2015).

La metanización de la materia orgánica puede llevarse a cabo en condiciones psicrófilas (6 a 15 °C), mesófilas (25 a 40 °C) y termófilas (más de 45 °C), no obstante, la digestión se realiza generalmente en régimen mesófilo o termófila, lo que implica un sistema de regulación de la temperatura. El pH óptimo para los productores de metano se encuentra entre 6,5 y 7,2, un pH de 6,2 en el medio (condiciones ácidas) representa una aguda toxicidad para las arqueobacterias metanogénicas (Ruiz, 2002

citado por Paucar & Quispe, 2015); mientras que para Mandujo et al. (1981) citado por Paucar & Quispe (2015) el pH óptimo está entre 6,7 a 7,5.

#### **2.4.5 Microorganismos en cada fase de la digestión anaeróbica**

Los microorganismos involucrados durante el proceso de digestión anaeróbica dependen del sustrato que será degradado.

Durante las dos primeras fases del proceso anaeróbico, intervienen alrededor de 128 órdenes de 58 especies y 18 géneros de bacterias. Entre las principales tenemos: *Clostridium*, *Ruminococcus*, *Eubacterium*, y *Bacteroides*. Las últimas fases del proceso, se identifican bacteria metanogénicas, hasta ahora se han identificado 81 especies, de 23 géneros, 10 familias y 4 órdenes (Varnero, 2011).

#### **2.4.6 Beneficios ambientales de la digestión anaeróbica**

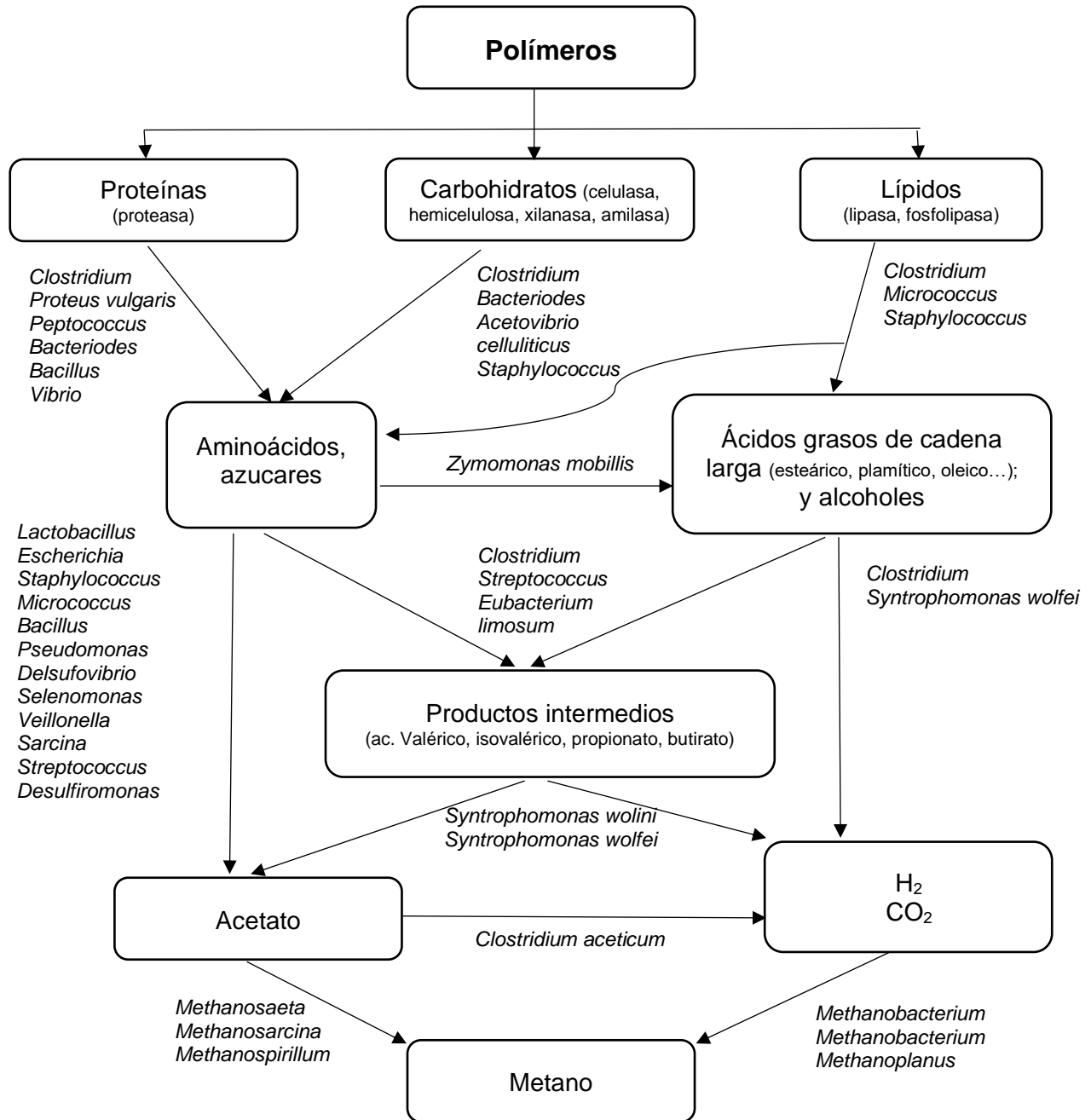
El biogás al ser generado por materia orgánica, representa una fuente de energía renovable y tanto como el gas natural, el biogás puede ser utilizado de diferentes maneras como: gas de uso doméstico, lámparas, entre algunas más. Otro beneficio importante de aprovechar la tecnología de digestión anaeróbica es la reducción en la generación de residuos orgánicos y por ende la disminución de la presión de los rellenos sanitarios para el tratamiento, así como la protección a las aguas subterráneas, reduciendo el riesgo de lixiviación.

### **2.5 BIOGÁS**

El biogás es una mezcla de gases principalmente está compuesto por metano y dióxido de carbono, también contiene trazas de otros gases los cuales son considerados impureza, entre ellos: ácido sulfhídrico, amoníaco, vapor de agua, dióxido de carbono, oxígeno, entre otros. Si el biogás contiene un porcentaje de metano mayor a 45%, este biogás es inflamable (Varnero, 2011). Las características generales del biogás se indican en la Tabla 2-2.



**Figura 2-2: Diagrama de fases de la digestión anaerobia y los microorganismos involucrados**



Fuente: Ramos, 2014 que adaptó de Stronach y col. 1986.

La producción de biogás en biodigestores a partir de desechos orgánicos genera beneficios como: obtención de gas natural aprovechable para cocinas o generación eléctrica, obtención de fertilizante, reducción de la contaminación por residuos orgánicos y estabilización de aguas servidas domésticas.

## **2.6 FACTORES QUE DETERMINAN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS**

Es importante tener en cuenta la influencia que ejercen diversos factores en la producción de biogás. Las bacterias metanogénicas son altamente susceptible a los cambios en las condiciones ambientales.

Los investigadores evalúan la tasa de generación de metano como un indicador de desempeño del sistema anaeróbico, debido a que el proceso de digestión anaeróbica requiere de un cuidadoso monitoreo de las condiciones ambientales, las cuales son: temperatura (mesofílica y termofílica), tipo de materia prima, pH, nutrientes, concentración de trazas de minerales, entre otros.

### **2.6.1 Bioquímica de las materias primas**

En el proceso de fermentación metanogénica se puede utilizar diversas materias primas como: residuos orgánicos de origen animal, vegetal, agroindustrial, doméstico, forestal entre otro.

El proceso microbiológico de la producción de biogás no solo requiere de carbono y nitrógeno, además debe existir un balance con las sales minerales (magnesio, cobalto, selenio hierro, manganeso, azufre, fósforo, potasio, calcio, molibdeno, zinc, níquel, tungsteno, entre otros elementos menores). Usualmente la materia orgánica como los estiércol y lodos cloacales presentan estos elementos en proporciones adecuadas (Varnero, 2011).

Tabla 2-2: Características del biogás

<i>Características</i>	<i>Valores</i>
<i>Composición</i>	55 – 70% de metano (CH <sub>4</sub> ) 30 – 45% de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) Trazas de otros gases
<i>Contenido energético</i>	6.0 – 6.5 kW h m <sup>-3</sup>
<i>Equivalente de combustible</i>	0.60 – 0.65 L petróleo/m <sup>3</sup> biogás
<i>Límite de explosión</i>	650 – 750 °C (con el contenido de metano mencionado)
<i>Presión crítica</i>	74 – 88 atm
<i>Temperatura crítica</i>	-82.5 °C
<i>Densidad normal</i>	1.2 kg m <sup>-3</sup>
<i>Olor</i>	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
<i>Masa molar</i>	16.043 kg kmol <sup>-1</sup>

Fuente: Deublein y Steinhauser (2008) citado por Varnero (2011)

Según Varnero (2011), los sustratos se pueden clasificar en 4 clases de sustratos:

Sustratos de clase 1: Pueden degradarse de manera eficiente en biodigestores tipo batch.

Sustratos de clase 2: Esta clase es degradada de forma eficiente en biodigestores de operación continua.

Sustratos de clase 3: Presentan una dilución mayor y en consecuencia una Demanda Química de Oxígeno (DQO) menor, por ellos su tratamiento debe ser con digestores de alta eficiencia, los filtros anaeróbicos pueden ser una buena opción.

Sustratos de clase 4: Por su alto contenido de Demanda Química de Oxígeno (DQO), para mayor eficiencia debe ser degradado en procesos anaeróbicos.

Por lo tanto, se tendrá una dinámica diferente en la producción de biogás según la composición bioquímica

### **2.6.2 Relación C/N**

En general todo residuo orgánico puede descomponerse y producir biogás bajo la influencia de la digestión anaeróbica, así también la calidad y la cantidad del biogás generado es dependiente de la composición de la materia orgánica a utilizar. Según Varnero (2011), los nutrientes tienen que estar en concentraciones mayores de los niveles óptimos para las bacterias metanogénicas, ya que por ausencia de nutrientes se inhiben.

El nitrógeno y el carbono sirven como nutrientes de las bacterias metanogénicas. El carbón es una fuente energética y el nitrógeno se utiliza para la generación de nuevas células. La relación de consumo de estas bacterias es 30:1 entre carbono y nitrógeno, por tal motivo esta es la relación mínima, hasta un mínimo de 20:1 (Varnero, 2011).

De acuerdo a Varnero (2011), la descomposición de la materia prima con un contenido alto de carbono, con una relación superior de 35:1, presenta lentitud en su composición, ya que disminuye la multiplicación de bacterias por falta de nitrógeno; empero la producción de biogás toma mayor tiempo. Caso contrario, en una relación C/N menor de 8:1, la actividad microbiana es inhibida debido a la formación excesiva de amonio.

Por lo mencionado, cuando no se obtiene un sustrato con la relación C/N apropiada, es necesario realizar con materiales altos en C o altos en N, dependiendo del caso, para lograr la relación C/N óptimas

Varnero (2011) recomienda calcular la relación C/N de la mezcla utilizando la fórmula:

$$L = \frac{K1 * C1 + K2 * C2 + K3 * C3 \dots Kn * Cn}{M1 * C1 + M2 * C2 + M3 * C3 + \dots Mn * Cn}$$

L = C/N el sustrato.

K = % de carbono en cada insumo.

M = % de nitrógeno en cada insumo.

C = Peso fresco de cada insumo, expresado en kg.

Una variante que podemos realizarle a la fórmula proporcionada por Varnero (2011), sería la siguiente:

$$L = \frac{K1/M1 * C1 + K2/M2 * C2 + K3/M3 * C3 \dots + Kn/Mn * Cn}{C1 + C2 + C3 + \dots + Cn}$$

L = Relación Carbono-Nitrógeno de cada insumo.

K/M = relación carbono-nitrógeno contenido en cada materia prima.

C = Peso fresco de cada materia, expresado en kg.

**Tabla 2-3: Valores promedios aproximados de la relación C/N de algunos residuos**

<i><b>Materiales</b></i>	<i><b>%C</b></i>	<i><b>%N</b></i>	<i><b>C/N</b></i>
<i><b>Residuos animales</b></i>			
Bovinos	30	1.30	25:1
Equinos	40	0.80	50:1
Ovino	35	1.00	35:1
Porcinos	25	1.50	16:1
Caprinos	40	1.00	40:1
Conejos	35	1.50	23:1
Gallinas	35	1.50	23:1
Patos	38	0.80	47:1
Pavos	35	0.70	50:1
Excretas humanas	2.5	0.85	3:1

Fuente: Varnero y Arellano, 1991 citado por Varnero, 2011.

### **2.6.3 Sólidos totales y sólidos volátiles**

Los residuos orgánicos están compuestos de aguas y un porcentaje de sólidos denominada sólidos totales (ST). Para un proceso óptimo, los sólidos totales toman un gran protagonismo en la mezcla.

La carga en biodigestores no continuos no sobrepasar más de un 8% a 12% de sólidos totales para garantizar un óptimo funcionamiento, en contraste con los biodigestores continuos que tienen entre 40% a 60% de sólidos totales (Varnero, 2011).

#### 2.6.4 Temperatura

La temperatura afecta significativamente la actividad biológica, por consiguiente, la producción de biogás. Según Care Perú (2016), teóricamente la temperatura de degradación anaeróbica fluctúa entre 3° y 70°C.

Chávez y Velasco (2015), nos menciona que existen tres rangos de temperatura para el desarrollo de microorganismos anaeróbicos (Tabla 2-4).

**Tabla 2-4: Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica**

<b>Fermentación</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Óptimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Tiempo de fermentación</b>
<b><i>Psycrophilica</i></b>	4-10 °C	15-18 °C	20-25°C	Sobre 100 días
<b><i>Mesophilica</i></b>	15-20 °C	25-35 °C	35-45 °C	30 – 60 días
<b><i>Thermophilica</i></b>	25-45 °C	50-60 °C	75-80 °C	10 – 15 días

Fuente: Varnero, 2011

Chávez y Velasco (2015) también mencionan que, para un óptimo funcionamiento del biodigestor, es recomendado que el diseño para el tratamiento anaeróbico opere con variaciones de temperatura de entre 0.6 y 1.2 °C por día. Para el presente trabajo de investigación el rango de temperatura del proceso de digestión anaeróbica será de 30°C y 40°C, debido a las limitaciones en el diseño del circuito eléctrico-electrónico.

#### 2.6.5 Rangos de pH

Olaya (2009) menciona que, el pH está en función de la concentración de CO<sub>2</sub> en el interior del biodigestor, de la concentración de alcalinidad y ácidos volátiles de la materia prima. Los microorganismos generadores de biogás son sensibles a las variaciones de pH, oscilando entre 6 y 8; sin embargo, un valor deseable se encuentra entre 7 y 7.2 (Tabla 2-5). Debido a la importancia del pH en la producción de biogás, será fundamental la medición del parámetro químico en la presente investigación.

### 2.6.6 Tiempo de retención hidráulico (TRH)

En Care Perú (2016) se señala que, el TRH es la media del tiempo que dura el sustrato en el interior del biodigestor, donde las bacterias digieren la materia orgánica y producen biogás. Para los fines de la presente investigación con biodigestor tipo batch el tiempo de retención hidráulico tiene el mismo significado que el tiempo de fermentación. El circuito eléctrico-electrónico estará diseñado para fluctuar la temperatura entre 30°C y 35°C, por lo que el TRH estará entre 30 y 35 días.

**Tabla 2-5: Comportamiento del sustrato en el interior del biodigestor, de acuerdo al valor de pH**

<i>pH</i>	<i>Comportamiento</i>
7 – 7.2	Óptimo
6.2	Retarda la acidificación
7.6	Retarda la amortización

Fuente: Olaya, 2009

### 2.6.7 Promotores de la metanogénesis

Existen diversos tipos de microorganismos que aumentan la actividad microbiana según la fase de la fermentación anaeróbica, así como parámetros físico-químicos que pueden mejorar o disminuir el rendimiento en la producción de biogás. En general se tiene promotores e inhibidores.

Promotores: Fomentan la degradación de la materia orgánica y aumentan la producción de biogás, entre ellas: enzimas, urea, sales inorgánicas, carbonato de calcio (aumenta el contenido de metano del biogás), entre otras.

En la presente investigación se utilizarán microorganismos benéficos para aumentar la carga bacteriana que degradará con mayor rapidez la materia orgánica.



Inhibidores: Afecta la actividad microbiana y disminuye el rendimiento en la producción de biogás, entre ellas: alta concentración de ácidos volátiles, más de 2000 ppm en la fermentación mesofílica y 3600ppm en la fermentación termofílica podría llegar a cancelar el proceso anaeróbico (Chávez y Velasco, 2015).

### **2.6.8 Agitación**

Salazar (2016), menciona que la agitación es un promotor en la metanogénesis, ya que ayuda en la remoción de los metabolitos generados por los microorganismos metanogénicos, combinando el sustrato con los microorganismos en el interior del biodigestor evitando la formación de costra.

Varnero (2011), describe un digestor de mezcla completa sin recirculación el que consiste en mantener una distribución uniforme de concentraciones tanto de microorganismos y sustratos. Esta uniformidad se consigue mediante un sistema de agitación, este tipo de biodigestor ha dado los mejores resultados y es el comúnmente usado para los residuos.

## **2.7 USOS DEL BIOGÁS**

Las opciones para utilizar el biogás son diversas, en las cuales destaca la combustión y entre las menos usuales están la generación de electricidad y combustible de vehículos. El potencial energético del biogás es menor al potencial energético del gas natural, gas propano y gas metano (Tabla 2-15).

### **2.7.1 Producción de calor o vapor (combustión)**

El uso más común es la obtención de energía térmica (combustión). Se utiliza para actividades básicas como cocinar y para el calentamiento del agua en aquellos lugares donde los combustibles son escasos.

### 2.7.2 Generación de electricidad o sistema híbrido de calor y electricidad

Varnero (2011), menciona que los sistemas híbridos de electricidad y calor usan la electricidad que puede generar el biogás producido, otros sistemas generan calor y como subproducto la electricidad, y algunos sistemas producen electricidad y el calor para calentar el agua del proceso. Se obtiene mayor eficiencia los sistemas donde el uso del biogás es utilizado para la combustión.

**Tabla 2-6: Energía equivalente**

<b>Valores</b>	<b>Biogás</b>	<b>Gas Natural</b>	<b>Gas Propano</b>	<b>Gas Metano</b>	<b>Hidrógeno</b>
<i>Valor Calorífico (Kwh/m<sup>3</sup>)</i>	7.0	10	26	10	3
<i>Densidad (t/m<sup>3</sup>)</i>	1.08	0.7	2.01	0.72	0.09
<i>Densidad con respecto al aire</i>	0.81	0.54	1.51	0.55	0.07
<i>Límite de explosión (% de gas en el aire)</i>	6-12	5-15	2-10	5-15	4-80
<i>Temperatura de encendido</i>	687	650	470	650	585
<i>Máxima velocidad de encendido en el aire (m/s)</i>	0.31	0.39	0.42	0.47	0.43
<i>Requerimiento teórico de aire (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)</i>	6.6	9.5	23.9	9.5	2.4

Fuente: Varnero, 2011

### **2.7.3 Combustible para vehículos**

Para el uso de biogás en vehículos, la calidad de dicho biogás debe tener similar calidad al gas natural, debido al condicionamiento actual de los vehículos para el funcionamiento con gas natural.

Según Varnero (2011), el biogás producido usualmente es transformado en combustible para motores de combustión interna. También nos mencionan que su difusión está limitada por los siguientes problemas:

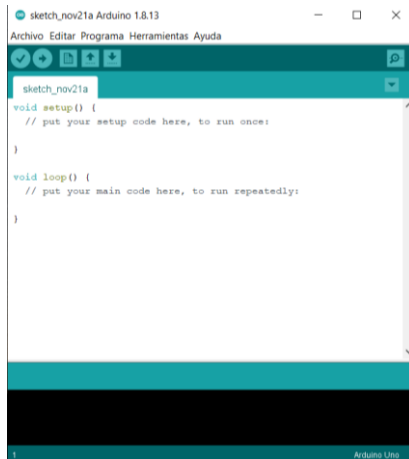
- El biogás debe ser almacenado a en contenedores cilíndricos de alta presión (200 a 300).
- La conversión de los motores es costosa.
- La ausencia de una red que pueda abastecer y distribuir, así como el uso energético en la compresión a gran escala.

## **2.8 SISTEMA EMBEBIDO ARDUINO**

Para la presente investigación se utilizó un sistema embebido Arduino para el control interno de la temperatura en los biodigestores, esta temperatura tuvo una fluctuación de 5° cuyo rango fue entre 30° a 35°, con el objetivo de brindarle óptimas condiciones físicas para la actividad microbiana en el interior de los biodigestores.

### **2.8.1 Entorno de Desarrollo Integrado (IDE)**

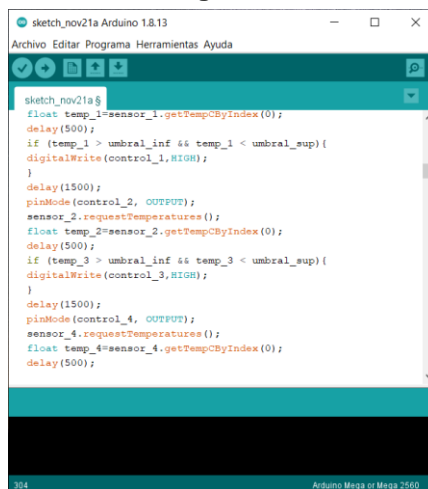
Para esta investigación se utilizó el entorno de desarrollo integrado de Arduino, el mismo que consiste en una aplicación multiplataforma, es decir, puede ser utilizado en Windows, macOS, Linux, etc.; su utilidad es escribir y cargar programas en placa compatibles con Arduino.

**Imagen 2-1: Entorno de Desarrollo Integrado de Arduino**

## 2.8.2 Lenguaje de Programación

El lenguaje admisible en este IDE es: C y C++, utilizando reglas de estructura de código de programación. Las bibliotecas a utilizarse son suministradas por el mismo IDE de Arduino.

En el presente trabajo se utilizará el lenguaje C++, cuyo código de programación se puede encontrar en el Anexo 1.

**Imagen 2-2: Uso de código C++ en el IDE de Arduino**

### 2.8.3 Microcontrolador Arduino

Arduino es una plataforma que se utiliza para el prototipado de electrónica que cuenta con software y hardware de fácil uso. Existe una variada gama de microcontroladores Arduino, en ellos: Arduino Uno, Arduino Mega 2560, Arduino Nano, entre otros. Para cumplir los objetivos de la presente investigación utilizaremos el Arduino Mega 2560, debido al mayor número de entradas y salidas para la conexión de sensores. Con la ayuda del microcontrolador se diseñará un circuito electrónico para el control de la temperatura interna de los biodigestores. Las principales características de la placa Arduino son las siguientes:

- Circuito integrado programable capaz de realizar múltiples operaciones entre ellas operaciones matemáticas complejas a gran velocidad.
- La placa Arduino se alimenta mediante puerto USB mientras se está programando, finalizando la programación se puede desconectar del ordenador, dejándolo trabajar de forma autónoma, alimentado el Arduino mediante una fuente de alimentación externa o pila de 9v.
- Tanto los pines de entrada como salidas proporcionan información al sistema y realizan diferentes acciones.

Arduino Mega contiene la siguiente distribución de pines:

- Dispone de 54 pines digitales, de los cuales 15 ofrecen una salida de modulación por ancho de pulso (PMW)
- Dispone de 16 pines analógicos serigrafiadas desde A0 hasta A15.
- Dispone de 5 pines GND para la conexión a tierra.
- Dispone de 3 pines de alimentación de 5V y 1 pin de alimentación de 3.3V.

**Imagen 2-3: Placa Arduino Mega 2560**



## **2.9 RELAY ARDUINO**

Un relay es un interruptor que se puede activar mediante una señal eléctrica. El relay para Arduino es un pequeño electroimán que cuando se excita mueve la posición de un contacto eléctrico de “conectado” a “desconectado” y viceversa.

El relay para Arduino tiene los siguientes terminales: Normalmente Cerrado (NC), Normalmente abierto (NO) y Común. Un interruptor esta Normalmente Abierto (NO) si cuando no hay actuación, el circuito está abierto y por lo tanto no permitirá el paso de la corriente hasta que haya actuación. El interruptor Normalmente Cerrado (NC) funciona de modo contrario, deja pasa la corriente hasta que haya actuación, cerrando el paso a la corriente.

## **2.10 PROTOBOARD**

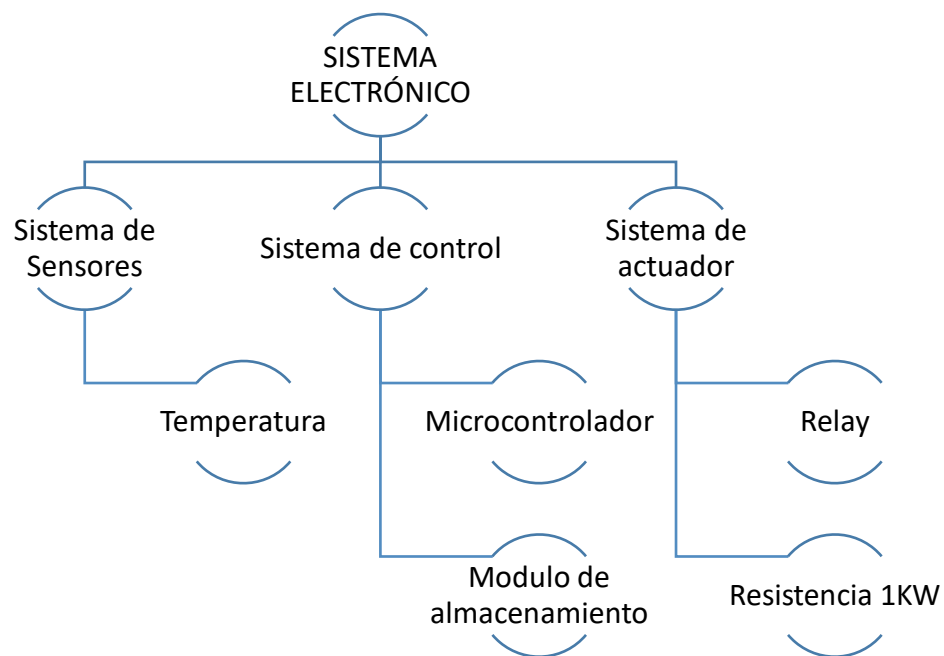
La protoboard es una placa de prueba en los que se inserta elementos electrónicos y cables con los que se puede armar circuitos electrónicos sin la necesidad de soldar ninguno de los componentes. El funcionamiento de la protoboard es mediante filas de orificios conectados entre sí por medio de pequeñas láminas metálicas. La protoboard será muy necesaria para la presenta investigación porque nos permitirá probar el diseño del circuito electrónico para el control de la temperatura interna de los biodigestores, sin la necesidad de soldar o desoldar componentes.

## CAPÍTULO 3: DISEÑO ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO

### 3.1 SISTEMA ELÉCTRICO - ELECTRÓNICO

El esquema del diseño electrónico fue el siguiente:

Gráfico 3-1: Esquema del diseño electrónico



#### 3.1.1 Sistemas de Sensores

En el presente trabajo el sistema de sensores, que para este caso solo será el sensor DS18B20, sensor de temperatura, es el encargado de medir las magnitudes físicas, es decir, la temperatura interna de los biodigestores durante el periodo de tiempo del experimento. La finalidad es transformarlas en variables eléctricas que puedan ser almacenadas en una base de datos para ser empleadas mediante algoritmos de control para al accionar de los actuadores.

### A) Sensor de Temperatura.

El sensor de temperatura es un instrumento electrónico que se encarga de realizar la lectura de una temperatura en el interior de los biodigestores.

La técnica de medición se le denomina RDT (Resistance temperature detector), la cual consiste en la detección de los cambios que experimenta su resistor interno debido a la variación de la temperatura, considerándose, de esta manera, una medición indirecta.

Imagen 3-1: Sensor DS18B20 y conexiones



Tabla 3-1: Especificaciones técnicas del sensor DS18B20

<b>ESPECIFICACIONES</b>	
<b>Rango de temperatura</b>	-55 a 125°C
<b>Resolución</b>	de 9 a 12 bits
<b>Precisión</b>	±0.5°C (de -10°C a 85°C)
<b>Tiempo de captura</b>	inferior a 75 Ω
<b>Alimentación</b>	3v a 5.5v



Además, se debe tener en cuenta el uso de resistencia pull-up que deberá ser colocada entre los cables de alimentación y la comunicación del dispositivo electrónico, según la longitud del cable de datos (Tabla 3-2). Para esta investigación la longitud del cable de datos será menor a 5 metros, es así que la resistencia pull-up que se usará será de 4.7k $\Omega$ .

**Tabla 3-2: Resistencia pull-up según longitud del cable de datos**

<i>RESISTENCIA PULL-UP</i>	<i>Longitud del cable</i>
<b>4.7 k<math>\Omega</math></b>	0 – 5 metros
<b>3.3 k<math>\Omega</math></b>	5 – 10 metros
<b>2.2 k<math>\Omega</math></b>	10 – 20 metros
<b>1.2 k<math>\Omega</math></b>	20 – 50 metros

Fuente: Especificaciones del dispositivo electrónico

### 3.1.2 Sistema de control

Para el sistema de control del circuito eléctrico-electrónico se utilizará el microcontrolador Arduino Mega 2560 ya que, dentro de la gama de Arduino, el Mega posee más pines de ingreso y salida, los mismos que serán necesarios por la cantidad de pines que se utilizarán en la conexión de los 9 biodigestores del experimento. El módulo de almacenamiento consta de recipientes de plástico donde se almacenará el biogás que obtendremos de la actividad microbiana en el interior de los biodigestores. El relay es un dispositivo electrónico que permitirá el pase de la corriente eléctrica necesaria para calentar la resistencia de 1000w y esta a su vez transfiera calor a interior del biodigestor manteniendo la temperatura en el rango óptimo.

### **A) Microcontrolador**

El Arduino Mega tiene la ventaja de poseer la mayor cantidad de pines digitales, lo que lo hace ideal para su uso en el experimento, ya que se requerirá una gran cantidad de pines digitales para la conexión del sensor de temperatura y la comunicación con el dispositivo electrónico relay de los 9 biodigestores. Para casos donde se utilice uno, dos o tres biodigestores, se podría utilizar el Arduino Uno, ya que tiene menor costo y posee los pines necesarios para la conexión de los mismos.

### **B) Módulo de almacenamiento**

El módulo de almacenamiento es necesario para realizar las mediciones del biogás que se obtendrá producto de la actividad microbiana en el interior del biodigestor. La propiedad física que utilizaremos para la medición del biogás es por desplazamiento de cantidad. Se acondicionó un recipiente hermético lleno de agua, con una entrada para el ingreso del biogás y por desplazamiento de cantidad, tendremos la cantidad de biogás producido por cada biodigestor.

#### **3.1.3 Sistema de actuadores**

Un actuador es un dispositivo que utiliza la energía para transformarla en movimiento o, en algunos casos, es utilizada para otorgar movimiento. La energía es tomada de una fuente externa (puede ser energía creada por líquido, aire o electricidad, que es nuestro caso en el uso del relay) y la convierte en el movimiento que deseamos ejecutar. Para esta investigación, el sistema de actuador que utilizaremos es el eléctrico, mediante el uso del relay conectado a una resistencia eléctrica de 1000W, el mismo que otorgará calor al interior del biodigestor.

Se eligió el sistema de actuador eléctrico debido a la facilidad de su uso y la disponibilidad en el mercado, su requerimiento es muy frecuente debido a que no requiere de aceites ni aire comprimido para operar, pero sí dependen del uso de una fuente externa como una batería o mediante la alimentación, como es nuestro caso, del Arduino en conexión en serie.

## A) Relay

Un relay es un interruptor que se puede activar mediante una señal eléctrica. El relay para Arduino es un pequeño electroimán que cuando se excita mueve la posición de un contacto eléctrico de “conectado” a “desconectado” y viceversa.

El relay para Arduino tiene los siguientes terminales: Normalmente Cerrado (NC), Normalmente abierto (NO) y Común. Un interruptor esta Normalmente Abierto (NO) si cuando no hay actuación, el circuito está abierto y por lo tanto no permitirá el paso de la corriente hasta que haya actuación. El interruptor Normalmente Cerrado (NC) funciona de modo contrario, deja pasa la corriente hasta que haya actuación, cerrando el paso a la corriente.

Para el uso del relay enviaremos ordenes mediante el uso del lenguaje de programación C++, según el Anexo 1. Las ordenes enviadas son las siguientes:

```
int control_1 = 21; / Se define la variable de comunicación “control_1” en el pin “21”.
```

```
int umbral_inf = 30; / se define el límite mínimo de 30°
```

```
int umbral_sup = 40; / se define el límite máximo de 40°
```

```
  if(temp_1 < umbral_inf && temp_1 > 0){
```

```
    digitalWrite(control_1,LOW);
```

```
} / en esta parte del código se introduce una condicional que dice: “Si la temperatura de lectura del sensor es menor a 30 °C y mayor a 0 °C (se da esta condición mayor a 0°C por medida de seguridad porque ante un mal contacto en los cables el resultado arrija “-127” y sin esta condición el código ordenaría conmutar el relay para calentar el agua mediante el paso de la corriente a la resistencia, haciendo que no tenga tope), entonces el relay conmuta permitiendo el pase de la energía eléctrica a la resistencia de 1000W, es decir se mantiene en Normalmente Cerrado (NC)”
```

```
if (temp_1 > umbral_inf && temp_1 < umbral_sup){  
  digitalWrite(control_1,HIGH);
```

} / en esta parte del código se introduce una condicional que dice: “Si la temperatura de lectura del sensor es superior a 30 °C y menor a 40 °C, entonces el relay no ejecuta acción alguna, es decir se mantiene en Normalmente abierto (NO)”

### **B) Resistencia eléctrica**

El actuador principal para la investigación es una resistencia de 1000 watts y un voltaje alimentación de 220 voltios (Imagen 3-2), colocadas a 40 centímetros de altura en el interior del biodigestor mediante una empaquetadura y contratuerca de bronce.

Este tipo de resistencia está diseñada para la transferencia de calor en contacto con un fluido como: aceite, disoluciones ácidas o básicas, agua, entre otros. Para esta investigación el fluido será agua y se deberá tener un estricto cuidado porque si no existe contacto con el fluido la resistencia se llagaría a recalentar hasta el punto de destruirse debido a las altas temperaturas a la que estaría sometida.

**Imagen 3-2: Resistencia de 1000 W**



Las resistencias a utilizarse son de 1000 watts con una alimentación de 220 voltios, en base a estos datos la corriente consumida sería:

$$I = \frac{\textit{Potencia}}{\textit{voltaje}}$$

$$I = \frac{1000 \textit{ watts}}{220 \textit{ voltios}}$$

$$I \cong 4.6 \textit{ Ampere}$$

Para esta investigación, se utilizará 9 resistencia distribuidas una en cada biodigestor, cuya corriente total sería aproximadamente 41.5 ampere. Sin embargo, con el uso de un multímetro se midió el amperaje en cada una de las resistencias y se observó que el registro máximo fue de 3.83 ampere y el mínimo, de 3.54 ampere. Esto nos indica que la resistencia no utiliza la potencia total de diseño. Con esta nueva medida se calculó un amperaje máximo de 34 ampere.

Teniendo en cuenta el amperaje máximo a utilizarse para los experimentos, se realizó las coordinaciones con la persona responsable de las instalaciones eléctricas de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería, asegurando que el uso del amperaje no ocasionaría problemas como cortocircuito debido a los picos de amperaje.

## CAPÍTULO 4: MATERIAL Y MÉTODO

### 4.1 TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

De acuerdo a su fin, la investigación, fue de tipo aplicada (Tresierra 2000 citado por Saldarriaga 2013) debido a la superposición de conocimientos básico sobre digestión anaeróbica y microorganismos benéficos para la producción de biogás, generando conocimientos científicos en energías limpias aplicables a los tratamientos de desechos orgánicos y aguas residuales domésticas, así como en las actividades agropecuarias.

De acuerdo al diseño de contrastación, fue experimental verdadera (Tresierra 2000 citado por Saldarriaga 2013) porque estuvo orientada a evaluar el mejoramiento en la calidad y cantidad del biogás producido a partir de residuos orgánicos generados en el comedor UNI, utilizando microorganismos benéficos y controlando la temperatura mediante biodigestores automatizados, de esta manera determinar su influencia en la actividad metanogénica del proceso de la digestión anaeróbica. Los residuos orgánicos obtenidos para el experimento, se generaron de los restos de comida generados después de su preparación en el comedor de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI); residuos tales como: arroz preparado, camote sancochado, papa sancochada, zanahoria sancochada, arveja y cascaras de mandarina.

**Imagen 4-1: Residuos de comida preparada del comedor de la Universidad Nacional de Ingeniería**



## 4.2 UBICACIÓN

Las fases de construcción y experimental se realizaron en la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería (Anexo 8), en la parte superior del Laboratorio de Ingeniería de Higiene y Seguridad Industrial, al costado del Centro de Energías Renovables (Imagen 4-2).

## 4.3 DURACIÓN

La Investigación tuvo una duración de 9 meses, la cual tuvo inicio el 15 de julio del 2019 y culminó el día 15 de marzo del 2020.

En el cuadro 6 se detallan las actividades de la investigación, las fechas de inicio, las fechas de fin y la duración de cada una de ellas.

**Imagen 4-2: Mapa de ubicación del proyecto de investigación**



Fuente: SAS PLANET, obtenida de Google Satélite con zoom 24.

El lugar es un espacio construido en el 2018 por la Facultad de Ingeniería Ambiental de la UNI para la ejecución de proyectos de investigación de profesores y alumnos, en ella se construyó

el Centro de Energías Renovables de la FIA-UNI y 3 ambientes más para fines de investigación. En uno de estos ambientes se realizó el trabajo de investigación bajo el permiso del Decano de la FIA y la autorización del jefe de infraestructura.

#### **4.4 Cronograma de actividades**

Las actividades que se desarrollarán en el presente trabajo de investigación se dividen en 4 etapas (ver Tabla 4-1):

1. Diseño y construcción de biodigestores: en esta etapa se realizará el diseño del biodigestor que será empleado en la construcción de los 9 biodigestores. El diseño consta de: una salida para medición del volumen de biogás con un diámetro de  $\frac{1}{2}$ " , una salida para la medición del pH con un diámetro de  $\frac{1}{2}$ " , un orificio para el agitador mecánico con un diámetro de 1" y un brazo del agitador de un diámetro de  $\frac{1}{2}$ " , un orificio para la salida del sensor de temperatura de aproximadamente  $\frac{1}{10}$ " de diámetro y un orificio para el acoplamiento de la resistencia de 1000W con diámetro de 1". Además, en esta etapa se realizaron las pruebas de hermeticidad para evitar fugas por los orificios realizados, cuya prueba consistió en llenado del biodigestor con agua y observar las posibles fugas.
2. Diseño e instalación del circuito eléctrico-electrónico: este diseño fue elaborado con la colaboración de un estudiante de ingeniería mecatrónica de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería y la instalación se realizó con la colaboración de un estudiante de ingeniería electrónica de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Ingeniería. El diseño del circuito dio como resultado el uso de un microcontrolador para ejecutar las acciones que se requieran para mantener la temperatura en el rango de 30°C y 40°C, mediante el uso de un sensor de temperatura y una resistencia eléctrica de 1000W, la misma que será puesta en funcionamiento por medio de un relay. Para las conexiones del circuito



electrónico se utilizaron conectores jumper, cable de 30AWG y protoboard. Así mismo, con el uso de un multímetro se midió el amperaje en cada resistencia eléctrica cuyos resultados estuvieron el rango de 3.5 A y 4 A.

3. Elaboración de sustratos y activación de microorganismos: esta etapa inicia con la recolección de materia prima para activación de microorganismos benéficos, compostaje y abono bocashi. Se realizarán 3 tratamientos, de los cuales en 2 de ellos se utilizarán microorganismos benéficos y el tercer tratamiento será con un pre-compostaje. Una vez activados los microorganismos, estos se envían a un laboratorio para el conteo de microorganismos en la muestra. Durante el preparado de compostaje y abono bocashi para cada tratamiento, se debe tener en cuenta el tiempo que llevará la preparación, de tal manera que los tratamientos estén listos en la misma fecha para evitar perjuicio en alguno de los tratamientos. Esta etapa finaliza con el cargado de los biodigestores para designar cada unidad experimental. (Anexo 3)
4. Fase experimental: para finalizar, en esta etapa se monitorea los parámetros de ensayo los cuales son: temperatura, cantidad de biogás producido y metano contenido en el biogás. El biogás será llevado a un laboratorio para obtener el porcentaje de metano contenido en el biogás, este porcentaje de metano será el indicador para determinar la calidad del biogás generado. Adicional del metano, el análisis nos arrojará datos como: dióxido de carbono, monóxido de carbono, ácido sulfhídrico, vapor de agua y oxígeno.

Tabla 4-1: Cronograma de actividades de la investigación

<i>Ítem</i>	<i>Actividades</i>	<i>Fecha de inicio</i>	<i>Fecha de culminación</i>	<i>Duración (días)</i>
1.1	Diseño de biodigestores	05/07/19	14/07/19	10 días
1.2	Construcción de biodigestores	20/07/19	11/08/19	23 días
1.3	Pruebas de hermeticidad	14/08/19	18/08/19	5 días
2.1	Diseño de circuito eléctrico - electrónico	18/08/19	03/09/19	17 días
2.2	Instalación y pruebas del circuito eléctrico - electrónico	04/09/19	01/09/19	28 días
3.1	Recolección de materia prima para activación de Microorganismos Benéficos, compostaje y abono bocashi	03/10/19	26/11/19	55 días
3.2	Activación de los Microorganismos Benéficos tipo 1	19/10/19	01/10/19	13 días
3.3	Activación de los Microorganismos Benéficos tipo 2	03/09/2019	01/10/19	28 días
3.4	Envío de Microorganismo Benéficos para su análisis	02/10/2019		1 día
3.5	Elaboración de pre-compostaje	11/12/2019	20/01/2020	41 días
3.6	Elaboración de abono Bocashi	11/01/2020	25/01/2020	15 días
3.7	Cargado de biodigestores	31/01/2020	01/01/2020	2 días
4.1	Fase experimental (monitoreo de T°, cantidad y calidad del biogás)	08/02/2020	06/03/2020	28 días
	Redacción del trabajo de investigación	10/03/2020	20/04/2020	42 días

## **4.5 MATERIALES, MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS**

### **4.5.1 Materiales y procedimiento para instalación del circuito eléctrico-electrónico**

Controlar la temperatura de los biodigestores es un factor importante, es así que, se pretende implementar un circuito electrónico para mantener una temperatura óptima de rango 30°C - 40°C, para el desarrollo de los microorganismos en el interior del biodigestor. Esto se logrará utilizando un hardware de código abierto (open-source) llamado "Arduino Mega 2560". Previamente en el interior del biodigestor se instalará un sensor de temperatura y una resistencia para el calentamiento interno. Los materiales a utilizarse son los siguientes:

- 1 tarjeta Arduino Mega 2560
- 3 protoboards
- 15m de alambre calibre 22
- 2 paquetes de conectores jumper macho – macho de 20 cm
- 2 paquetes de conectores jumper macho – hembra de 30 cm
- 2 paquetes de conectores jumper macho – hembra de 40 cm
- 1 cautín
- 1 rollo pequeño de estaño
- 1 pasta para soldar
- 1 cable USB para tarjeta Arduino
- Resistores de 4,7k ohm para sensores de temperatura
- 50 terminales amarillos para alambre calibre 22
- 40 terminales azules para alambre en pernos de resistencias.
- 9 relés compatibles para tarjeta Arduino
- 1 cinta aislante 3M
- 20 metros de cable mellizo de 16 AWG
- 9 resistencias de 1000w y 240v
- 9 tuercas delgadas de bronce de 1"
- 5 juntas de silicona gris marca Sika de 95g

- 9 sensores de temperatura DS18B20
- 9 enchufes
- 3 extensiones para 3 enchufes cada uno
- 1 alicate
- 1 destornillador
- 1 tijera
- 1 cutter

#### **4.5.2 Diseño del circuito eléctrico-electrónico**

El objetivo de instalar un circuito eléctrico-electrónico es proporcionar el calor necesario para mantener la temperatura interna en el rango de 30 a 40 °C, otorgándole de esta manera las condiciones óptimas para el crecimiento microbiano. Para ello se utilizará un sensor de temperatura DS18B20 en el interior del biodigestor, este dispositivo electrónico registrará la temperatura en tiempo real; en el exterior del biodigestor, los cables del sensor estarán conectados en la tarjeta de Arduino Mega 2560, visualizando la temperatura en la pantalla de una laptop, habiendo instalado previamente el software Arduino. También, se conectarán los cables del relay a la tarjeta de Arduino como un pin de salida, por el otro extremo del relay se instalará un circuito eléctrico abierto en serie con una resistencia eléctrica de 1000W, la misma que está en el interior del biodigestor (Ver Anexo 2). La función de dispositivo electrónico relé será cerrar el circuito eléctrico para permitir el paso de la corriente eléctrica para ser convertida en calor mediante la resistencia eléctrica; es así que, se convertirá la energía eléctrica en energía calorífica para ser transferida a la mezcla acuosa en el interior del biodigestor logrando mantener una temperatura constante. Para lograr estas acciones en cada uno de los dispositivos eléctricos y electrónicos, se deberá introducir un código de programación en lenguaje C++ en el Entorno de Desarrollo (IDE) que forma parte del software Arduino (ver Anexo 1). El código de programación conlleva a las siguientes acciones:

*“El sensor de temperatura enviará sus lecturas al microcontrolador Arduino Mega 2560. Cuando la temperatura esté por debajo de 30°C, Arduino enviará el mensaje al*

*relay para que este conmute y cierre el circuito eléctrico, entonces la resistencia empezará a calentar internamente el biodigestor hasta que se llegue a 40°C, en este punto Arduino enviará un mensaje al relay para abrir el circuito e impedir el paso de la corriente. De esta manera, se mantendrá la temperatura en el rango de 30°C – 40°C”.*

#### **4.5.3 Conexiones del circuito electrónico**

El circuito electrónico de la presente investigación será el receptor de la información de temperatura y el responsable de enviar las señales para la ejecución del calentamiento interno de biodigestor. Los dispositivos electrónicos a emplearse son: microcontrolador Arduino Mega 2560, sensor de temperatura DS18B20 y relay.

Las conexiones del sensor de temperatura DS18B20 estará basada en sus 3 cables de color: rojo, negro y amarillo. El cable rojo es la alimentación o voltaje de corriente continua (VCC) cuyo voltaje es 5 voltio, convencionalmente se le otorga el signo positivo “+”. El cable negro es el punto a tierra o Ground (GND), convencionalmente se le otorga el signo negativo “-“. El cable amarillo será la comunicación, es decir, por allí se transmitirá las señales de corriente continua en miliampere (mA). Para el correcto funcionamiento del sensor se deberá utilizar una resistencia pull-up de 4.7 k $\Omega$  (Tabla 3-2).

El relay mediante los pines jumper recibirá información para abrir o cerrar el circuito eléctrico, permitiendo el pase del flujo eléctrico que proporcionará la energía para calentar en interior del biodigestor. El modelo de relay que se utilizará en la investigación cuenta con 4 relays en serie, el mismo que contiene una entrada para voltaje de corriente continua (VCC), una entrada para el Ground (GND) y 4 entradas para la comunicación en cada relay.

La conexión de 9 sensores de temperatura y 9 relay al microcontrolador, superará el número de pines disponibles en un Arduino. Tomándose en consideración esta apreciación, se conoce que el microcontrolador cuenta con limitadas salidas y entradas de pines (Imagen 2-3). Para lograr estas conexiones se determinó utilizar protoboards que sirvan de puentes para reducir el número de pines utilizados en el microcontrolador.

#### 4.5.4 Conexiones del circuito eléctrico

El circuito eléctrico tiene como objetivo proporcionar el calor necesario para mantener la temperatura interna en el rango establecido. Los componentes con los que se contará son: resistencia de 1000W, módulo relay de 4 relays y cable mellizo de 16 AWG.

Las conexiones el circuito eléctrico tienen mayor relevancia en los extremos eléctrico del relay, una hebra de un extremo del cable mellizo será conectado en normalmente abierto (NO) y la otra hebra, en común (COM); el extremo eléctrico normalmente cerrado (NC) quedará libre. El otro extremo del cable mellizo irá conectado a un voltaje de 220 V. La hebra que está conectado a NO será cortada por la mitad para que cada uno de estos extremos generados se conecten a la resistencia eléctrica (Anexo 2). Formando, finalmente, el circuito eléctrico que dependerá de las órdenes recibidas por el relay.

#### 4.5.5 Materiales y procedimiento para construcción de biodigestores

El diseño de biodigestores consistirá en diversas partes funcionales: salida del biogás, salida del biol y paleta homogenizadora. Los materiales a utilizarse son:

##### Salida de biogás:

- 9 niples especiales de PVC de  $\frac{1}{2}$ " x 4"
- 9 llaves de paso de PVC de  $\frac{1}{2}$ "
- Contratuercas de  $\frac{3}{4}$ "
- 9 empaquetaduras de  $\frac{3}{4}$ "
- 9 niples de  $\frac{1}{2}$ "
- 9 uniones universales
- 9 reducciones de bronce de  $\frac{1}{2}$ " a  $\frac{3}{8}$ "

##### Salida de biol

- 9 llaves de paso de PVC de  $\frac{3}{4}$ "
- 9 niples especiales de PVC de  $\frac{3}{4}$ " x 4"

- 9 contratuercas de  $\frac{3}{4}$ "
- 9 empaquetaduras de  $\frac{3}{4}$ "

#### **Agitador mecánico**

- 18 codos de PVC de  $\frac{1}{2}$ "
- 18 "T" de PVC de  $\frac{1}{2}$ "
- 18 tapas de PVC de  $\frac{1}{2}$ "
- 10 metros de tubería de PVC de  $\frac{1}{2}$ "

#### **4.5.6 Material para activación de Microorganismos Benéficos**

Los Microorganismos Benéficos tipo 1: serán activados según la metodología utilizada por Cárdenas, 2012. Los materiales a utilizarse para esta activación serán los siguientes:

- 10 litros de agua hervida
- 1kg de sal
- 3kg de melaza
- 10 kg de col fresca
- 3kg de hígado de res
- Bidón de 60 litros con grifo de salida para medición de pH.

#### **Procedimiento**

En el bidón, acondicionado previamente, se vertirá 10 litros de agua hervida e inmediatamente se añadió 3kg de col y 3 kg de hígado, picados previamente en pequeños trozos. Según Cárdenas (2012) en estos ingredientes se encuentran la mayoría de microorganismos benéficos tipo 1 a activar (lactobacilos, mohos, levaduras, etc.).

Finalmente se agregará 1 kg de sal y 3kg de melaza, ingrediente rico en azúcar para proveer de alimento a los microorganismos benéficos (Cárdenas, 2012). Los ingredientes serán mezclados, terminado con el cierre de hermético del bidón. La activación de los microorganismos tipo 1 deberá realizarse en condiciones anaeróbicas.

Según Barren (2003) citado por Cárdenas (2012), el pH requerido para la activación de los microorganismos deberá ser menor de 4.0 y mayor a 3.5, ya que valores superiores a 4.0 indicarían que la solución activada ha sido dañada por microorganismo no deseables.

Según Cárdenas (2013), el tiempo de activación de los microorganismos benéficos deberá ser entre 7 a 10 días cuyo indicador final será el aroma dulce de la mezcla.

Una vez se logre la activación de los Microorganismos Benéficos tipo 1, estos serán enviados a laboratorio de microbiología Marino Tabusso de la Universidad Nacional Agraria La Molina para el recuento de levaduras y bacterias ácido lácticas

Los Microorganismos Benéficos tipo 2: serán activados según la metodología utilizada por el Instituto Nicaragüense de Tecnología Agraria (INTA, 2011). Los materiales a utilizarse para esta activación serán los siguientes:

- 10 litros de agua hervida
- 2 litros de melaza
- 1 litro de leche
- 300g de levadura
- ½ kg de tierra fértil
- Porción de tela o saco para la tierra fértil
- Tela para tapar el cilindro
- Reciente de 5 litros para la mezcla

### **Procedimiento**

Según el procedimiento de Instituto Nicaragüense de Tecnología Agraria (INTA), se verterá 2 litro de melaza, este ingrediente aportará la energía para la activación de los microorganismos benéficos tipo 2.

Luego, se verterá el litro de leche, ingrediente importante que aportará los nutrientes necesarios para la activación de microorganismos. La mezcla se deberá homogenizar constantemente para que la melaza quede totalmente diluida con la leche, tornándose de un color café.



Después, se colocará la tierra fértil junto con la levadura en el interior de la tela o saco atada, de tal manera que la tierra se conserve en el interior de la misma, para luego introducirla en la mezcla homogenizada de melaza con leche.

Es así que, la levadura ayudará al crecimiento de los microorganismos en la tierra fértil, la melaza proporciona la energía y la leche, los nutrientes para la activación.

Finalmente, se procederá a tapar el recipiente con tela de algodón, de tal manera se impida el ingreso de insectos a la mezcla debido al contenido de melaza y leche. La activación de los microorganismos benéficos tipo 2 debe realizarse en condiciones aeróbicas.

Una vez se logre la activación de los Microorganismos Benéficos tipo 2, serán enviados a laboratorio de microbiología Marino Tabusso de la Universidad Nacional Agraria La Molina para el recuento de levaduras y bacterias ácido lácticas.

#### **4.5.7 Material para compostaje y abono Bocachi**

El material a utilizarse para la elaboración del pre-compostaje y abono Bocashi será:

- 70 kg de gallinaza de 3 meses
- 70 kg de estiércol fresco (1 semana) de gallina.
- 50 kg de materia orgánica
- 30 kg de aserrín
- Plástico de 20m x 2m
- 1 palana pequeña
- Guantes
- Agua
- Microorganismos Benéficos tipo 1 y tipo 2.

#### **Procedimiento**

Se optará por utilizar gallinaza de aproximadamente 3 meses para facilitar el proceso del compostaje. Utilizando los equipos de protección personal como guantes y mascarilla, se recolectarán 100kg, aproximadamente, de gallinaza.

De igual manera, se realizarán las gestiones necesarias para conseguir 70 kg de gallinaza fresca que se utilizarán como inóculo en el proceso de digestión anaeróbica. Se procederá a recolectar la gallinaza en un bidón de 70 litros, previamente acondicionado.

También, se gestionará la recolección de 30 kg de aserrín distribuido en 2 bolsas en las instalaciones de alguna carpintería. Así mismo, se gestionará la recolección de 50 kg de desechos orgánicos, para empezar con el proceso de compostaje.

El pre-compostaje consistirá en la homogenización de la gallinaza (3 meses), del estiércol fresco de gallina, los desechos orgánicos y el aserrín, este último será necesario porque otorgará la cantidad de carbono para establecer una proporción C/N de 30; posteriormente, se procederá al volteo de la mezcla para fomentar la aireación y el humedecimiento durante el tiempo de compostaje. Para esta actividad se utilizará una pequeña pala, guantes y bata de laboratorio, donde la remoción de la mezcla se realizará diariamente y el humedecimiento con agua cada 3 o 4 días dependiendo de la humedad contenida en dicha mezcla (Anexo 4).

Para los Tratamientos 2 y 3, durante el proceso de pre-compostaje, se adicionarán los microorganismos benéficos con frecuencia de 2, 3 o 4 días dependiendo de la humedad del abono, vertiéndose un total de 15 litros de solución de microorganismos benéficos en cada tratamiento. Según EARTH (200), para comprobar dicha humedad se corroborará mediante la prueba del puño, la misma que consistirá en comprimir un puñado de la mezcla en la mano, esta deberá quedar como una unidad sin desmoronarse y sin que gotee el líquido, sin embargo, al tocarse el puñado con el dedo deberá desmoronarse fácilmente (Anexo 5)

Para EARTH (2000), el proceso de fermentación durará entre 7 a 30 días, dependiendo de los materiales que utilice y la temperatura del ambiente. El bocashi estará listo para su uso cuando emane un olor dulce fermentado y cuando aparezcan hongos blancos en la superficie. También se menciona que el bocashi se deberá utilizar lo antes posible luego de su elaboración, si es necesario su almacenamiento, se deberá colocar sobre un piso de cemento, colocarlo bajo sombra y luego colocarse

en bolsa plástica. Se adiciona que, el bocashi podrá ser utilizado entre 5 a 21 días después de preparado.

Según Torres (2012), la mezcla se fermentará muy rápido bajo condiciones aeróbicas. Es así que la elaboración del abono bocashi finalizará en 15 días aproximadamente.

#### **4.6 DISEÑO ESTADÍSTICO DEL EXPERIMENTO**

La parte experimental será planteada con un Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) con 3 tratamientos y 3 repeticiones cada uno. Se considerará este tipo de diseño debido a que existe una fuente de variación adicional a los tratamientos como es el tiempo y la temperatura. Para este caso se considerará como unidad experimental a los biodigestores, puesto que la unidad experimental es aquella a la cual se aplica un tratamiento. La presente tesis contará con 9 unidades experimentales.

En el Análisis Estadístico de Datos, para la validación estadística de los datos se utilizará el coeficiente de análisis de varianza (ANVA) y la prueba de Tukey con un intervalo de confianza al 95%, la cual permitirá evaluar la significancia de todas las diferencias entre tratamientos a un 95% de confianza.

Para que haya diferencia significativa entre los promedios de los resultados que se obtendrá, el valor de  $p$ , que significa probabilidad, deberá ser menor al valor del nivel de error optado, en este caso  $\alpha = 5\% = 0,05$ . En las tablas de ordenación de los promedios de los resultados que se obtendrá en cada tratamiento la prueba de Tukey los ordenará en subgrupos homogéneos, es decir cuyo promedio no será significativamente diferente.

## **CAPÍTULO 5: RESULTADOS**

En el presente capítulo mostraremos los resultados obtenidos en la producción de biogás bajo el control de la temperatura y el monitoreo del pH en todo el proceso fermentativo, además del diseño e implementación de biodigestores automatizados con el uso del microcontrolador Arduino Mega 2560. Es importante conocer las razones por la cual controlamos y monitoreamos los parámetros de temperatura y pH, con el fin de llegar a conclusiones acertadas sobre el comportamiento que tienen estos parámetros físicos, así como el efecto en el proceso anaeróbico.

### **5.1 ACTIVACIÓN DE MICROORGANISMOS BENÉFICOS**

La activación de microorganismos fue realizada según cronograma de actividades obteniendo resultados favorables en su activación. Transcurrido el tiempo de activación, se extrajo dos muestras de 500 ml de cada grupo de microorganismos eficientes para su análisis en laboratorio. Los análisis que se realizaron fueron:

- Análisis de mohos y levaduras
- Análisis de bacterias ácido lácticas

#### **5.1.1 Microorganismos benéficos tipo 1**

Para la activación de los microorganismos benéficos tipo 1 se eligió la metodología utilizada por Cárdenas (2013) (Ver Capítulo 4). El tiempo de activación de los microorganismos benéficos fue de 10 días y cuyo indicador de aroma dulce de la mezcla fue corroborado.

Las características que presentó fue el color marrón oscuro y de olor dulce (Imagen 5-1). Obtenida la activación de microorganismos, se efectuó el humedecimiento del abono preparado cada 2 días durante 15 días obteniendo un abono bocachi con microorganismos tipo 1 (Imagen 5-2).

Los resultados de análisis del laboratorio de microbiología obtenidos del INFORME DE ENSAYO N° 1910412 – LTM (Ver Anexo 7) de la Universidad Nacional Agraria La Molina fueron:

- Recuento de levaduras,  $67 \times 10^4$  UFC/ml; y
- Recuento por bacterias ácido lácticas,  $< 1$  UFC/ml.

### **5.1.2 Microorganismos benéficos tipo 2**

Para la activación de los microorganismos benéficos tipo 2 se eligió la metodología utilizada por el Instituto Nicaragüense de Tecnología Agraria (INTA) (Ver Capítulo 4). El tiempo de activación de los microorganismos benéficos fue de 17 días y cuyo indicador de aroma dulce de la mezcla fue corroborado.

Las características que presentó fue la formación de una nata en la parte superior color marrón claro, el color debajo de la nata fue marrón oscuro y de olor dulce (Imagen 5-3). Obtenida la activación de microorganismos, se efectuó el humedecimiento del abono preparado cada 2 días durante 20 días obteniendo un abono bocachi con microorganismos tipo 2 (Imagen 5-4).

Los resultados de análisis del laboratorio de microbiología obtenidos del INFORME DE ENSAYO N° 1910413 – LTM (Ver anexo XX) de la Universidad Nacional Agraria La Molina fueron:

- Recuento de levaduras,  $69 \times 10^3$  UFC/ml; y
- Recuento por bacterias ácido lácticas,  $89 \times 10$  UFC/ml.

**Imagen 5-1: Activación de microorganismos benéficos tipo 1**



**Imagen 5-2: Humedecimiento del abono con microorganismos tipo 1**



**Imagen 5-3: Activación de microorganismos benéficos tipo 2**



**Imagen 5-4: Humedecimiento del abono con microorganismos tipo 2**



## **5.2 PARÁMETROS DE ENSAYO**

Los parámetros que fueron estudiados son:

### **5.2.1 Temperatura**

El ensayo empleó un control de temperatura, enfocándose en la producción de biogás durante el proceso anaeróbico, en el rango de 30 °C y 40 °C.

El registro de la temperatura se mostró en el “monitor serie”, el mismo que forma parte del entorno de desarrollo integrado (IDE). El registro de la temperatura aproximadamente cada 27 segundo como se muestra en el anexo 1.

La temperatura fue monitoreada en el horario de 8 am a 10 pm en los espacios del Centro de Energías Renovables de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería. Cabe señalar, que en el horario de 10pm a 8am se desconectó el circuito eléctrico-electrónico por medidas de seguridad.

La temperatura tuvo un crecimiento promedio de 1 °C por cada 8 minutos cuando la resistencia de 1000W se ponía en funcionamiento. Es así que, el incremento de la temperatura de 30°C a 40°C tenía una duración aproximada de 1 hora con 20 minutos. Así mismo, el decrecimiento de la temperatura, al estar en contacto con el medio, fue de 1°C cada 1 hora a 1h con 30 minutos. De esta manera, el descenso térmico de 40°C a 30°C fue aproximadamente 12 horas.

Tras las pruebas de temperatura, se observó un registro con el número “-127” y “89”, esto se debe falta de recepción de la información al microcontrolador y/o a la débil señal enviada desde el sensor DS18B20.

### **5.2.2 Cantidad de biogás producido**

La medición del volumen del biogás producido es un parámetro fundamental para el cálculo de la eficiencia de los microorganismos benéficos en la generación de biogás, para ello se requiere elegir recipientes para el almacenamiento que permitan el ingreso del biogás y se eviten las fugas. Es así que, la medición del volumen de biogás



producido durante la fase experimental fue recolectado en flotadores de plástico de una capacidad de 12 litros (Imagen 5-5). Una vez almacenado el biogás, se calculó su cantidad mediante el principio físico de desplazamiento de volúmenes. Para ello se construyó un recipiente con una capacidad de 10 litros de agua, un orificio de ingreso de biogás y una tubería para la salida del agua desplazada por el biogás producido (Imagen 5-6).

Los flotadores fueron adaptados para que el diámetro de salida del biodigestor sea compatible con el diámetro de entrada del flotador. Para ello se utilizó reducciones de  $\frac{1}{2}$ " a  $\frac{3}{8}$ " junto a una unión universal (Capítulo 4). El ingreso de biogás del recipiente empleado para el desplazamiento de cantidad consta de una llave de paso junto a una unión universal, de tal manera que esta se empalme con la unión universal del flotador, de esta manera se evita la pérdida de cantidad de biogás al instante de pasar el flotador del biodigestor hacia el recipiente para la medición del volumen producido.

La prueba que se realizó para fugas de biogás en flotadores fue mediante una inspección empírica, sumergiendo el flotador lleno de aire en agua y verificando que no se produzca burbujeo.

Para la prueba de hermeticidad del recipiente utilizado en la medición de volúmenes, se ingresaron 5 litros de aire en el interior del recipiente para luego medir la cantidad de agua desplazado. Aquí se obtuvieron 4.90 litros de agua, apreciándose un error del 2% en la medición del volumen de biogás producido.

La cantidad de biogás producido en el tratamiento C comenzó su registro a partir del segundo día de haber iniciado el proceso de digestión anaeróbica. Los registros del volumen de biogás del tratamiento C se tomaron a partir 7:00 pm de cada día (Tabla 5-1). Durante los 26 días de registro los resultados muestran un pico de 6.30 litros por día en la unidad experimental C2 (Tabla 5-1), la generación promedio para la unidad experimental C1 fue 2.87 l/día; para la unidad experimental C2, 3.27 l/día y para la unidad experimental C3, 3 l/día, obteniéndose una generación promedio para el tratamiento C (compostaje) de 3.05 litros por día. Con un intervalo de confianza de 0.36 l/día, se obtuvo que el límite inferior de la generación promedio diaria para el

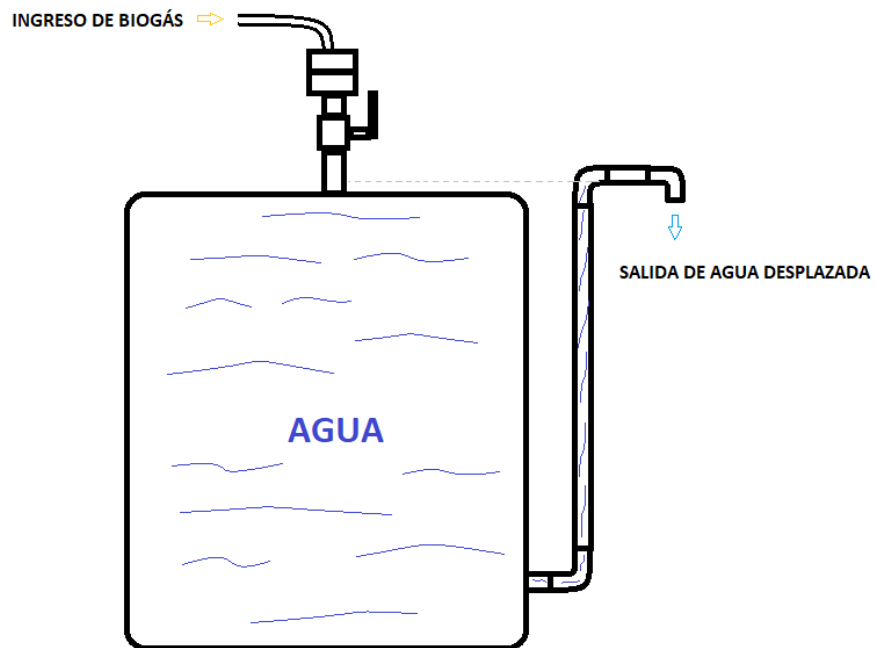
tratamiento C es de 2.68 l/día y el límite superior de la generación promedio diario para el tratamiento C es de 3.41 l/día (Tabla 5-4).

La cantidad acumulado de biogás producido a los 26 días para la unidad experimental C1 es de 74.50 litros; para la unidad experimental C2, 85.10 litros; para la unidad experimental C3, 78.10 litros, obteniéndose un volumen acumulado promedio de biogás producido de 79.23 litros para el tratamiento C (compostaje). Con un intervalo de confianza de 13.39 litros, se obtuvo que el límite inferior del volumen acumulado promedio de biogás producido para el tratamiento C es de 65.84 litros y el límite superior del volumen acumulado promedio de biogás producido para el tratamiento C es de 92.62 litros (Tabla 5-5).

**Imagen 5-5: Flotadores utilizados como recipientes de almacenamiento de biogás**



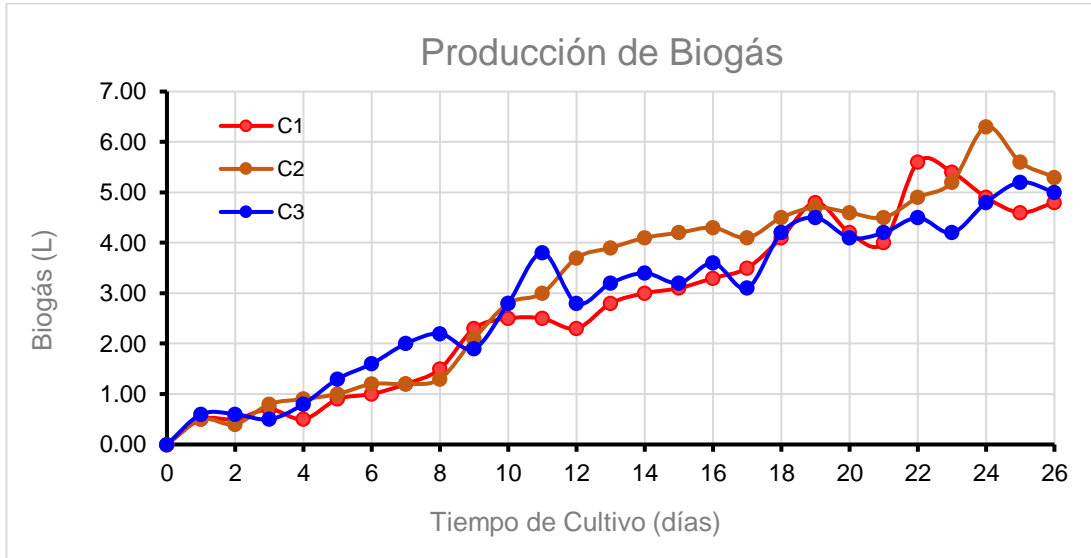
**Imagen 5-6: Recipiente para la medición de cantidad de biogás**



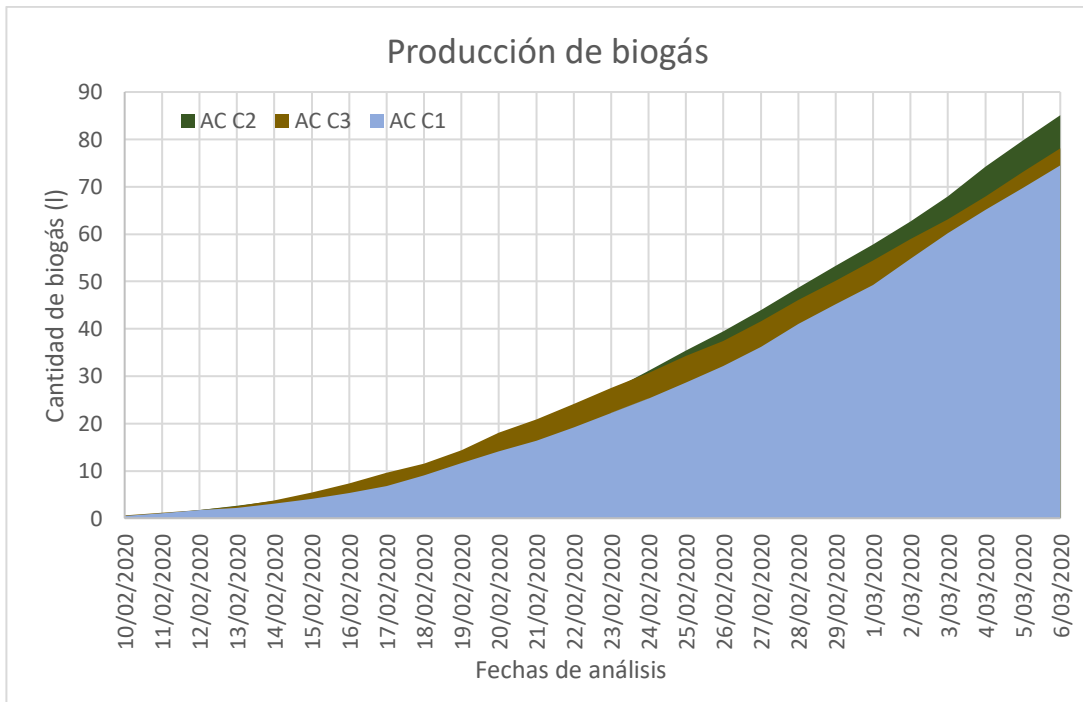
**Tabla 5-1: Registro de la generación diaria de biogás de las unidades experimentales del tratamiento C (compostaje)**

<i>Fecha</i>	<i>Prod. Día</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Prod. Día</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Prod. Día</i>	<i>Acumulado</i>
	C1	AC C1	C2	AC C2	C3	AC C3
<i>Inicio</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>10/02/2020</i>	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60	0.60
<i>11/02/2020</i>	0.50	1.00	0.40	0.90	0.60	1.20
<i>12/02/2020</i>	0.70	1.70	0.80	1.70	0.50	1.70
<i>13/02/2020</i>	0.50	2.20	0.90	2.60	0.80	2.50
<i>14/02/2020</i>	0.90	3.10	1.00	3.60	1.30	3.80
<i>15/02/2020</i>	1.00	4.10	1.20	4.80	1.60	5.40
<i>16/02/2020</i>	1.20	5.30	1.20	6.00	2.00	7.40
<i>17/02/2020</i>	1.50	6.80	1.30	7.30	2.20	9.60
<i>18/02/2020</i>	2.30	9.10	2.10	9.40	1.90	11.50
<i>19/02/2020</i>	2.50	11.60	2.80	12.20	2.80	14.30
<i>20/02/2020</i>	2.50	14.10	3.00	15.20	3.80	18.10
<i>21/02/2020</i>	2.30	16.40	3.70	18.90	2.80	20.90
<i>22/02/2020</i>	2.80	19.20	3.90	22.80	3.20	24.10
<i>23/02/2020</i>	3.00	22.20	4.10	26.90	3.40	27.50
<i>24/02/2020</i>	3.10	25.30	4.20	31.10	3.20	30.70
<i>25/02/2020</i>	3.30	28.60	4.30	35.40	3.60	34.30
<i>26/02/2020</i>	3.50	32.10	4.10	39.50	3.10	37.40
<i>27/02/2020</i>	4.10	36.20	4.50	44.00	4.20	41.60
<i>28/02/2020</i>	4.80	41.00	4.70	48.70	4.50	46.10
<i>29/02/2020</i>	4.20	45.20	4.60	53.30	4.10	50.20
<i>1/03/2020</i>	4.00	49.20	4.50	57.80	4.20	54.40
<i>2/03/2020</i>	5.60	54.80	4.90	62.70	4.50	58.90
<i>3/03/2020</i>	5.40	60.20	5.20	67.90	4.20	63.10
<i>4/03/2020</i>	4.90	65.10	6.30	74.20	4.80	67.90
<i>5/03/2020</i>	4.60	69.70	5.60	79.80	5.20	73.10
<i>6/03/2020</i>	4.80	74.50	5.30	85.10	5.00	78.10

**Gráfico 5-1: Producción diaria de biogás de las unidades experimentales del tratamiento C (Compostaje)**



**Gráfico 5-2: Cantidad de biogás acumulado de cada unidad experimental del tratamiento C (compostaje)**



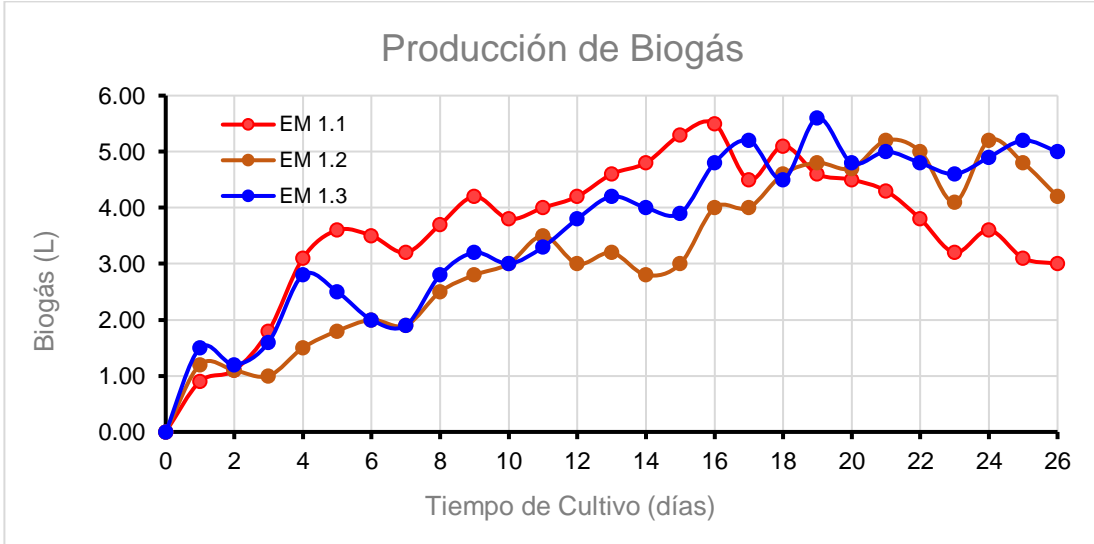
La cantidad de biogás producido en el tratamiento EM 1 comenzó su registro a partir del segundo día de haber iniciado el proceso de digestión anaeróbica. Los registros del volumen de biogás del tratamiento EM 1 se tomaron a partir 8:00 pm de cada día (Tabla 5-2). Durante los 26 días de registro los resultados muestran un pico de 5.60 litros por día en la unidad experimental EM 1.3 (Tabla 5-2), la generación promedio para la unidad experimental EM 1.1 fue 3.73 l/día; para la unidad experimental EM 1.2, 3.27 l/día y para la unidad experimental EM 1.3, 3.7 l/día, obteniéndose una generación promedio para el tratamiento EM 1 (microorganismos benéficos tipo 1) de 3.56 litros por día. Con un intervalo de confianza de 0.28 l/día, obtuvimos que el límite inferior de la generación promedio diaria es de 3.28 l/día y el límite superior de la generación promedio diario es de 3.85 l/día (Tabla 5-4).

La cantidad acumulado de biogás producido a los 26 días para la unidad experimental EM 1.1 es de 97 litros; para la unidad experimental EM 1.2, 84.90 litros; para la unidad experimental EM 1.3, 96.10 litros, obteniéndose un volumen acumulado promedio de biogás producido de 92.67 litros para el tratamiento EM 1 (microorganismos benéficos tipo 1). Con un intervalo de confianza de 16.75 litros, se obtuvo que el límite inferior del volumen acumulado promedio de biogás producido para el tratamiento EM 1 es de 75.92 litros y el límite superior del volumen acumulado promedio de biogás producido para el tratamiento EM 1 es de 109.41 litros (Tabla 5-5).

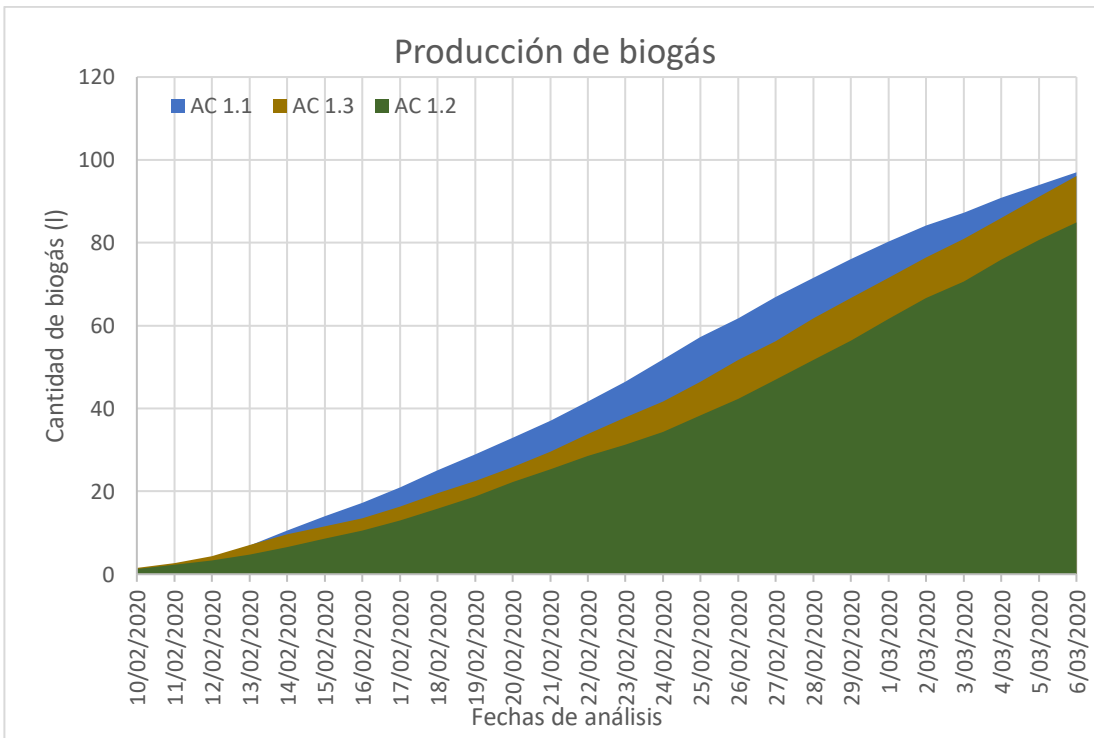
**Tabla 5-2: Producción diaria de biogás de las unidades experimentales del tratamiento EM 1 (microorganismos benéfico tipo 1)**

<i>Fecha</i>	<i>Prod. Día</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Prod. Día</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Prod. Día</i>	<i>Acumulado</i>
	EM 1.1	AC 1.1	EM 1.2	AC 1.2	EM 1.3	AC 1.3
<i>Inicio</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>10/02/2020</i>	0.90	0.90	1.20	1.20	1.50	1.50
<i>11/02/2020</i>	1.10	2.00	1.10	2.30	1.20	2.70
<i>12/02/2020</i>	1.80	3.80	1.00	3.30	1.60	4.30
<i>13/02/2020</i>	3.10	6.90	1.50	4.80	2.80	7.10
<i>14/02/2020</i>	3.60	10.50	1.80	6.60	2.50	9.60
<i>15/02/2020</i>	3.50	14.00	2.00	8.60	2.00	11.60
<i>16/02/2020</i>	3.20	17.20	1.90	10.50	1.90	13.50
<i>17/02/2020</i>	3.70	20.90	2.50	13.00	2.80	16.30
<i>18/02/2020</i>	4.20	25.10	2.80	15.80	3.20	19.50
<i>19/02/2020</i>	3.80	28.90	3.00	18.80	3.00	22.50
<i>20/02/2020</i>	4.00	32.90	3.50	22.30	3.30	25.80
<i>21/02/2020</i>	4.20	37.10	3.00	25.30	3.80	29.60
<i>22/02/2020</i>	4.60	41.70	3.20	28.50	4.20	33.80
<i>23/02/2020</i>	4.80	46.50	2.80	31.30	4.00	37.80
<i>24/02/2020</i>	5.30	51.80	3.00	34.30	3.90	41.70
<i>25/02/2020</i>	5.50	57.30	4.00	38.30	4.80	46.50
<i>26/02/2020</i>	4.50	61.80	4.00	42.30	5.20	51.70
<i>27/02/2020</i>	5.10	66.90	4.60	46.90	4.50	56.20
<i>28/02/2020</i>	4.60	71.50	4.80	51.70	5.60	61.80
<i>29/02/2020</i>	4.50	76.00	4.70	56.40	4.80	66.60
<i>1/03/2020</i>	4.30	80.30	5.20	61.60	5.00	71.60
<i>2/03/2020</i>	3.80	84.10	5.00	66.60	4.80	76.40
<i>3/03/2020</i>	3.20	87.30	4.10	70.70	4.60	81.00
<i>4/03/2020</i>	3.60	90.90	5.20	75.90	4.90	85.90
<i>5/03/2020</i>	3.10	94.00	4.80	80.70	5.20	91.10
<i>6/03/2020</i>	3.00	97.00	4.20	84.90	5.00	96.10

**Gráfico 5-3: Producción diaria de biogás de las unidades experimentales del tratamiento EM 1 (microorganismos benéfico tipo 1)**



**Gráfico 5-4: Cantidad de biogás acumulado de cada unidad experimental del tratamiento EM1 (microorganismos benéficos tipo 1)**





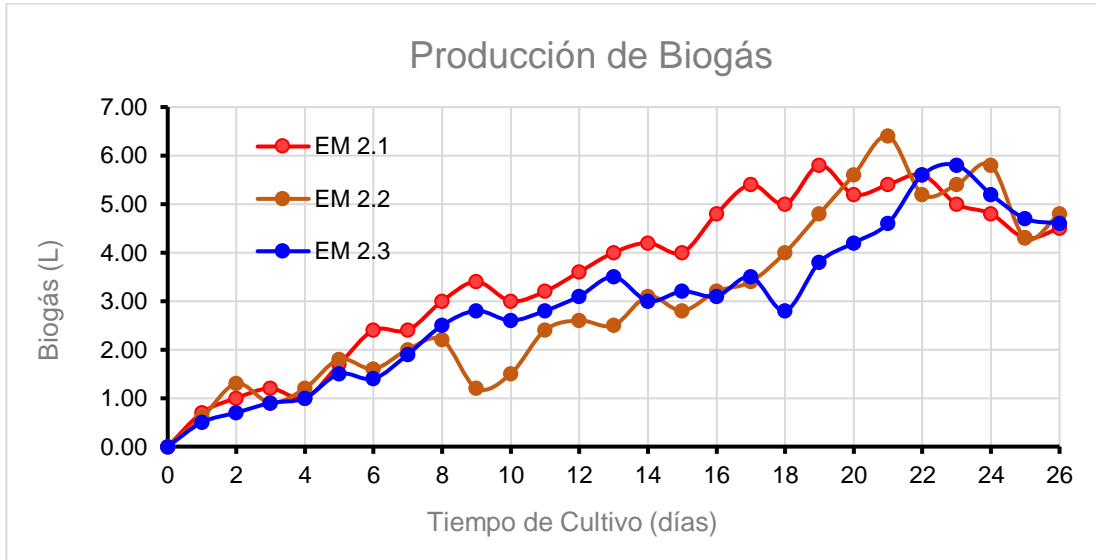
La cantidad de biogás producido en el tratamiento EM 2 comenzó su registro a partir del segundo día de haber iniciado el proceso de digestión anaeróbica. Los registros del volumen de biogás del tratamiento EM 1 se tomaron a partir 9:00 pm de cada día (Tabla 5-3). Durante los 26 días de registro los resultados muestran un pico de 6.40 litros por día en la unidad experimental EM 2.2 (Tabla 5-3), la generación promedio para la unidad experimental EM 2.1 fue 3.64 l/día; para la unidad experimental EM 2.2, 3.10 l/día y para la unidad experimental EM 2.3, 3.05 l/día, obteniéndose una generación promedio para el tratamiento EM 2 (microorganismos benéficos tipo 2) de 3.26 litros por día. Con un intervalo de confianza de 0.36 l/día, obtuvimos que el límite inferior de la generación promedio diaria es de 2.91 l/día y el límite superior de la generación promedio diario es de 3.62 l/día (Tabla 5-4).

La cantidad acumulado de biogás producido a los 26 días para la unidad experimental EM 2.1 es de 94.60 litros; para la unidad experimental EM 2.2, 80.60 litros; para la unidad experimental EM 2.3, 79.30 litros, obteniéndose un volumen acumulado promedio de biogás producido de 84.83 litros para el tratamiento EM 2 (microorganismos benéficos tipo 2). Con un intervalo de confianza de 21.07 litros, se obtuvo que el límite inferior del volumen acumulado promedio de biogás producido para el tratamiento EM 2 es de 63.76 litros y el límite superior del volumen acumulado promedio de biogás producido para el tratamiento EM 2 es de 105.91 litros (Tabla 5-5).

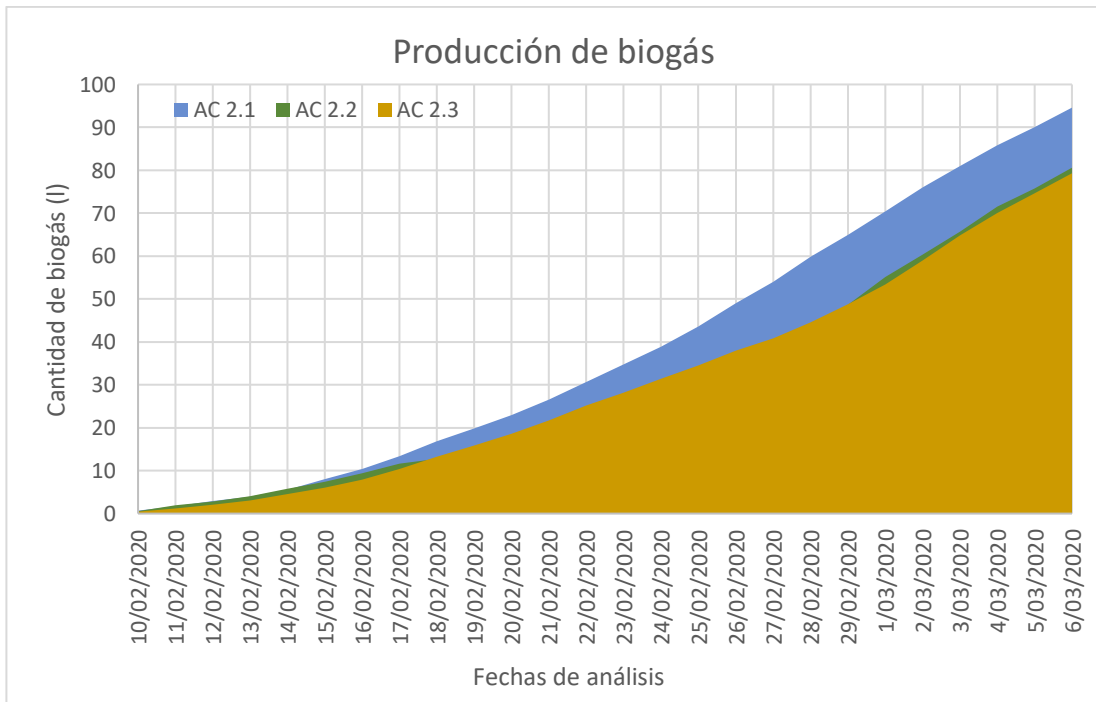
**Tabla 5-3: Producción diaria de biogás de las unidades experimentales del tratamiento EM 2 (microorganismos benéfico tipo 2)**

<i>Fecha</i>	<i>Prod. Día</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Prod. Día</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Prod. Día</i>	<i>Acumulado</i>
	EM 2.1	AC 2.1	EM 2.2	AC 2.2	EM 2.3	AC 2.3
<i>Inicio</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10/02/2020	0.70	0.70	0.60	0.60	0.50	0.50
11/02/2020	1.00	1.70	1.30	1.90	0.70	1.20
12/02/2020	1.20	2.90	0.90	2.80	0.90	2.10
13/02/2020	1.00	3.90	1.20	4.00	1.00	3.10
14/02/2020	1.70	5.60	1.80	5.80	1.50	4.60
15/02/2020	2.40	8.00	1.60	7.40	1.40	6.00
16/02/2020	2.40	10.40	2.00	9.40	1.90	7.90
17/02/2020	3.00	13.40	2.20	11.60	2.50	10.40
18/02/2020	3.40	16.80	1.20	12.80	2.80	13.20
19/02/2020	3.00	19.80	1.50	14.30	2.60	15.80
20/02/2020	3.20	23.00	2.40	16.70	2.80	18.60
21/02/2020	3.60	26.60	2.60	19.30	3.10	21.70
22/02/2020	4.00	30.60	2.50	21.80	3.50	25.20
23/02/2020	4.20	34.80	3.10	24.90	3.00	28.20
24/02/2020	4.00	38.80	2.80	27.70	3.20	31.40
25/02/2020	4.80	43.60	3.20	30.90	3.10	34.50
26/02/2020	5.40	49.00	3.40	34.30	3.50	38.00
27/02/2020	5.00	54.00	4.00	38.30	2.80	40.80
28/02/2020	5.80	59.80	4.80	43.10	3.80	44.60
29/02/2020	5.20	65.00	5.60	48.70	4.20	48.80
1/03/2020	5.40	70.40	6.40	55.10	4.60	53.40
2/03/2020	5.60	76.00	5.20	60.30	5.60	59.00
3/03/2020	5.00	81.00	5.40	65.70	5.80	64.80
4/03/2020	4.80	85.80	5.80	71.50	5.20	70.00
5/03/2020	4.30	90.10	4.30	75.80	4.70	74.70
6/03/2020	4.50	94.60	4.80	80.60	4.60	79.30

**Gráfico 5-5: Producción diaria de biogás de las unidades experimentales del tratamiento EM 2 (microorganismos benéfico tipo 2)**



**Gráfico 5-6: Cantidad de biogás acumulado de cada unidad experimental del tratamiento EM2 (microorganismos benéficos tipo 2)**



Finalmente, en el análisis comparativo del volumen acumulado promedio de los 3 tratamientos, se observa que el tratamiento EM 1 (microorganismos benéficos tipo 1) obtuvo mejores resultados, presentando mayor producción de biogás en cada momento durante el tiempo de cultivo, con un volumen acumulado promedio de 92.67 litros; mientras que se observó que el tratamiento C (compostaje) fue el tratamiento con menor generación de biogás durante cada momento el tiempo de análisis experimental, con un volumen acumulado promedio de 79.23 litros.

**Gráfico 5-7: Comparación del volumen de biogás acumulado promedio en cada tratamiento**

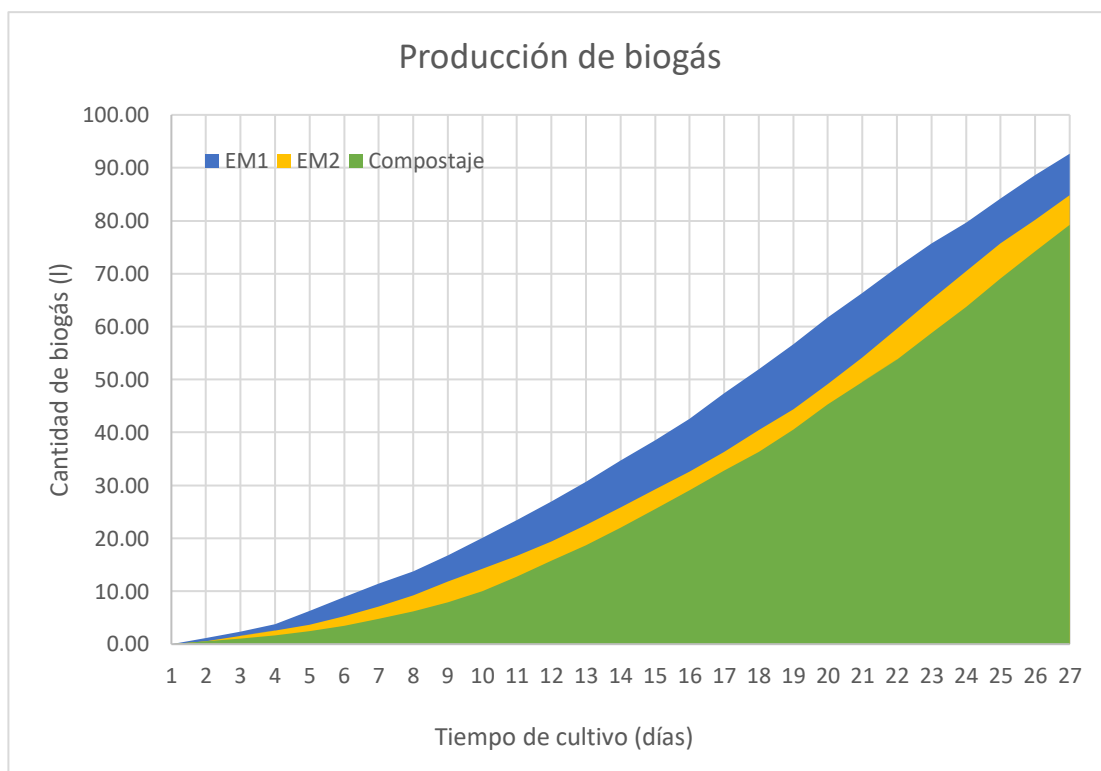


Tabla 5-4: Resumen del análisis estadístico de la producción diaria de biogás

<i>Tratamientos</i>	<i>Unidades experimentales</i>	<i>Diario</i>
<b>Control</b>	C1	2.87
	C2	3.27
	C3	3.00
	Promedio	3.05
	Intervalo de confianza	0.36
	Nivel inferior	2.68
	Nivel superior	3.41
<b>EM1</b>	EM1.1	3.73
	EM1.2	3.27
	EM1.3	3.70
	Promedio	3.56
	Intervalo de confianza	0.28
	Nivel inferior	3.28
	Nivel superior	3.85
<b>EM2</b>	EM2.1	3.64
	EM2.2	3.10
	EM2.3	3.05
	Promedio	3.26
	Intervalo de confianza	0.36
	Nivel inferior	2.91
	Nivel superior	3.62

Tabla 5-5: Resumen del análisis estadístico de la producción acumulada de biogás

<i>Tratamientos</i>	<i>Unidades experimentales</i>	<i>Acumulado</i>
<b>Control</b>	C1	74.50
	C2	85.10
	C3	78.10
	Promedio	79.23
	Intervalo de confianza	13.39
	Nivel inferior	65.84
	Nivel superior	92.62
	<b>EM1</b>	EM1.1
EM1.2		84.90
EM1.3		96.10
Promedio		92.67
Intervalo de confianza		16.75
Nivel inferior		75.92
Nivel superior		109.41
<b>EM2</b>		EM2.1
	EM2.2	80.60
	EM2.3	79.30
	Promedio	84.83
	Intervalo de confianza	21.7
	Nivel inferior	63.76
	Nivel superior	105.91

### 5.2.3 Metano producido

La medición del metano contenido en el biogás producido es un parámetro que determinará la calidad del biogás para conocer si existe una correlación con la eficiencia de los microorganismos benéficos en la generación de biogás, para ello se realizó el análisis del biogás producido en el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Agraria La Molina utilizando el equipo Multitec® 545, el mismo que registra valores porcentuales de: % de metano (CH<sub>4</sub>), % de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), % de oxígeno (O<sub>2</sub>), % de ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) con un registro máximo de 0.5 y monóxido de carbono (CO) en partes por millón (ppm) con un registro máximo de 500.

Para el traslado del biogás al laboratorio, se realizó en los mismos flotadores conteniendo un litro de biogás aproximadamente por muestra, esta cantidad fue suficiente para su análisis en el equipo. Dicho equipo, Multitec® 545, fue adaptado para que el diámetro de salida del flotador sea compatible con el diámetro de entrada del equipo.

El porcentaje de metano producido en los tratamientos comenzó su registro a partir del undécimo día de haber iniciado el proceso de digestión anaeróbica. Los registros del metano producido del tratamiento C se tomaron a partir de las 2:00 pm del día siguiente de la medición del volumen de biogás producido en el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

Los resultados del análisis de las muestras de biogás producido (Anexo 7), no dicen que el valor más alto en porcentaje de metano para la unidad experimental C1 fue 51%; para la unidad experimental C2, 65% y para la unidad experimental C3, 59.20% (Tabla 5-6), obteniéndose un valor más alto promedio para el tratamiento C (compostaje) de 58.40% (Tabla 5-7). Con un intervalo de confianza de 11.66%, se obtuvo que el límite inferior del porcentaje de metano contenido en el biogás producido para el tratamiento C es de 24.36 y el límite superior del porcentaje de metano contenido en el biogás producido para el tratamiento C es de 47.68% (Tabla 5-8).

**Tabla 5-6: Producción de metano por unidad experimental por fecha de medición**

<i>Fecha</i>	<i>Control</i>			<i>EM 1</i>			<i>EM 2</i>		
	C1	C2	C3	EM 1.1	EM 1.2	EM 1.3	EM 2.1	EM 2.2	EM 2.3
<i>Inicio</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18/02/2020	4.20	5.10	4.60	15.00	13.40	7.60	8.00	2.70	8.10
24/02/2020	22.10	22.00	22.70	41.30	25.60	28.50	31.20	16.50	28.30
28/02/2020	39.50	44.50	39.20	59.70	37.50	44.40	48.40	34.70	44.70
3/03/2020	49.40	58.60	53.20	60.40	48.90	62.10	61.10	46.40	54.60
6/03/2020	51.00	65.00	59.20	63.30	56.80	65.80	66.40	59.10	61.40

**Tabla 5-7: Producción promedio de metano por tratamiento por fecha de medición**

<i>Fecha</i>	<i>Control</i>	<i>EM1</i>	<i>EM2</i>
16/02/2020	0.00	0.00	0.00
18/02/2020	4.63	12.00	6.27
24/02/2020	22.27	31.80	25.33
28/02/2020	41.07	47.20	42.60
3/03/2020	53.73	57.13	54.03
6/03/2020	58.40	61.97	62.30

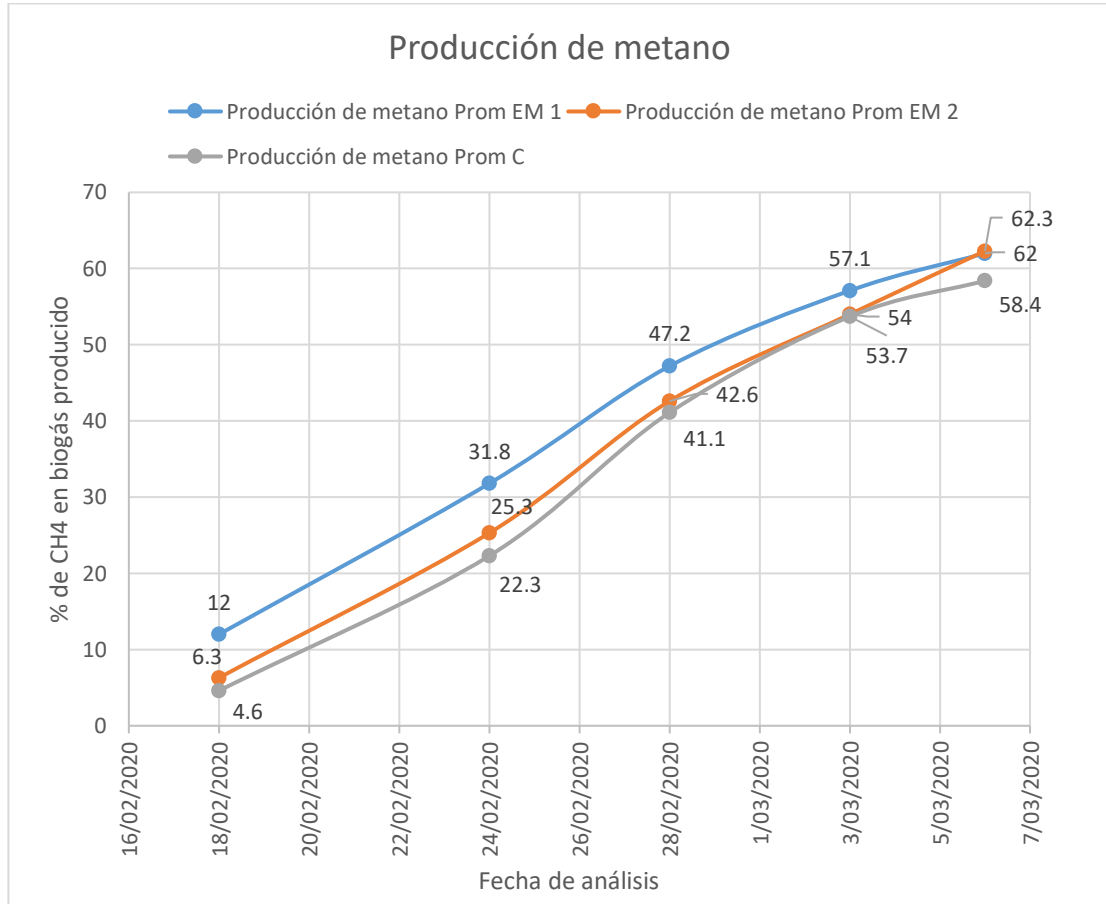


Los resultados del análisis de las muestras de biogás producido (Anexo 7), no dicen que el valor más alto en porcentaje de metano para la unidad experimental EM 1.1 fue 63.30%; para la unidad experimental EM 1.2, 56.80% y para la unidad experimental EM 1.3, 65.80% (Tabla 5-6), obteniéndose un valor más alto promedio para el tratamiento EM 1 (microorganismos benéficos tipo 1) de 61.97% (Tabla 5-7). Con un intervalo de confianza de 11.03%, se obtuvo que el límite inferior del porcentaje de metano contenido en el biogás producido para el tratamiento EM 1 es de 30.99% y el límite superior del porcentaje de metano contenido en el biogás producido para el tratamiento EM 1 es de 53.05% (Tabla 5-8).

Los resultados del análisis de las muestras de biogás producido (Anexo 7), no dicen que el valor más alto en porcentaje de metano para la unidad experimental EM 2.1 fue 64.40%; para la unidad experimental EM 2.2, 59.10% y para la unidad experimental EM 2.3, 61.40% (Tabla 5-6), obteniéndose un valor más alto promedio para el tratamiento EM 2 (microorganismos benéficos tipo 2) de 62.30% (Tabla 5-7). Con un intervalo de confianza de 11.47%, se obtuvo que el límite inferior del porcentaje de metano contenido en el biogás producido para el tratamiento EM 2 es de 26.64% y el límite superior del porcentaje de metano contenido en el biogás producido para el tratamiento EM 2 es de 49.58% (Tabla 5-8).

En el análisis comparativo del valor promedio más alto en porcentaje de metano de los 3 tratamientos, se observa que el tratamiento EM 2 (microorganismos benéficos tipo 2) obtuvo mejores resultados, presentando mayor porcentaje de metano en el biogás producido con un valor de 62.3%; mientras que se observó que el tratamiento C (compostaje) fue el tratamiento con menor porcentaje de metano en el biogás producido, con un valor de 58.4% (Gráfico 5-8).

Gráfico 5-8: Producción promedio de metano para cada tratamiento



Finalmente, en el análisis comparativo del valor promedio del porcentaje de metano de los 3 tratamientos, se observa que el tratamiento EM 1 (microorganismos benéficos tipo 1) obtuvo mejores resultados, presentando mayor porcentaje promedio de metano en el biogás producido con un valor de 42.02%; mientras que se observó que el tratamiento C (compostaje) fue el tratamiento con menor porcentaje promedio de metano en el biogás producido, con un valor de 36.02% (Tabla 5-8).

Tabla 5-8: Resumen del análisis estadístico de la producción de metano

<i>Tratamientos</i>	<i>Unidades experimentales</i>	<i>Diario</i>
<b>Control</b>	C1	33.24
	C2	39.04
	C3	35.78
	Promedio	36.02
	Nivel inferior	24.36
	Nivel superior	47.68
	<b>EM1</b>	EM1.1
EM1.2		36.44
EM1.3		41.68
Promedio		42.02
Nivel inferior		30.99
Nivel superior		53.05
<b>EM2</b>		EM2.1
	EM2.2	31.88
	EM2.3	39.42
	Promedio	38.11
	Nivel inferior	26.64
	Nivel superior	49.58

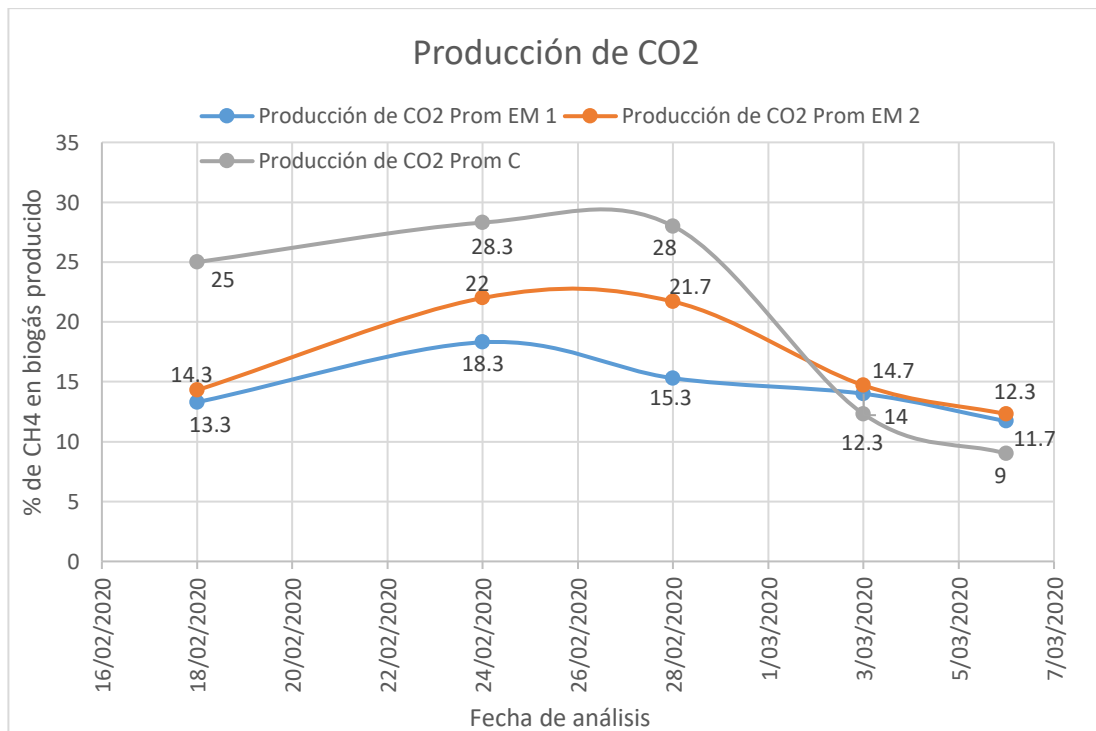
### 5.2.4 Dióxido de carbono producido

El dióxido de carbono es un gas que indica la fermentación de carbohidratos en la fase de acidogénesis para su posterior consumo por bacterias metanogénicas hidrogenofílicas para producir un 30%, aproximadamente, del metano total producido.

Los resultados obtenidos en el análisis del biogás producido nos muestran que los 20 primeros días hubo mayor producción de CO<sub>2</sub>, mientras que en los 6 días restantes su decrecimiento fue significativo (Gráfico 5-9). Este comportamiento es lo esperado ya que, en la última etapa, la metanogénica, es donde se consume gran parte del CO<sub>2</sub> producido en las primeras 3 etapas.

Los resultados promedios no indican que el tratamiento C tuvo mayor producción de CO<sub>2</sub> en el primer análisis que fue a los 11 días del inicio de la fase experimental, con un valor de 25% del biogás producido, mientras que el valor promedio más bajo se obtuvo en el tratamiento EM 1 con un valor de 13.3. (Gráfico 5-9)

**Gráfico 5-9: Producción promedio de CO<sub>2</sub> para cada tratamiento**



### 5.2.5 Análisis estadístico

En los tratamientos estudiados se determinó que no hay diferencia significativa, a un nivel de seguridad del 95% (nivel de error =  $\alpha$  = 5% = 0,05), en los resultados de cantidad de biogás y metano contenido en el biogás, obtenidos con los tratamientos (Anexo 6).

Para que haya diferencia significativa entre los promedios de los resultados obtenidos, el valor de  $p$ , que significa probabilidad, debe ser menor al valor del nivel de error optado, en este caso  $\alpha$  = 5% = 0,05. Esto se puede ver en el título de las columnas de las tablas de ANOVA y comparaciones múltiples, donde dice "Sign." (quiere decir significación) (Anexo 6).

Para el caso de Metano\_diario, ANOVA, el valor de  $p$  = 0,712, que es mayor a  $\alpha$  = 0,05, por eso se interpreta que no hay diferencia significativa porque  $p > 0,05$ . En el Cantidad\_diario, el valor de  $p$  = 0,086, que es mayor a  $\alpha$  = 0,05, por eso se interpreta que no hay diferencia significativa porque  $p > 0,05$ . Finalmente, en el Cantidad\_final\_acumulado, el valor de  $p$  = 0,123, que es mayor a  $\alpha$  = 0,05, por eso se interpreta que no hay diferencia significativa porque  $p > 0,05$  (Anexo 6).

En las tablas de ordenación de los promedios de los resultados obtenidos en cada tratamiento, donde dice: Subconjuntos homogéneos, la prueba de Tukey, los ordena en grupos homogéneos, es decir, cuyo promedio no es significativamente diferente. Sí hubiera diferencias significativas entre dos o más promedios, entonces haría varios grupos de promedios no significativamente diferentes. Pero en estos casos de la investigación no se cumple esto, por ejemplo: Metano\_diario, se hace un solo grupo homogéneo, es decir los promedios de los resultados NO son significativamente diferentes a un nivel de error de 5% o a un nivel de seguridad de 95% (Anexo 6)

En las figuras de cajas (Anexo 6), se puede observar que no hay diferencias significativas en los promedios de los resultados de metano y cantidad de biogás, porque al proyectar horizontalmente la línea central en cada caja, que representa al promedio del tratamiento, se corta o choca con las otras cajas o con la línea vertical de cada caja, que representa la desviación estándar (Anexo 6).

## CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 DISCUSIÓN

1. Para calcular el metano promedio contenido en la cantidad total producido durante el experimento, se realizó una interpolación del porcentaje de metano contenido en el biogás en cada día de la fase experimental. Los resultados para el tratamiento C serían (Tabla 6-1): en la unidad experimental C1 se obtuvo un promedio de 32.19% de metano en un volumen de 74.75 litros acumulados; en la unidad experimental C2, 35.42% de metano en un volumen de 85.35 litros acumulados; y en la unidad experimental C3, 32.29% de metano en un volumen de 78.40 litros acumulados. El promedio del porcentaje de metano contenido en la cantidad acumulado de biogás producido en el tratamiento C sería de un 33.38%.

Así mismo, se realizó una interpolación del porcentaje de metano contenido en el biogás en cada día de la fase experimental. Los resultados para el tratamiento EM 1 serían (Tabla 6-2): en la unidad experimental EM 1.1 se obtuvo un promedio de 37.81% de metano en un volumen de 97.45 litros acumulados; en la unidad experimental EM 1.2, 31.69% de metano en un volumen de 85.50 litros acumulados; y en la unidad experimental EM 1.3, 34.73% de metano en un volumen de 96.85 litros acumulados. El promedio del porcentaje de metano contenido en la cantidad acumulado de biogás producido en el tratamiento EM 1 sería de un 34.88%.

También, se realizó una interpolación del porcentaje de metano contenido en el biogás en cada día de la fase experimental. Los resultados para el tratamiento EM 2 serían (Tabla 6-3): en la unidad experimental EM 2.1 obtuvo un promedio de 37.35% de metano en un volumen de 94.95 litros acumulados; en la unidad experimental EM 2.2, 29.60% de metano en un volumen de 80.90 litros acumulados; y en la unidad experimental EM 2.3, 35.82% de metano en un volumen de 79.55 litros acumulados. El promedio

del porcentaje de metano contenido en la cantidad acumulado de biogás producido en el tratamiento EM 2 sería de un 34.42 %.

El porcentaje de metano en la cantidad producido es relativamente bajo para la practicidad en su combustión, por ello se recomienda que se capte la cantidad de biogás después de los primero 13 días de iniciado el proceso de digestión anaeróbica. Es así que, al calcular el metano promedio contenido en la cantidad total producido después de los primero 13 días mediante la interpolación, los resultados para el tratamiento C serían (Tabla 6-4): en la unidad experimental C1 se obtuvo un promedio de 38.66% de metano en un volumen de 60.40 litros acumulados; en la unidad experimenta C2, 41.99% de metano en un volumen de 69.90 litros acumulados; y en la unidad experimental C3, 40.37% de metano en un volumen de 60.00 litros acumulados. El promedio del porcentaje de metano contenido en la cantidad acumulado de biogás producido después de los primero 13 días en el tratamiento C sería de un 40.34%, con una pérdida promedio de 20% del volumen total acumulado de biogás producido.

También, al calcular el metano promedio contenido en la cantidad total producido después de los primero 13 días mediante la interpolación, los resultados para el tratamiento EM 1 serían (Tabla 6-5): en la unidad experimental EM 1.1 se obtuvo un promedio de 50.75% de metano en un volumen de 64.10 litros acumulados; en la unidad experimenta EM 1.2, 39.25% de metano en un volumen de 62.60 litros acumulados; y en la unidad experimental EM 1.3, 45.30% de metano en un volumen de 70.30 litros acumulados. El promedio del porcentaje de metano contenido en la cantidad acumulado de biogás producido después de los primero 13 días en el tratamiento EM 1 sería de un 45.10%, con una pérdida promedio de 29% del volumen total acumulado de biogás producido.

Finalmente, al calcular el metano promedio contenido en la cantidad total producido después de los primero 13 días mediante la interpolación, los resultados para el tratamiento EM 2 serían (Tabla 6-6): en la unidad

experimental EM 2.1 se obtuvo un promedio de 46.97% de metano en un volumen de 71.60 litros acumulados; en la unidad experimental EM2.2, 36.72% de metano en un volumen de 63.90 litros acumulados; y en la unidad experimental EM 2.3, 44.48% de metano en un volumen de 60.70 litros acumulados. El promedio del porcentaje de metano contenido en la cantidad acumulado de biogás producido después de los primero 13 días en el tratamiento EM 2 sería de un 42.72%, con una pérdida promedio de 23% del volumen total acumulado de biogás producido.

Los resultados obtenidos con una medición después de los 13 días de iniciado el proceso de digestión anaeróbica, nos arroja valores promedio de metano en la cantidad acumulado de biogás producido mayores a 40%, porcentaje aceptable para la combustión del biogás. Las pérdidas del volumen del biogás serían menores al 30%, siendo un valor aceptable para la disponibilidad el uso del biogás producido.

2. Según el recuento de microorganismos benéficos en el laboratorio, los microorganismos benéficos tipo 1 (EM 1) obtuvieron mejores resultados en la cantidad de unidades formadoras de colonias (UFC) para el recuento de levaduras y los microorganismos benéficos tipo 2 (EM 2) obtuvieron mejores resultados en la cantidad de unidades formadoras de colonias (UFC) para el recuento de bacterias ácido lácticas. Los resultados arrojan que el tratamiento EM 1 tuvo mejores resultados en la producción promedio de metano y volumen acumulado promedio durante todo el proceso. Esta correlación indicaría que el contenido de levaduras tiene mejores resultados que las bacterias ácido lácticas, en el volumen de biogás y la calidad de metano producidos durante el proceso de digestión anaeróbica.
3. Al realizar un análisis de la concentración porcentual de los gases como el metano (CH<sub>4</sub>), el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el oxígeno (O<sub>2</sub>), que se encuentran en el biogás producido durante el experimento (Anexo 7),



tenemos que para el tratamiento C la concentración promedio de estos gases al décimo (10) día de iniciada la digestión anaeróbica fue de 40.87% y al finalizar la fase experimental fue de 75.03%.

Así mismo, tenemos que para el tratamiento EM 1 la concentración promedio de metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y oxígeno (O<sub>2</sub>), al décimo (10) día de iniciada la digestión anaeróbica fue de 33.10% y al finalizar la fase experimental fue de 80.07%.

También, tenemos que para el tratamiento EM 2 la concentración promedio de metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y oxígeno (O<sub>2</sub>), al décimo (10) día de iniciada la digestión anaeróbica fue de 31.23% y al finalizar la fase experimental fue de 80.60%.

Estos resultados indican que existen gases diferentes a los mencionados que ocupan un porcentaje significativo en el biogás producido. El potencial gas que ocuparía este porcentaje significativo del biogás sería el vapor de agua, debido a la presencia de la resistencia de 1000W, que forma parte del diseño eléctrico electrónico del experimento. Esta resistencia de 1000W tiene la potencia suficiente para evaporar rápidamente el agua en contacto y en un espacio cercano a ella (aproximadamente 10 centímetros de radio). En diseños futuros considerar otras alternativas para el calentamiento interno del biodigestor o utilizar resistencias de menor potencia con mejor diseño en su distribución del calor.

4. El uso de energía eléctrica para el tratamiento de los residuos orgánicos puede resultar útil si se enfoca desde un punto de vista de eficiencia en el tiempo; sin embargo, si se enfoca desde el punto de vista energético, al realizar un balance, el poder energético del biogás producido resulta ínfimo frente al uso de energía eléctrica que demanda el mantener la temperatura interna de los biodigestores en un rango entre los 30°C y 40°C. El déficit energético para en cada unidad experimental es mayor a 50 kWh (Tabla 6-1).

Tabla 6-1: Balance energético de las unidades experimentales

Unidad experimental	Cantidad de biogás (litros)	Contenido energético (kWh.m-3)	Energía del biogás (kWh)	Energía utilizada	Balance energético
<b>C1</b>	74.75	6	0.45	54.95	-54.50
<b>C2</b>	85.35	6	0.51	54.95	-54.43
<b>C3</b>	78.4	6	0.47	54.95	-54.47
<b>EM 1.1</b>	97.45	6	0.58	54.95	-54.36
<b>EM 1.2</b>	85.5	6	0.51	54.95	-54.43
<b>EM 1.3</b>	96.85	6	0.58	54.95	-54.36
<b>EM 2.1</b>	94.95	6	0.57	54.95	-54.38
<b>EM 2.2</b>	80.9	6	0.49	54.95	-54.46
<b>EM 2.3</b>	79.55	6	0.48	54.95	-54.47

5. Durante el periodo de diseño del circuito eléctrico electrónico, adicionalmente, se pretendió diseñar un cuantificador automático de metano mediante el uso del sensor MQ-4 como lo señalaba la metodología de Salazar (2016). El problema de este sistema son las posibles fugas que puede existir en la construcción del sistema de diluciones, ya que el sensor solo detecta metano en concentraciones menores a 10000 ppm, es decir, a un máximo de 1% del volumen total. Adicionalmente, la solubilidad del metano en agua es de 33 g/l a 20°C, su densidad es de 0.6 g/ml (Salazar, 2016); es así que, el depósito acondicionado para la medición de cantidad de biogás producido tendrá diluido 200 ml de metano en el agua que contuvo. Este margen de error no tiene relevancia para la presente investigación, debido a que, no se requirió la cantidad total producido para el análisis de la composición del biogás; sin embargo, para una medición a menor escala como es el uso del sensor MQ-4, se deberá tener en cuenta esta dilución para la medición del metano.
  
6. La teoría nos menciona que la digestión anaeróbica consiste en la activación y actividad microbiana en ausencia de oxígeno; sin embargo, los análisis de la composición del biogás producido durante la fase

experimental de la presente tesis, nos da resultados de presencia de oxígeno en todo momento. Esta presencia de oxígeno en el interior del biodigestor puede ser causada por las dificultades de crear un ambiente anaeróbico desde el inicio de la digestión, ya que, al momento de cerrar los biodigestores de manera hermética, el interior del mismo contiene un porcentaje significativo de oxígeno que es expulsado hasta reducirlo a un porcentaje que aún sigue siendo significativo especialmente para las bacterias metanogénicas estrictas.

7. Con el uso del sistema embebido Arduino se logró mantener la temperatura interna de los biodigestores controlada, empero este tipo de sistemas no puede almacenar la información que obtiene del sensor de temperatura debido a que se limitan a controlar las órdenes dadas mediante lenguaje de programación en su entorno de desarrollo (IDE). Para el caso de mayor uso de sensores que puedan medir pH, presión, humedad, entre otros; se va a requerir de un sistema que no se limite a controlar o registrar momentáneamente la información, para esto será necesario el procesamiento de dicha información. Una alternativa a este problema es el uso del microprocesador Raspberry Pi que mediante el uso de Python se logra procesar y almacenar la información recibida por los sensores para su posterior análisis.

## 6.2 CONCLUSIONES

1. Se logró diseñar un circuito eléctrico-electrónico estable para el mantenimiento de la temperatura interna de los biodigestores controlada en el rango de 30°C a 40°C con el uso de un sistema embebido Arduino.
2. Los mínimos valores acumulados de biogás producido fueron de 74.50 litros, 84.90 litros y 79.30 litros para los tratamientos C, EM1 y EM2, respectivamente; y los valores máximos acumulados de biogás producido fueron de 85.10 litros, 97.00 y 94.60 litros para los tratamientos C, EM1 y EM2. Asimismo los intervalos de confianza (error muestral) fueron 13.39 litros, 16.75 litros y 21,7 litros para los tratamientos C, EM1 y EM2.
3. Los valores máximos alcanzados en % de metano contenido en el biogás producido fueron de 58.4%; 62.3%; 62% para los tratamientos C, EM1 y EM2, respectivamente. Es así que, los incrementos porcentuales de los tratamientos EM1 y EM 2 respecto al tratamiento C (tratamiento de control) fueron de 6.68% y 6.16%, respectivamente. Con ello se concluye que, se logró mejorar la calidad del biogás producido al utilizar microorganismos benéficos.
4. Se analizó la curva biogás vs tiempo en cada unidad experimental y se determinó que los microorganismos benéficos aceleran la producción de biogás durante los primeros 21 días en un promedio de 65.1% para el tratamiento EM1 y durante los primeros 11 días en un promedio de 46.8%, luego de esto, la producción de biogás alcanza niveles similares o por debajo del volumen generado en el tratamiento control C, siendo los tratamientos con microorganismos benéficos ligeramente superior, pero no representado diferencias significativas entre los tratamientos con un nivel de confianza de 95%.

5. Se analizó la correlación que podría existir en el mejoramiento de la calidad del biogás producido mediante el uso de microorganismos benéficos en condiciones de temperatura controlada. Los resultados señalan que, si bien en los tratamientos con microorganismos benéficos presentan mejores resultados en la cantidad de metano en el biogás respecto al tratamiento con compostaje en un 6% y 2% para los tratamientos EM 1 y EM 2 respectivamente, sin embargo, estos resultados no presentan diferencias significativas en la calidad del biogás con un nivel de confianza de 95%.

### 6.3 RECOMENDACIÓN

1. Una mejora al diseño del circuito eléctrico-electrónico es el procesamiento de la información proveniente de los sensores que se puedan utilizar para la medición digital de los parámetros. Adicionalmente al sensor de temperatura DS18B20, se puede utilizar el medidor de pH 0-14 AC//DC para Arduino, el sensor de humedad YL69 junto al módulo de gestión YL38 y el sensor de presión MF01 (Anexo 9).
2. Todos los sensores antes mencionados pueden adaptarse a un microprocesador para el almacenamiento, procesamiento y análisis de los datos obtenidos por los sensores, así como, la programación en Python para la visualización en tiempo real de los datos en un celular.
3. Se recomienda, tener cuidado al momento de programar los sensores digitales debido a que, por una inadecuada conexión se puede obtener datos erróneos, por ello se debe estudiar las especificaciones técnicas de cada uno de los sensores. Tomando como ejemplo el sensor utilizado, el DS18B20, el error que presentaba era el registro “-127”, el mismo que indica una desconexión entre el microcontrolador y el sensor.
4. Podría ocurrir un accidente si se alimenta el circuito con una fuente de energía y el biodigestor no contiene algún líquido en el interior para calentar, ya que la resistencia se recalientará ocasionando una explosión debido al recalentamiento de esta. Como medida de seguridad se recomienda establecer el tipo de conexión NO, un circuito abierto, y que Arduino de la orden para cerrar el circuito, ya con esto estamos garantizando que existe un líquido en el interior del biodigestor a ser calentado.

5. El estudio realizado por Salazar (2016), nos da algunas pautas para la construcción de un cuantificador automático de metano. Se recomienda realizar investigaciones en esa dirección para contar con una herramienta digital para la medición de metano, ya que por el momento solo se tiene un equipo analógico de alto costo económico para realizar el análisis de la composición del biogás.
6. El presente estudio se limitó a interpolar el comportamiento de la calidad y la cantidad de biogás bajo la influencia de microorganismos benéficos, ya que los costos para la construcción de los biodigestores y el análisis del biogás resultaron ser altos, económicamente. Se recomienda realizar un análisis completo a todo el ciclo de la producción de biogás, es decir, hasta que la cantidad de producción de biogás diaria sea cero o muy cercana a cero. Este tipo de estudios podría resultar más costoso que el actual estudio, sin embargo, nos daría como resultados la gráfica completa de la producción de biogás y un análisis más preciso respecto a la calidad del biogás.
7. Adicional a la incorporación de los sensores para la medición de otros parámetros físico-químicos (ph, humedad y presión) del biogás, se recomienda añadir un agitador mecánico automatizado movido por motores eléctrico de baja potencia, para una mejor homogenización del sustrato en el interior del biodigestor. La homogenización es importante porque evita la sedimentación de los sólidos en el interior del biodigestor y aumenta la actividad microbiana.
8. Un producto secundario de la digestión anaeróbica es el biol, la parte líquida contenida en el interior del biodigestor que representa aproximadamente el 60% del volumen total del biodigestor. Su uso más común es como fertilizante, por ello sería importante realizar un análisis de

los parámetros físico-químicos tales como: ph, Materia Orgánica (M.O.), C, N, P, K, Ca, Mg y Na; para conocer la calidad de este tipo de fertilizante.

9. El uso de microorganismos benéficos influye en la primera etapa del proceso anaeróbico, hidrólisis, notando pequeñas diferencias positivas, más no diferencias significativas durante todo el proceso; por ellos se recomienda realizar estudios en microorganismos metanogénicas para un posible incremento significativo en la calidad y cantidad de biogás producido.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, G. (2013). *Control de temperatura y pH aplicado en biodigestores modulares de estructura flexible con reciclado de lodos a pequeña escala*. Obtenido de: <http://ri.uaq.mx/bitstream/123456789/251/1/R1000009.pdf>
- Barre, M. (2003). *Estudio Nutricional comparativo de bokachi inoculado con levaduras y con Microorganismos Eficientes (EM) de primera y segunda generación a dos diferentes concentraciones de Zamorano*. Proyecto Ing. Agrónomo. Honduras. Escuela Agrícola Panamericana El Zamorano. 47p.
- Blanco, D. (2011). *Tratamiento biológico aerobio-anaerobio-aerobio de residuos ganaderos para la obtención de biogás y compost*. Tesis Doctoral. León España, Universidad de León. 265p.
- Cárdenas, J. (2012). *Evaluación de la calidad de biogás y biol en biodigestores utilizando estiércol de vaca y residuos orgánicos del comedor pre-tratados con la técnica bokashi en la UNALM*. Tesis Ing. Ambiental. Lima Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina. 132p.
- Carrillo, L. (2003). *Microbiología Agrícola*. Universidad Nacional de Salta. Pp 151.
- Castillo, D; Tito, C. (2011). *Obtención de biogás a partir de excremento de cuy en condiciones ambientales en Tacna, Perú*. 84 – 91.
- Castillo, G. (2012). *Evaluación de codornaza y gallinaza de granjas avícolas para la producción de biogás y bioabono mediante digestión anaeróbica*. Tesis. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Cendales, L. (2011). *Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable*. Tesis Mg. Sc. Ing. Mecánico. Bogotá, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. 137p. Consultado el 04/02/2020. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/4100/1/edwindariocendalesladino.2011.parte1.pdf>

- CEPIS, (1996). *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores rurales*.
- Chynoweth, D; Issacson, R. (1987). *Anaerobic digestion of biomass*. New York (US): Elsevier Science Publishing, 279 p.
- Chávez, J; Velasco, J. (2015). *Modelación, implementación y automatización de una micro planta de producción de biogás a partir de biomasa residual para el laboratorio de energías renovables del decem de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE*. Tesis para título. Universidad de las Fuerzas Armadas.
- Cóndor, D. (2019). *Producción de biogás y biol en biodigestores batch a partir de residuos agropecuarios pre-tratados con la técnica de bokashi*. Tesis. UNALM. Facultad de Ciencias.
- Huertas, J. (2019). *Evaluación de la remoción del sulfuro de hidrógeno en el biogás mediante el método de la aireación*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina. 4 – 12.
- Hummel, A. (2014). *Implementación parcial de buenas prácticas pecuarias en la producción de cerdos e implementación de un sistema piloto de biodigestión en el parque porcino de Ventanilla*. Tesis Ing. Zootecnista. Lima, PE, UNALM. 118p.
- Krayzelova, L; Jeisson, D; Bartacek, J; Jenicek, P. (2015). *Microaeration for hydrogen sulfide removal during anaerobic treatment: 703 – 725*. (en línea). Consultado el 02/02/2020. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11157-015-9386-2>.
- López, M. (2011). *Producción de biogás a partir de RSU*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Montes, M. (2008). *Estudio técnico-económico de la digestión anaeróbica conjunta de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos de depurados para la obtención de biogás*. Tesis doctoral Ing. Química. Departamento de Ingeniería Civil, Ordenación del territorio, Urbanismo y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España. 487p.

- Okumoto, S. (2002). *Experiencia de la universidad EARTH en el uso de tecnología de EM (microorganismos eficaces en el sistema agropecuario sostenible)*. I Congreso Nacional de Agricultura Conservacionista. Costa Rica.
- Olaya, Y; Gonzáles, L. (2009). *Fundamentos para el diseño de biodigestores. Módulo para la asignatura de Construcciones Agrícolas*. Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. Colombia, 2009.
- Picado, J. & Añasco, A. (2005). *Preparación y uso de abono orgánico sólidos y líquidos*. San José, Costa Rica.
- Ramos, L. (2014). *Producción de biogás a partir de biomasa de las microalgas Scenedesmus sp. Procedente de diferentes procesos*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 11-25.
- Restrepo, J. (1996). *Elaboración de abonos orgánicos fermentados y biofertilizantes*. San José, Costa Rica.
- Rodríguez, M. (1994). *Horticultura orgánica: una guía basada en la experiencia en Launa Alfaro Ruiz*. San José, Costa Rica.
- Román, P. (2012). *Taller biodigestores y biogás*. Obtenido de: <https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CC8QFjAA&url=>
- Salazar, T.; Vaquerano, N.; Porras, M. (2016). *Cuantificador automático de metano para la estimación del potencial energético de un sustrato celulósico*. Informe final de proyecto. Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA), Costa Rica.
- Saldarriaga, D. (2013). *Tratamiento de efluentes del cultivo intensivo de Penaeus vannamei por sedimentación y biofiltración*. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Tumbes.
- Soto, G (2005). *Abonos orgánicos: el proceso de compostaje*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica.

- Téllez, C. (2008). *Diseño y selección de elementos para una planta de biogás*. Tesis Ing. Mecánico. Valdivia Chile. Universidad Austral de Chile. 74p.
- Valdez, B. (2012). *Evaluación de la calidad de biogás y biol producido en biodigestores usando excretas de animales del parque zoológico de Huachipa*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina. 7 – 22.
- Valerio, M. (2010). *Diseño y evaluación de un sistema para la purificación del metano producido mediante biodigestión en el ITCR*. Cartago: Instituto tecnológico de Costa Rica. 89p.
- Vera, U. (2011). *Desarrollo metodológico para el análisis de la viabilidad de un proyecto de microgeneración*. Tesis Mag. Sc. En Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. 163p.
- Varnero, M. (2011). *Manual de Biogás*. ISBN 978-95-306892-0. Gobierno de Chile: Ministerio de Energía. Recuperado de: <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>
- Villegas, E. 1989. Diseño de un biodigestor de flujo arbitrario para la construcción de biogás a partir de desechos orgánicos. Anales científicos. UNALM XXIX (1-4): 323-337.
- Wellinger, A; Lindberg, A. (2000). *Biogas upgrading and utilización*. IEA Bioenergy. Task 24: *Energy from biological conversion of organic waste*. Consultado 02/02/2020. Disponible en: <http://iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/publi-task37/Biogas%20upgrading.pdf>

**ANEXOS**

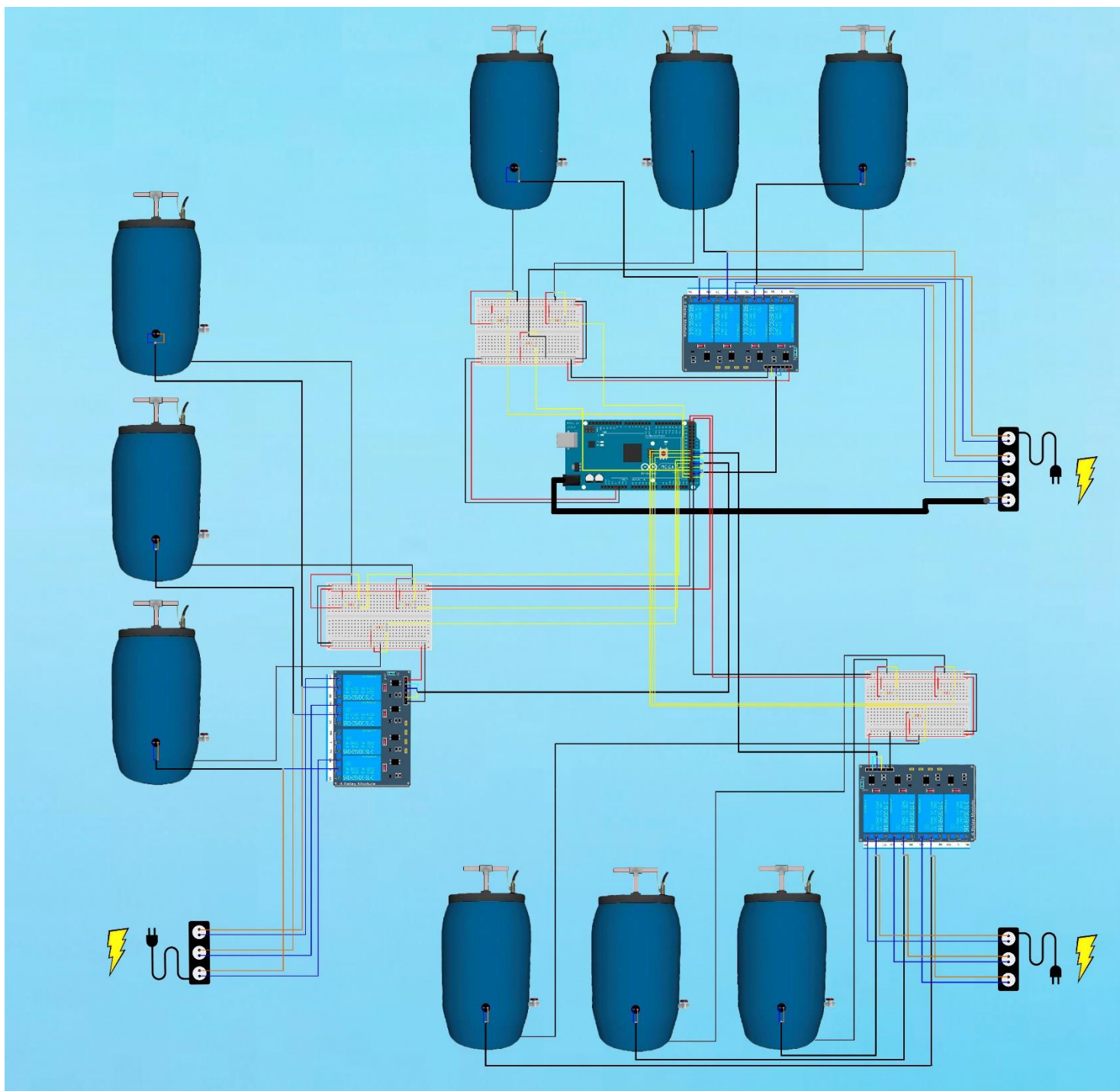
Anexo 1. Código de programación para el circuito eléctrico – electrónico (1 biodigestor).....	94
Anexo 2: Diseño del circuito eléctrico electrónico .....	96
Anexo 3: Panel fotográfico del cargado de biodigestores.....	97
Anexo 4: Aireación y humedecimiento del abono .....	98
Anexo 5: Panel fotográfico de la prueba del puño .....	99
Anexo 6. Análisis estadísticos del metano (CH <sub>4</sub> ) y dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) en la obtención del biogás .....	100
Anexo 7: Resultados de activación de microorganismos benéficos del laboratorio de Ecología Microbiana y Biotecnología “Marino Tabusso” .....	106
Anexo 8: Resultados de laboratorio para análisis de muestras de biogás.....	108
Anexo 9: Mapa de ubicación del proyecto .....	110
Anexo 10: Sensores para Arduino.....	111

**Anexo 1. Código de programación para el circuito eléctrico – electrónico (1 biodigestor)**

```
#include <OneWire.h>  
#include <DallasTemperature.h>  
int umbral_inf = 30;  
int umbral_sup = 40;  
int control_1 = 21;  
OneWire oneWireT1(20);  
DallasTemperature sensor_1(&oneWireT1);  
void setup() {  
  Serial.begin(9600);  
  sensor_1.begin();  
  pinMode(control_1, OUTPUT);  
  sensor_1.requestTemperatures();  
  float temp_1=sensor_1.getTempCByIndex(0);  
  delay(500);  
  if (temp_1 > umbral_inf && temp_1 < umbral_sup){  
    digitalWrite(control_1,HIGH);  
  }  
  delay(1500);  
void loop() {  
  sensor_1.requestTemperatures();  
  float temp_1=sensor_1.getTempCByIndex(0);
```

```
Serial.print("T1= ");
Serial.print(temp_1);
Serial.print("°C");
delay(100);
if(temp_1 < umbral_inf && temp_1 > 0){
digitalWrite(control_1,LOW);
Serial.print(" (X) ");
}
else {
  if (temp_1 > umbral_sup || temp_1 < 0){
digitalWrite(control_1,HIGH);
Serial.print(" (X) ");
} else{
Serial.print(" (✓) ");
}
}
delay(2000);
```

## Anexo 2: Diseño del circuito eléctrico electrónico





**Anexo 3: Panel fotográfico del cargado de biodigestores**



**Anexo 4: Aireación y humedecimiento del abono**



**Anexo 5: Panel fotográfico de la prueba del puño**



## Anexo 6. Análisis estadísticos del metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la obtención del biogás

### 1. Cantidad diario

#### ANOVA de un factor

Volumen\_diario

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	10,507	2	5,253	2,289	,104
Intra-grupos	530,256	231	2,295		
Total	540,763	233			

### Pruebas post hoc

#### Comparaciones múltiples

Variable dependiente: Volumen\_diario

HSD de Tukey

(I) Muestra	(J) Muestra	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
Control	EM1	,30128	,24261	,430	-,2710	,8736
	EM2	,51667	,24261	,086	-,0556	1,0890
EM1	Control	-,30128	,24261	,430	-,8736	,2710
	EM2	,21538	,24261	,649	-,3569	,7877
EM2	Control	-,51667	,24261	,086	-1,0890	,0556
	EM1	-,21538	,24261	,649	-,7877	,3569

### Subconjuntos homogéneos

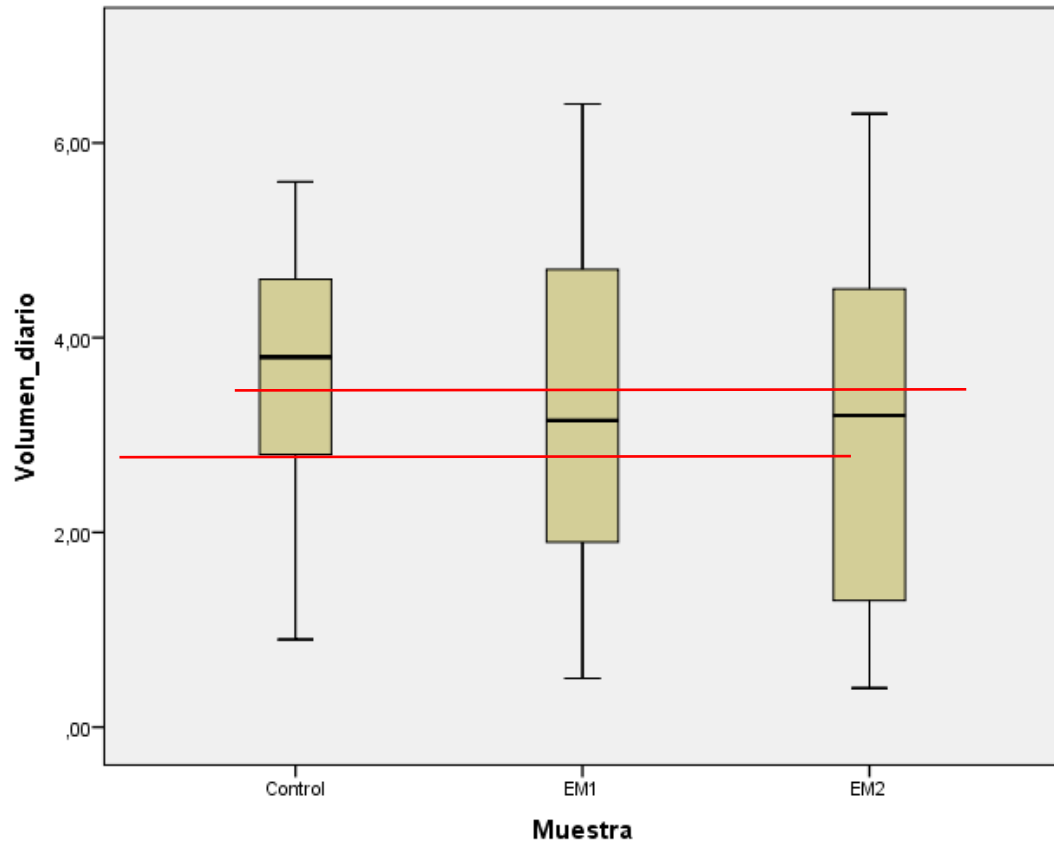
#### Volumen\_diario

HSD de Tukey<sup>a</sup>

Muestra	N	Subconjunto para alfa = 0.05
		1
EM2	78	3,0474
EM1	78	3,2628
Control	78	3,5641
Sig.		,086

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 78,000.

**Volumen\_diario**

## 2. Cantidad final acumulado

### ANOVA de un factor

Volumen\_final\_acumulado

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	273,176	2	136,588	2,798	,139
Intra-grupos	292,920	6	48,820		
Total	566,096	8			

### Pruebas post hoc

#### Comparaciones múltiples

Variable dependiente: Volumen\_final\_acumulado

HSD de Tukey

(I) Muestra	(J) Muestra	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
Control	EM1	-13,43333	5,70497	,123	-30,9377	4,0711
	EM2	-5,60000	5,70497	,614	-23,1044	11,9044
EM1	Control	13,43333	5,70497	,123	-4,0711	30,9377
	EM2	7,83333	5,70497	,411	-9,6711	25,3377
EM2	Control	5,60000	5,70497	,614	-11,9044	23,1044
	EM1	-7,83333	5,70497	,411	-25,3377	9,6711

### Subconjuntos homogéneos

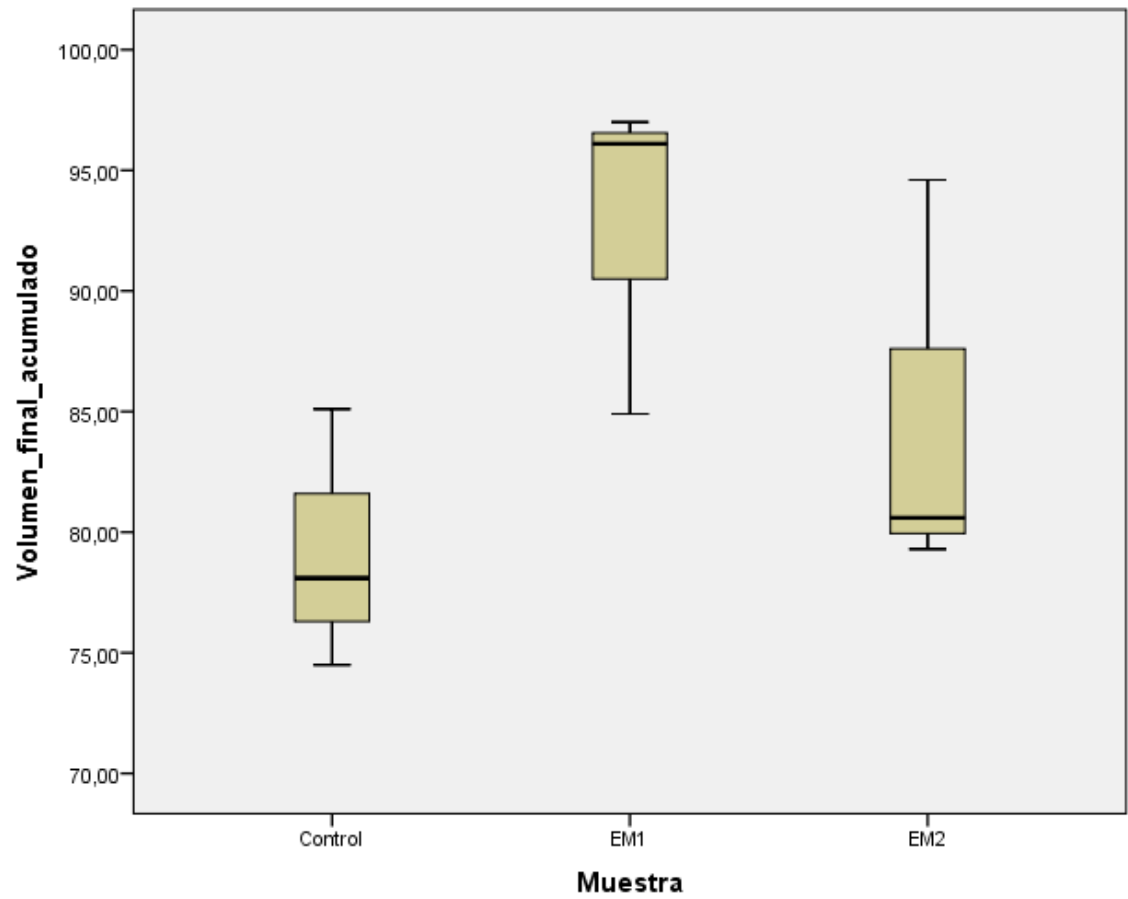
#### Volumen\_final\_acumulado

HSD de Tukey<sup>a</sup>

Muestra	N	Subconjunto para alfa = 0.05
		1
Control	3	79,2333
EM2	3	84,8333
EM1	3	92,6667
Sig.		,123

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 3,000.

**Volumen\_final\_acumulado**

### 3. Metano (CH<sub>4</sub>)

#### ANOVA de un factor

Metano\_diario

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	278,342	2	139,171	,320	,728
Intra-grupos	18239,417	42	434,272		
Total	18517,759	44			

#### Pruebas post hoc

##### Comparaciones múltiples

Variable dependiente: Metano\_diario

HSD de Tukey

(I) Muestra	(J) Muestra	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
Control	EM1	-6,00000	7,60940	,712	-24,4870	12,4870
	EM2	-2,08667	7,60940	,959	-20,5736	16,4003
EM1	Control	6,00000	7,60940	,712	-12,4870	24,4870
	EM2	3,91333	7,60940	,865	-14,5736	22,4003
EM2	Control	2,08667	7,60940	,959	-16,4003	20,5736
	EM1	-3,91333	7,60940	,865	-22,4003	14,5736

#### Subconjuntos homogéneos

##### Metano\_diario

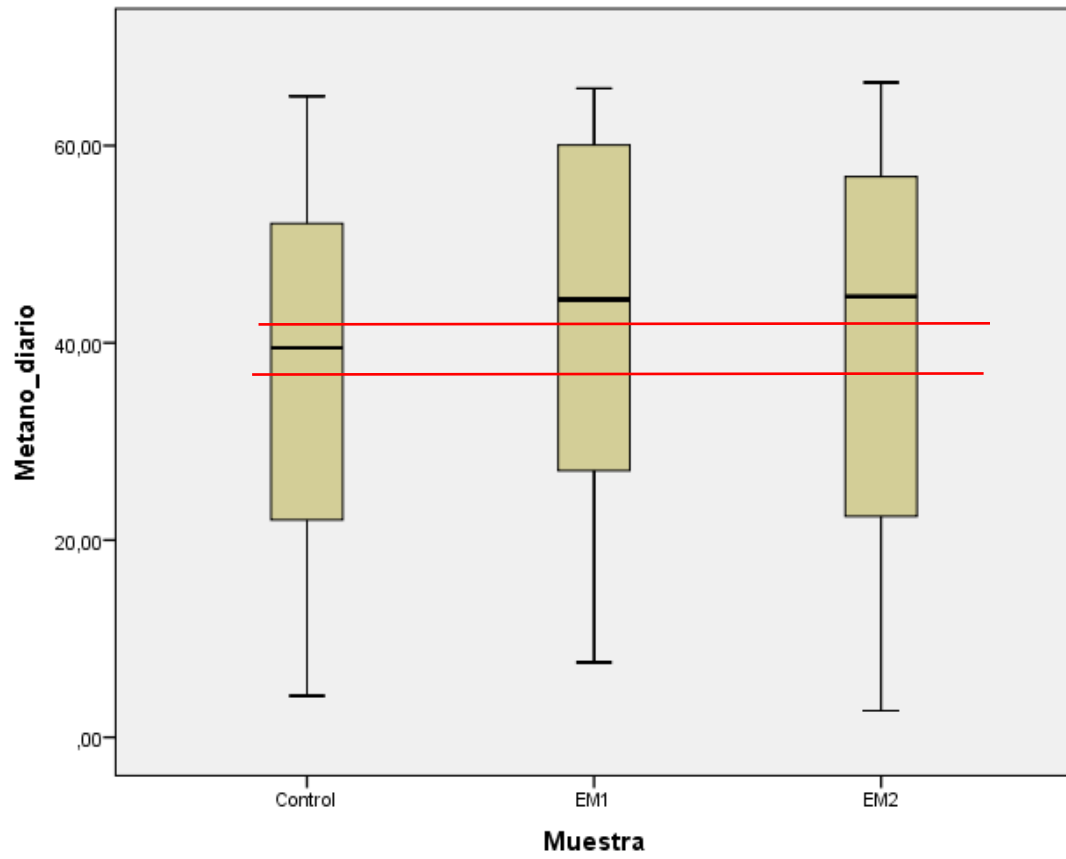
HSD de Tukey<sup>a</sup>

Muestra	N	Subconjunto para alfa = 0.05
		1
Control	15	36,0200
EM2	15	38,1067
EM1	15	42,0200
Sig.		,712

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 15,000.



**Metano\_diario**

## Anexo 7: Resultados de activación de microorganismos benéficos del laboratorio de Ecología Microbiana y Biotecnología "Marino Tabusso"



### UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

Av. La Molina s/n La Molina - Lima - Perú  
Teléfono: 6147800 anexo 274



#### INFORME DE ENSAYO Nº 1910412 - LMT

SOLICITANTE : STEFAN RUMICHE  
DESCRIPCIÓN DEL OBJETO ENSAYADO  
MUESTRA : BIOL  
1910412) EM1

PROCEDENCIA : No Específica  
TIPO DE ENVASE : Frasco de plástico  
CANTIDAD DE MUESTRA : 01 muestra x 01 und. x 500 mL. aprox.  
ESTADO Y CONDICIÓN : En buen estado y cerrado  
FECHA DE MUESTREO : 2019 - 10 - 02  
FECHA DE RECEPCIÓN : 2019 - 10 - 02  
FECHA DE INICIO DE ENSAYO : 2019 - 10 - 02  
FECHA DE TÉRMINO DE ENSAYO : 2019 - 10 - 09

#### RESULTADOS DE ANÁLISIS DE LABORATORIO DE MICROBIOLOGÍA

Análisis Microbiológico	Muestra 1910412
<sup>1</sup> Recuento de levaduras (UFC/ml)	67 x 10 <sup>4</sup>
<sup>1</sup> Recuento de bacterias ácido láctica (UFC/ml)	<1

**NOTA:** El valor < 3 indica ausencia de microorganismos en ensayo.

#### Métodos:

<sup>1</sup>International Commission on Microbiological Specifications for Foods. 1983. 2da Ed. Vol 1 Part II, (Trad. 1988) Reimp. 2000. Editorial Acribia.

#### Observaciones:

Informe de ensayo emitido sobre la base de resultados de nuestro laboratorio en muestras proporcionadas por el solicitante.

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin nuestra autorización escrita.

Validez del documento:

Este documento tiene validez sólo para la muestra descrita.

La Molina, 10 de octubre de 2019



DRA. DORIS ZÚÑIGA DÁVILA

Jefe del Laboratorio de Ecología Microbiana  
y Biotecnología "Marino Tabusso"  
Universidad Nacional Agraria La Molina

Teléfono: 6147800 anexo 274

E-mail: lmt@lamolina.edu.pe



## UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

Av. La Molina s/n La Molina - Lima - Perú  
Teléfono: 6147800 anexo 274

### INFORME DE ENSAYO N° 1910413 - LMT



**SOLICITANTE** : STEFAN RUMICHE  
**DESCRIPCIÓN DEL OBJETO ENSAYADO**  
**MUESTRA** : BIOL  
1910413) EM2

**PROCEDENCIA** : No Específica  
**TIPO DE ENVASE** : Frasco de plástico  
**CANTIDAD DE MUESTRA** : 01 muestra x 01 und. x 500 mL. aprox.  
**ESTADO Y CONDICIÓN** : En buen estado y cerrado  
**FECHA DE MUESTREO** : 2019 - 10 - 02  
**FECHA DE RECEPCIÓN** : 2019 - 10 - 02  
**FECHA DE INICIO DE ENSAYO** : 2019 - 10 - 02  
**FECHA DE TÉRMINO DE ENSAYO** : 2019 - 10 - 09

#### RESULTADOS DE ANÁLISIS DE LABORATORIO DE MICROBIOLOGÍA

Análisis Microbiológico	Muestra 1910413
<sup>1</sup> Recuento de levaduras (UFC/ml)	69 x 10 <sup>3</sup>
<sup>1</sup> Recuento de bacterias ácido láctica (UFC/ml)	89 x 10

**NOTA:** El valor < 3 indica ausencia de microorganismos en ensayo.

#### Métodos:

<sup>1</sup>International Commission on Microbiological Specifications for Foods. 1983. 2da Ed. Vol 1 Part II, (Trad. 1988) Reimp. 2000. Editorial Acribia.

#### Observaciones:

Informe de ensayo emitido sobre la base de resultados de nuestro laboratorio en muestras proporcionadas por el solicitante.

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin nuestra autorización escrita.

Validez del documento:

Este documento tiene validez sólo para la muestra descrita.

La Molina, 10 de octubre de 2019



DRA. DORIS ZÚÑIGA DÁVILA

Jefe del Laboratorio de Ecología Microbiana  
y Biotecnología "Marino Tabusso"  
Universidad Nacional Agraria La Molina

Teléfono: 6147800 anexo 274

E-mail: lmt@lamolina.edu.pe

## Anexo 8: Resultados de laboratorio para análisis de muestras de biogás



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**LABORATORIO DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



### ANÁLISIS DE MUESTRA

**SOLICITANTE:** Stefan Osvaldo Rumiche Peña

**PROCEDENCIA DE MUESTRA:**

**Dist.:** Rímac **Prov.:** Lima **Región:** Lima.

**MUESTRA DECLARADA:** Muestras de biogás.

**PERIODO DE COLECCIÓN DE MUESTRAS:** 18/02/20 al 06/03/2020

**MÉTODO DE ANÁLISIS:** Directo

Equipo: Multitec® 545

Muestra	EM-1.1				
Fecha	18/02/2020	24/02/2020	28/02/2020	03/03/2020	06/03/2020
CH4 (%)	15	41.3	59.7	60.4	63.3
CO2 (%)	11	14	14	10	9
O2 (%)	6.7	6.5	4.8	7.1	7.1
H2S (%)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
CO (PPM)	500	500	500	500	500
Muestra	EM-1.2				
Fecha	18/02/2020	24/02/2020	28/02/2020	03/03/2020	06/03/2020
CH4 (%)	13.4	25.6	37.5	48.9	56.8
CO2 (%)	15	20	16	17	15
O2 (%)	9.2	7.4	7.1	5.7	5.8
H2S (%)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
CO (PPM)	500	500	500	500	500
Muestra	EM-1.3				
Fecha	18/02/2020	24/02/2020	28/02/2020	03/03/2020	06/03/2020
CH4 (%)	7.6	28.5	44.4	62.1	65.8
CO2 (%)	14	21	16	15	11
O2 (%)	7.4	6.2	7.5	5.2	6.4
H2S (%)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
CO (PPM)	500	500	500	500	500

Dirección: Av. la Molina s/n - La Molina  
Telf. 614-7800 anexo 394

Muestra	EM-2.1				
Fecha	18/02/2020	24/02/2020	28/02/2020	03/03/2020	06/03/2020
CH4 (%)	8	31.2	48.4	61.1	66.4
CO2 (%)	13	20	21	15	10
O2 (%)	9.5	7	5.7	5.8	6.4
H2S (%)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
CO (PPM)	500	500	500	500	500

Muestra	EM-2.2				
Fecha	18/02/2020	24/02/2020	28/02/2020	03/03/2020	06/03/2020
CH4 (%)	2.7	16.5	34.7	46.4	59.1
CO2 (%)	10	22	24	18	17
O2 (%)	13.8	7.1	6.6	6.3	4.5
H2S (%)	0.42	0.5	0.5	0.5	0.5
CO (PPM)	500	500	500	500	500

Muestra	EM-2.3				
Fecha	18/02/2020	24/02/2020	28/02/2020	03/03/2020	06/03/2020
CH4 (%)	8.1	28.3	44.7	54.6	61.4
CO2 (%)	20	24	20	11	10
O2 (%)	8.6	7	6.8	7	7
H2S (%)	0.45	0.5	0.5	0.39	0.5
CO (PPM)	500	500	500	500	500

Muestra	C1				
Fecha	18/02/2020	24/02/2020	28/02/2020	03/03/2020	06/03/2020
CH4 (%)	4.2	22.1	39.5	49.4	51
CO2 (%)	20	25	18	9	8
O2 (%)	13.6	8.7	8.7	8.7	9
H2S (%)	0.26	0.47	0.34	0.18	0.46
CO (PPM)	500	500	500	500	500

Muestra	C2				
Fecha	18/02/2020	24/02/2020	28/02/2020	03/03/2020	06/03/2020
CH4 (%)	5.1	22	44.5	58.6	65
CO2 (%)	25	30	31	12	9
O2 (%)	10.1	7.8	5.8	6.9	7.1
H2S (%)	0.27	0.5	0.5	0.34	0.5
CO (PPM)	500	500	500	500	500

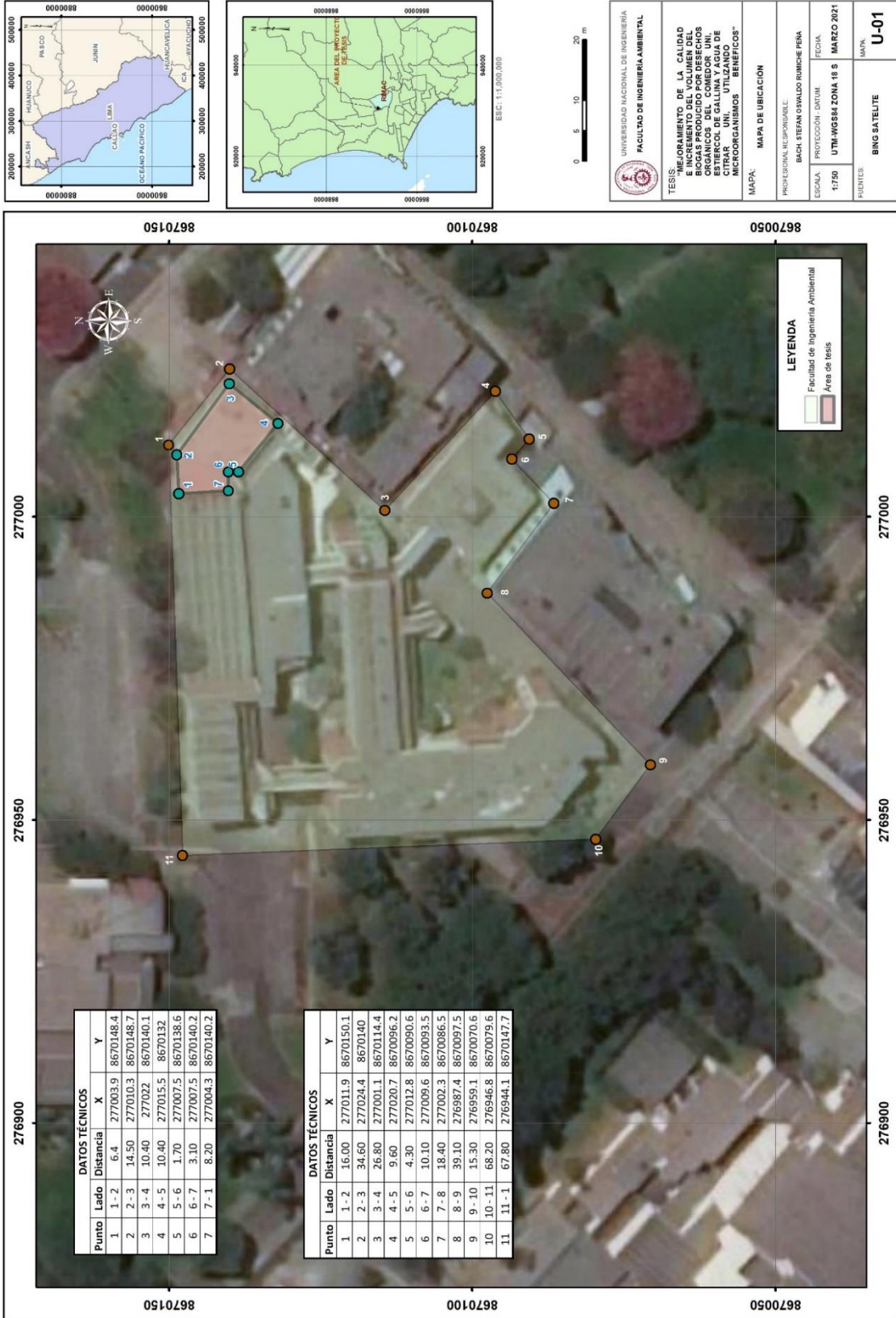


La Molina, Marzo de 2020

.....  
**Mg. Sc. Víctor MIYASHIRO KIYAN**  
 DIRECTOR DPTO. DE INGENIERÍA AMBIENTAL

-----  
 Dirección: Av. la Molina s/n - La Molina  
 Telf. 614-7800 anexo 394

### Anexo 9: Mapa de ubicación del proyecto

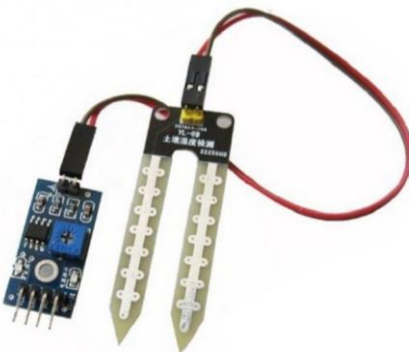


## Anexo 10: Sensores para Arduino

1. Sensor medidor de pH 0-14 AC//DC para Arduino



2. Sensor de humedad higrómetro YL69 con módulo YL38 para Arduino



3. Sensor de presión MF01

