

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



Tesis

**PRODUCTOS Y SUB PRODUCTOS DE UN PROCESO DE
BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA EN UN REACTOR DE
ESTRUCTURA CILÍNDRICA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL**

ELABORADO POR

JUAN DIEGO SÁNCHEZ ZEVALLOS

Tingo María - Perú

2019



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María – Perú



FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 19 de Diciembre de 2018, a horas 7:00 p.m. en la Sala de Sesiones del Departamento Académico de Ciencias Ambientales, para calificar la Tesis titulada:

“PRODUCTOS Y SUBPRODUCTOS OBTENIDOS DE UN PROCESO DE BIODIGESTIÓN ANAEROBICA EN UN REACTOR DE ESTRUCTURA CILINDRICA”

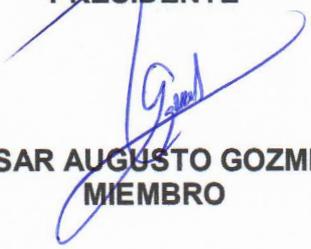
Presentado por el Bachiller **SANCHEZ ZEVALLOS JUAN DIEGO**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara APROBADA con el calificativo de **“BUENO”**

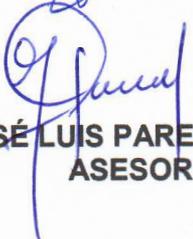
En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título de **INGENIERO AMBIENTAL**, que será aprobado por el Consejo de Facultad, tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título correspondiente.

Tingo María, 24 de Setiembre del 2019


Dr. **CÉSAR SAMUEL LÓPEZ LÓPEZ**
PRÉSIDENTE


Ing. MSc. **VICTOR M. BETETA ALVARADO**
MIEMBRO


Blgo. **CÉSAR AUGUSTO GOZME SULCA**
MIEMBRO


Ing. MSc. **JOSÉ LUIS PAREDES SALAZAR**
ASESOR

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



PRODUCTOS Y SUB PRODUCTOS DE UN PROCESO DE BIODIGESTIÓN
ANAERÓBICA EN UN REACTOR DE ESTRUCTURA CILÍNDRICA

Autor	: SÁNCHEZ ZEVALLOS, Juan Diego
Asesor	: MSc. Ing. PAREDES SALAZAR, José Luis
Programa de Investigación	: Ciencia y Tecnologías Ambientales
Línea de Investigación	: Tecnologías para el tratamiento, aprovechamiento y disposición final de los residuos sólidos
Eje temático de Investigación	: Bioles, Lixiviados, Compost y Biogas.
Lugar de Ejecución	: Laboratorio de calidad y tratamiento de aguas - UNAS
Duración	: 01 año Inicio : 01 de enero del 2016 Fin : 01 de enero del 2017
Financiamiento	: S/. 8 400
FDEU	: S/. 100

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación lo dedico enteramente a mi abuela la señora Antolina Paúcar Sánchez por su apoyo incondicional en cada paso que di en cada etapa de mi vida, por su gran ejemplo, sus consejos y la confianza depositada en mí, hoy por hoy pude llegar hasta aquí solo gracias a ella.

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios, a mi madre que esta en el cielo y a mi familia, por guiarme y estar conmigo en cada paso que di.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivo general	2
1.2. Objetivos específicos	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. Proceso de biodigestión	4
2.2. Digestión anaerobia	¡Error! Marcador no definido.
2.3. Química y microbiología del proceso....	¡Error! Marcador no definido.
2.3.1. Hidrólisis	7
2.3.2. Etapa fermentativa o acidogénica.....	7
2.3.3. Etapa acetogénica	8
2.3.4. Etapa metanogénica	8
2.4. Factores que afectan al proceso de digestión	9
2.4.1. Temperatura: regímenes mesófilo y termófilo	10
2.4.2. pH y alcalinidad	10
2.4.3. Contenido de nutrientes y relación C/N.....	11
2.4.4. Presencia de tóxicos e inhibidores.....	12
2.5. Aspectos energéticos y ambientales.	13
2.5.1. Aspectos energéticos	13
2.5.2. Aspectos ambientales.....	13
2.6. Tipos de reactores según su sistema.	14

III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
3.1. Ubicación y descripción del área de estudio.....	16
3.1.1. Lugar de ejecución	16
3.1.2. Ubicación política.....	16
3.1.3. Ubicación geográfica	16
3.1.4. Condiciones climáticas	16
3.2. Materiales y equipos	17
3.2.1. Materiales.....	17
3.2.2. Equipos	18
3.2.3. Softwares.....	18
3.3. Diseño de investigación	19
3.3.1. Tipo de investigación	19
3.3.2. Unidad experimental	19
3.3.3. Variables.....	19
3.4. Metodología	20
3.4.1. Acondicionamiento de las instalaciones a llevar a cabo la investigación.....	20
3.4.2. Diseño del reactor anaerobio vertical.....	20
3.4.3. Características del reactor	21
3.4.4. Obtención de residuos sólidos	21
3.4.5. Variación de la temperatura interna en las cámaras del reactor y la temperatura ambiental durante el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica.....	22

3.4.6. Estimación de la relación de carbono – nitrógeno (C/N) y la concentración de metales pesados como cadmio y plomo del material sólido remanente y lixiviados generados en un proceso de descomposición anaeróbica	23
3.4.7. Producción volumétrica de lixiviado generado durante el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica.....	24
3.4.8. Producción volumétrica de metano generado durante el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica.....	24
3.4.9. Normalización de resultados obtenidos en laboratorio.....	25
IV. RESULTADOS.....	31
4.1. Evaluación de la variación de la temperatura durante el proceso de descomposición de la materia orgánica.....	31
4.2. Evaluación de la relación de carbono – nitrógeno (C/N) y metales pesados como cadmio (Cd) y plomo (Pb) del material remanente procedente de un proceso de descomposición de la materia orgánica	32
4.3. Evaluación de la producción volumétrica de lixiviado generado durante el proceso de descomposición de la materia orgánica	34
4.4. Evaluación de la producción volumétrica de metano generado durante el proceso de descomposición de la materia orgánica	35
V. DISCUSIÓN	37
VI. CONCLUSIONES.....	41

VII. RECOMENDACIONES	42
VIII. ABSTRACT.....	43
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
X. ANEXOS	48

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
01. Clasificación de sistemas de tratamiento anaerobio de Fracción Orgánica de Residuos Municipales (FORM).....	14
02. Variación de la temperatura en las cámaras del reactor anaeróbico.....	31
03. Comparación de la composición fisicoquímica de sólidos orgánicos residuales y lixiviados procedentes de un proceso de descomposición anaerobia de la materia orgánica	33
04. Producción volumétrica del lixiviado	34
05. Producción de metano durante el proceso de descomposición anaerobia de la materia orgánica	36
06. Registro de temperatura ambiental.....	49
07. Registro de temperatura interna en la cámara 1 y cámara 2	51
08. Temperatura interna en la cámara 3.....	53
09. Registro de datos de la cámara 01 y cámara 02 del biorreactor	55
10. Composición fisicoquímica de la materia orgánica sólida remanente de la descomposición anaeróbica.....	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
01. Esquema de reacciones de la digestión anaerobia de materia orgánica compleja	6
02. Diseño de investigación	19
03. Producción volumétrica del lixiviado.....	35
04. Producción de metano durante el proceso de descomposición anaerobia de la materia orgánica	36
05. Reactor anaeróbico cilíndrico de triple cámara	70
06. Equipo de Cuantificación de gas metano	71
07. Reactivo Hidróxido de Sodio (NaOH).....	72
08. Cálculo de peso del Hidróxido de Sodio (NaOH)	72
09. Balanza digital calibrada	73
10. Preparación de solución de Hidróxido de Sodio (NaOH) a 1 mol.....	73
11. Agregado de solución de Hidróxido de Sodio (NaOH) a 1 mol al equipo de cuantificación de gas metano	74
12. Recolección de datos de las temperaturas del reactor y temperatura ambiental mediante termómetros digitales calibrados.....	74

13. Extracción de lixiviados	75
14. Recolección de lixiviados del reactor.	75

RESUMEN

En la presente investigación, se evaluó cualitativa y cuantitativa de los productos y subproductos procedentes de un proceso de biodigestión anaeróbica en un reactor de estructura cilíndrica, de la materia orgánica de los residuos sólidos domiciliarios, para poder recomendar su posible uso como biofertilizantes. El proceso se llevó a cabo en un reactor discontinuo de forma cilíndrica, el cual estuvo conformado por tres cámaras interiores distribuidas a diferente altura, donde la función de la primera cámara fue de acumulación y pre-digestión, la segunda para la digestión anaeróbica propiamente dicha con paletas mezcladoras y la tercera para acumulación, descomposición y evacuación de los lixiviados. Cada tratamiento el bioreactor descompuso un peso inicial de 20 kg de residuos sólidos orgánicos en un periodo de 20 días, tratando en lo posible de cerrar herméticamente el reactor para simular condiciones de anaerobiosis y con ello lograr registrar las temperaturas de cada uno de los procesos que se lleva a cabo en cada una de las tres cámaras, posteriormente se cuantificaron los pesos y volúmenes del material sólido remanente, el lixiviado y los gases emanados de la digestión, obteniendo resultados cuantitativos respecto al porcentaje de peso en peso de los productos y subproductos los cuales fueron: 52.91%, 46% y 1.09% para el sólido residual, el lixiviado y los gases emanados respectivamente de la digestión, para el

porcentaje de volumen en volumen fueron: 2.52%, 2.68% y 94.80% para el sólido residual, el lixiviado y los gases emanados respectivamente de la digestión. Cualitativamente los productos obtenidos presentaron rangos de pH entre 6.21 y 6.38, valores que se acercan a pH neutro; en lo que corresponde a la relación C/N se tubo como resuLados valores aproximados de 12.11 y 16.96 de C/N para un biosol y un biol, cuyos rangos son bajos comparado con un óptimo de 20 a 30 de C/N requeridos para abonos sólidos y líquidos; y en relación a la concentración de estos metales pesados como el cadmio, y el plomo de los productos sólidos residuales y lixiviados, se tuvo como resultado que dichos valores son inferiores a los requeridos para un biosol y un biol; de lo descrito anteriormente se puede decir que el material sólido remanente y sobre todo el lixiviado producido es estables y favorable para un uso como biofertilizante.

.

I. INTRODUCCIÓN

El aumento de la población a nivel mundial y la mejora constante de su nivel de vida trajo como consecuencia una generación descontrolada de residuos sólidos urbanos, donde de manera de vista ambiental, es insostenible para el planeta, la composición de estos residuos es muy variada como son restos de comida, vidrio, residuos sanitarios, etc. a este problema se buscó muchas alternativas de solución, una de ellas es el compostaje, donde los residuos sólidos orgánicos se biodegradan en fases obteniéndose finalmente un residuo aprovechable en distintas actividades.

El compostaje anaerobio, su principal ventaja es el aprovechamiento de energía en forma de biogás el cual se usa como combustible. La acumulación de residuos sólidos domiciliarios orgánicos es un problema latente y por la falta de gestión en el recojo diario de estos residuos, los cuales son colocados en bolsas plásticas generando así condiciones de anaerobiosis en la materia orgánica, se forman subproductos como los lixiviados. Frente a ello, se fue necesario la propuesta de un recipiente con un mecanismo adecuado para depositar los residuos sólidos orgánicos, propiciando condiciones anaeróbicas, a temperaturas controladas, a fin de acelerar la generación de lixiviados, y evaluar el nivel de la materia orgánica en descomposición así mismo estimar la cantidad de gases producidos.

Por lo descrito se formula el siguiente problema ¿Es posible aprovechar como abonos y energeticamente los productos y subproductos líquidos, sólidos y gaseosos generados mediante un proceso de biodigestion anaerobia de los residuos sólidos orgánicos domiciliarios, en un reactor discontinuo de estructura cilindrica? planteándose como hipótesis que si es posible realizar un aprovechamiento los productos y subproductos líquidos, sólidos y gaseosos generados mediante un proceso anaeróbico de residuos sólidos organicos domiciliarios, en un reactor discontinuo de estructura cilindrica, obteniendo en los análisis fisicoquímicos como son la concentracion de metales pesados, calculo de la relacion de C/N y pH, realizados a los lixiviados y material sólido remanente rangos óptimos que caracterizan a los abonos como bioles y biosoles, y al mismo tiempo estimar la cantidad de gas metano (CH_4) generado por cada 20 Kg de material descompuesto.

1.1. Objetivo general

Evaluar la generación y calidad de productos y subproductos de un proceso de biodigestión anaeróbica en un reactor de estructura cilíndrica.

1.2. Objetivos específicos

- Evaluar la variación de la temperatura interna de las cámaras del reactor y la temperatura ambiental durante el proceso de descomposición anaeróbica de la materia organica.
- Estimar la relación de carbono – nitrógeno (C/N) y la concentración de metales pesados como cadmio y plomo del material sólido remanente y lixiviados generados en la descomposición anaeróbica de la materia

orgánica domiciliaria para determinar si son aptos para un uso como abonos foliares y compost.

- Evaluar la producción volumétrica de lixiviado generado durante el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica.
- Estimar la producción volumétrica de metano generado durante el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Proceso de biodigestión

La biodigestión es cuando la materia orgánica es degradada en compuestos más simples por influencia de la actividad de microorganismos, los cuales requieren algunas condiciones como son el pH y la temperatura , donde la primera determina el desarrollo de los microorganismos en su medio y la segunda determina la rapidez de los microorganismos en crecer; existen factores determinantes para los procesos microbiológicos como: la composición bioquímica, la naturaleza y su correlación carbono-nitrógeno (C/N) , entre otros (LÓPEZ, 2016).

Un papel importante que realiza la población microbiana es transformar los residuos orgánicos, específicamente los que tienen una extensa categoría de respuesta ante las moléculas de oxígeno y su componente universal de células. Por ello establece bioprocesos en relación a la presencia o ausencia del oxígeno para tratar diferentes residuos orgánicos (NAVARRO, 2002).

2.2. Digestión anaeróbica

Es un proceso anaerobio en donde la biomasa suspendida es utilizada cuando la carga contaminante de las aguas residuales es alta.

Esta descomposición de la materia orgánica, genera un gas elevado de contenido energético como producto final, este es denominado biogás, conformado por metano (60-80%), al igual que el dióxido de carbono (40-20%) y elementos como el sulfuro de hidrógeno. El biogás se utiliza en forma de combustible para formar energía eléctrica, como también energía térmica.

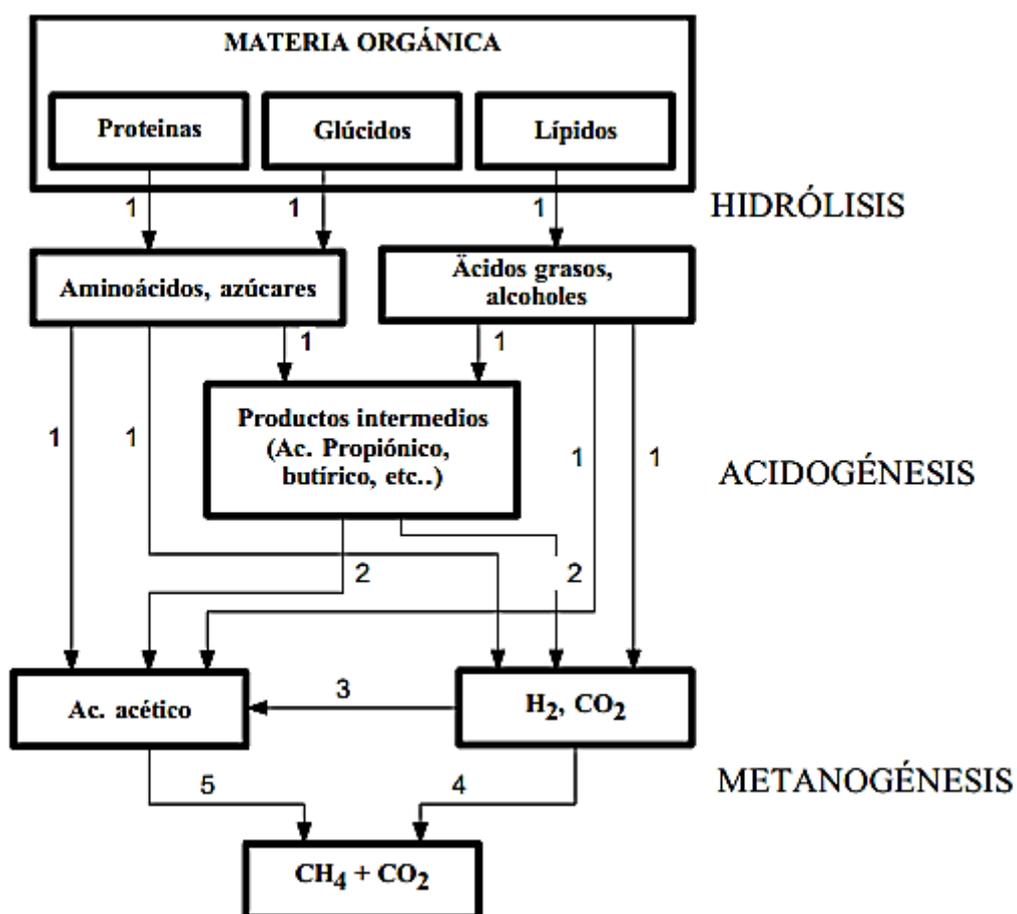
La digestión anaerobia durante su proceso es realizada en tanques cerrados en donde participan diferentes tipos de microorganismos. Dentro de los cuales se destaca a las bacterias que producen ácidos y metano.

Las bacterias de ácidos de la materia orgánica son convertidos en productos intermedios, mientras que las de metano interviene sobre estos productos intermedios transformándolos en gases y subproductos estabilizados. El proceso es de forma lenta en el cual necesita determinadas condiciones. Donde la fase primera conoce como fase ácida cuyo pH tiene valores inferiores de 6,8, su fase segunda, es llamada metánica, cuyo pH tiene valores superiores a 7,4, estos valores inferiores a 6 hacen que se inhiban las bacterias debido a su sensibilidad. (JARABO, 1999).

2.3. Química y microbiología del proceso

Es un proceso en el cual desde su punto de vista tanto química como biológica es limitada, esto se debe a que sus reacciones químicas presentan un gran número; en los cuales los productos que realizan los microorganismos son alimento de los siguientes grupos es por eso que existe un delicado balance siendo prioridad conservar y mantener la digestión para darse de forma correcta (JARABO, 1999).

Se han desarrollado modelos de digestión anaerobia de residuos complejos, como el caso del estiercol. En el cual estos componentes como son (carbohidratos, proteínas y lípidos) conllevan estas etapas: hidrólisis, fermentación y la producción de metano. Estas etapas que realizan los microorganismos son: bacterias fermentativas-acidogénicas, bacterias acetogénicas que producen hidrogeno, los metanógenos acetoclasticos, finalmente los metanógenos que son reductores del CO_2 (PALOMINO, 2013). En la figura observamos el esquema de sus fases y sus diferentes procesos intermedios.



Fuente: FLOTATS Y CAMPOS, 2004.

Figura 01. Esquema de reacción anaerobia de la materia orgánica compleja

2.3.1. Hidrólisis

Existen métodos químicos, físicos y biológicos, cuya prioridad es el desdoblamiento de sus moléculas en unidades simples en el cual ayudan a que la materia orgánica se degrade siendo eficiente en su obtención de su biogás por vía anaeróbica.

Donde mediante los métodos químicos en el que se utilizan los reactivos de hidróxido de sodio (NaOH) y el peróxido de hidrógeno (H₂O₂), la demanda química de oxígeno soluble (DQOs), el máximo rendimiento del metano y también la velocidad de su producción, son las medidas utilizadas a evaluar su certeza en estos métodos, lográndose incrementar la degradación del residuo permitiendo. (PALOMINO, 2013).

La lignina debido a su material, se hace muy complicado efectuar su degradación anaerobia, y al estar presente hace que perturbe a la biodegradabilidad de la celulosa, así como también de la hemicelulosa y diferentes polímeros, transformado en procesos limitantes de la velocidad de hidrólisis así como también a la degradación de otros sustratos (JARABO, 1999). Cuando la hidrólisis es limitante se utilizaron pretratamientos debido a la solubilización de la materia orgánica: tratamientos mecánicos, precompostaje, adición de álcalis, etc (CASTRO, 2009).

2.3.2. Etapa fermentativa o acidogénica

Son etapas cuyo propósito es el desdoblamiento de moléculas complejas en unidades más sencillas mediante métodos físicos, químicos y biológicos donde mejoran la degradación de la materia orgánica mejorando la

eficiencia en la obtención de biogras por vía anaerobia. En este trabajo se aplicaron técnicas como los reactivos de hidróxido de sodio (H_2O_2), la demanda química de oxígeno soluble (DQOs), también el máximo rendimiento del metano y su rapidez de producción, logrando elevar la degradación del residuo y permitiendo un análisis semejante, (AGUILAR-VIRGEN, 2009).

2.3.3. Etapa acetogénica

Los productos que disminuyen en la fermentación requieren ser convertidos a productos más simples por medio de estas bacterias con el fin de que los organismos metanogénicos cumplan la función de metabolizarlos. Debido a que son difícil de metabolizar requieren que los organismos metanogénicos u otros organismos consumidores de hidrógeno colaboren en el proceso (STAMS, 2004).

2.3.4. Etapa metanogénica

Son formadoras de metano y las responsables de eliminar los productos de sus grupos anteriores, son las encargadas de dar origen al nombre del proceso de biometanización. Estos organismos especializados son pertenecientes al dominio de las arqueas, siendo evolutivamente menos parecido a las bacterias y más semejantes a los eucariontes (CASTRO, 2009). Los microorganismos metanogénicos realizan la producción de metano monocarbonados, también se puede formar por dos átomos de carbono enlazados covalentemente: H_2 , CO_2 , acetato, metanol, formiato, y metil-aminas. (STAMS, 2004).

Considerandose que en los reactores anaerobios se genera el 70% de metano y este proviene del ácido acético lo restante del ácido fórmico y del dióxido de carbono (JARABO, 1999).

Los metanogénicos tienen una lenta reproducción de velocidad, calculándose que su regeneración es de diez veces más rápida que el de las bacterias acidogénicas (JARABO, 1999). El balance de este microorganismo conlleva al fracaso, originando la causa principal del desequilibrio del reactor (CASTRO, 2009).

Durante la digestión las concentraciones de las sustancias intermedias deben estar bajas (menos de 10 ppm de ácido acético y menos del 0,1% de hidrógeno en el gas), pero si la población de metanógenos disminuye anormalmente, la concentración de estos pueden aumentar demasiado (hasta 1000 ppm de ácido acético y 10% de hidrógeno en el gas). Este incremento será acompañado de una caída de la producción de metano y también en acidificación del medio de digestión (JARABO, 1999).

2.4. Factores que afectan al proceso de digestión

Los investigadores sobre estas condiciones no llegan a un acuerdo sobre las oscilaciones de estos rangos en el cual estas variables alteran la digestión (JARABO, 1999). Estos factores que actúan en el sistema tienen que ser medidos y controlados mediante la temperatura, la alcalinidad, el pH y el contenido de nutrientes y la toxicidad.

2.4.1. Temperatura: regímenes mesófilo y termófilo

Los rangos de temperatura para que se logre desarrollar la digestión anaerobia están entre los valores de 10°C-70°C (AGUILAR-VIRGEN, 2009). La temperatura tiene una gran participación en la degradación y en el proceso de sus rendimientos metanogénicos.

Observándose dos rangos de máxima actividad: mesófilo, en el cual se da entre valores de: 30°C -40°C, termófilo 45°C- 60°C (CASTRO, 2009). En estos dos grupos prevalecen distintos tipos de bacteria donde las termofílicas son sensibles a los cambios térmicos por lo que generan un costo y un control preciso del sistema.

Las plantas de digestión termófilo son las menos numerosas, siendo previsible a un crecimiento equitativo de los tratamientos mesófilos y termófilos donde su implantación comienza tarde. (STAMS, 2004), siendo estos mucho mejor en rendimientos al obtener los biogás, como en la eliminación de sólidos volátiles y en la eliminación de patógenos.

2.4.2. pH y alcalinidad

El rango adecuado del pH oscila en 6,7 a 7,6 (JARABO, 1999). Varios fenómenos tienen influencia sobre el pH. La alcalinidad del medio determina cuán rápida disminuirá el pH. En los residuos ganaderos suelen presentar elevada alcalinidad, el descenso del pH es poco importante en acumulaciones de ácidos (PALOMINO, 2013). Normalmente, al existir cambios de pH el sistema fracasa irreversiblemente, por lo que se es considerado como una buena variable en el control del proceso (STAMS, 2004).

2.4.3. Contenido de nutrientes y relación C/N

Se identifica por índices bajo de producción de biomasa y por su excasa demanda de nutrientes. La biomasa utiliza nutrientes minerales y compuestos orgánicos que son esenciales para lograr su desarrollo, entre ellas tenemos las vitaminas y fuentes de energía y carbono (AGUILAR-VIRGEN, 2009). Se distinguen entre macronutrientes al carbono, nitrógeno, fósforo, potasio y azufre y entre micronutrientes al cobalto hierro, cobre níquel, selenio, molibdeno, tungsteno y zinc. Así el nitrógeno realiza la síntesis de proteína mediante los microorganismos en su forma amino (PALOMINO, 2013).

Si la relación del carbono y el nitrógeno es escasa sucederá que los microorganismo no realizaran la metabolización de la materia orgánica, mientras si es elevado abra un exceso de nitrógeno que se acumulara en forma amoniacal inhibiendo su proceso (JARABO, 1999). Los residuos en los cultivos como la corteza, el tallo, las pajas y las cascara contiene elevada delignocelulosa y su relación carbono- nitrógeno será elevada por ende originara la baja producción de biogas (AGUILAR-VIRGEN, 2009). La relación carbono-nitrogeno es un tema de debate para la digestión anaerobia (AGUILAR-VIRGEN, 2009). PALOMINO (2013) se establece como valores aceptables los valores dados en un rango de oscilación entre 20-30, para JARABO (1999) el rango de carbono-nitrogeno oscila entre 25-30.

2.4.4. Presencia de tóxicos e inhibidores

En su gran mayoría las sustancias no establecen concordancia entre los niveles tóxicos o inhibitorios debido a su complejidad en la formación de la digestión anaerobia, (AGUILAR-VIRGEN, 2009).

Los microorganismos metanogénicos se encuentran estrictamente y se conoce que el 0.01 ppm de oxígeno inhibe completamente su crecimiento, así mismo la sustancia principal que genera la digestión tóxica es el oxígeno. (JARABO, 1999).

El amoníaco mayormente se encuentra en forma de urea y proteínas debido a la degradación biológica del nitrógeno orgánico en el cual se recomendó mecanismo que permiten la inhibición por amoníaco como la sustitución del pH intracelular, la eliminación de una reacción enzimática y la elevada demanda intracelular. Siendo el ion amonio y el amoníaco formas principales en solución acuosa, determinando que el amoníaco libre es el causante de la inhibición por amonio.

La acumulación del amoníaco libre va a depender de tres parámetros: una de ellas es la temperatura el pH y la concentración de amoníaco total. El incremento del pH de 7-8 hace que la concentración de amonio aumente ocho veces (PALOMINO, 2013).

La teoría escrita por CHEN *et al* (2008) contiene un extenso rango de nitrógeno amoniacal que oscila en 1.7 y 14 g·L⁻¹.

El papel de los ácidos grasos el pH y el amoníaco libre conllevan a un estado estacionario, los ácidos grasos, y el pH llevan a un "estado

estacionario inhibido”, en el que se mantiene un proceso estable, en donde mantiene un proceso estable aun asi su tasa de metano que produce es baja. (CASTRO, 2009).

2.5. Aspectos energéticos y ambientales.

2.5.1. Aspectos energéticos

Este proceso es llevado por residuos organicos con alta carga, siendo por ello un proceso productor neto de energía. (FLOTATS y CAMPOS, 2004)

2.5.2. Aspectos ambientales

Presentan una actividad natural, debido que su composición involucra procesos naturales, el cual tiene una participacion negativa, comprobado en el control de malos olores y eficiente a la reducción efectiva de sus emisiones gaseosas (FLOTATS y CAMPOS, 2004).

La producción de energía renovable realizada por digestión anaerobia, puede sustituir combustibles fósiles y por ello reducir la emisión de gases de efecto invernadero con la reducción simultanea de gases de efecto invernadero debidos a que su propio residuo tiene un doble efecto positivo que aporta ventajas ambientales y económicas de importancia estratégica. Además, para los nutrientes de interés en fertilización, contribuye la ventaja adicional de permitir el reciclado y por tanto reducir el consumo energético fósil asociado a su producción (FLOTATS y CAMPOS, 2004).

2.6. Tipos de reactores según su sistema.

El diseño de los reactores para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos está en función a sistemas de digestión anaerobia (FLOTATS y CAMPOS, 2004).

Cuadro 01. Clasificación de sistemas con tratamiento anaerobio de Fracciones orgánicas de Residuos Municipales (FORM)

Sistema	Denominación	Configuración
	Digestión	
Continuo, de una etapa	húmeda (ST<15%) Digestión seca (20- 40% ST)	Reactor de mezcla completa. Reactor de flujo pistón
	Sin	
Continuo, de dos etapas	retención de biomasa Con retención de la biomasa	02 reactores de mezcla completa o flujo pistón. Primer reactor con mezcla completa y segundo con retención de la biomasa (fracción líquida)
Discontinuo		Recirculación de lixiviado y percolación.

Fuente: FLOTATS y CAMPOS (2004).

Utilizando un reactor se disuelve el residuo hasta una concentración máxima confiriendo un elevado grado de simplicidad originando una mayor complejidad en su etapa de pretratamiento y el consumo de agua fresca

La carga máxima para separación es del orden de 6 kg SV/m³·d, y para la mecánica siendo de orden 9 kg SV/m³·d. Donde en el sistema de pretratamiento pueden producirse pérdidas de materia orgánica, que pueden alcanzar el 15-25% (FLOTATS y CAMPOS, 2004).

En la digestión seca se trabaja con residuos con una concentración entre el 20 y 40% ST. No es necesaria la dilución utilizándose reactores de flujo pistón. A mayor complejidad del reactor se compensa con una mayor simplicidad del sistema de pretratamiento, menores pérdidas de materia orgánica y la posibilidad de trabajar con residuos separados mecánicamente o sin apartar (FLOTATS y CAMPOS, 2004).

La configuración en las dos etapas permite la separación del proceso de hidrólisis y acidificación del primer reactor, posteriormente la acetogénesis y metanogénesis que es el segundo reactor. La utilización de dos reactores, muestra un interés controvertido y puede resultar ventajoso si el primer reactor es capaz de absorber sobrecargas puntuales, aunque esta ventaja no ha reportado. A nivel de planta piloto se han conseguido mejores resultados, sin embargo, a niveles de implantación la escala industrial es bajo (FLOTATS y CAMPOS, 2004).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación y descripción del área de estudio

3.1.1. Lugar de ejecución

El trabajo de investigación se ejecutó en el Laboratorio de Calidad de Agua de la especialidad de Ingeniería Ambiental de la facultad de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

3.1.2. Ubicación política

El laboratorio de calidad de agua esta ubicada en la Universidad Nacional Agraria de la Selva en la ciudad de Tingo Maria, distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado, región de Huanuco.

3.1.3. Ubicación geográfica

Está ubicado en las coordenadas UTM las cuales son 18 L 390700 m E, 8970223 m S, con una altitud de 674 m.s.n.m.

3.1.4. Condiciones climáticas

Esta zona se caracteriza por presentar un clima tropical (selva aLa), con una temperatura media anual de oscilante entre 22°C y 32°C alcanzando una temperatura máxima de 36°C y disminuyendo a un mínimo de 17°C. Durante

la ejecución del presente trabajo la temperatura ambiental tomada oscilo entre 24°C y 30°C alcanzando una temperatura promedio de 27°C.

Presenta una humedad relativa máxima de 88% y una mínima de 74%, con una precipitación media anual de 3300 mm, con una presión atmosférica de 0.802 atm.

3.2. Materiales y equipos

3.2.1. Materiales

- Lapiceros
- Guardapolvo
- Lentes de seguridad
- Guantes de PVC reforzado T9
- Ropa de campo (Botas, polo manga larga, etc.)
- Mascarilla (Redline Respirator 2 vías sin cartucho)
- Baldes de PVC de 20 L.
- Bolsas herméticas Ziploc.
- Botella de vidrio de 7 L
- Manguera transparente de 2 m (Diámetro 0.005 m)

- Agua destilada
- Probetas graduadas (1 L, 100 mL y 10 mL)
- Vaso precipitado (100 mL)

3.2.2. Equipos

- Reactor de estructura cilíndrica
- Equipo para Test de Actividad Metanogénica Especifica
- Cámara fotográfica digital marca Sony
- Termómetro digital (Margen de error : 0.5°C)
- GPS Garmin GPSMAP 64s (Error: 5 m)
- Balanza Digital de 50 kg (Error : 1 gr)
- Balanza Digital de 5 kg (Error : 0.1 gr)
- Balanza Analítica

3.2.3. Softwares

- Software Microsoft Excel y Word v 365 (Gratis: dominio edu.pe)
- Software WRPLOT View – Freeware (03F3CF93662B7ECC)
- IBM SPSS 24 Statistics 24
- Software AutoCAD 2016

3.3. Diseño de investigación

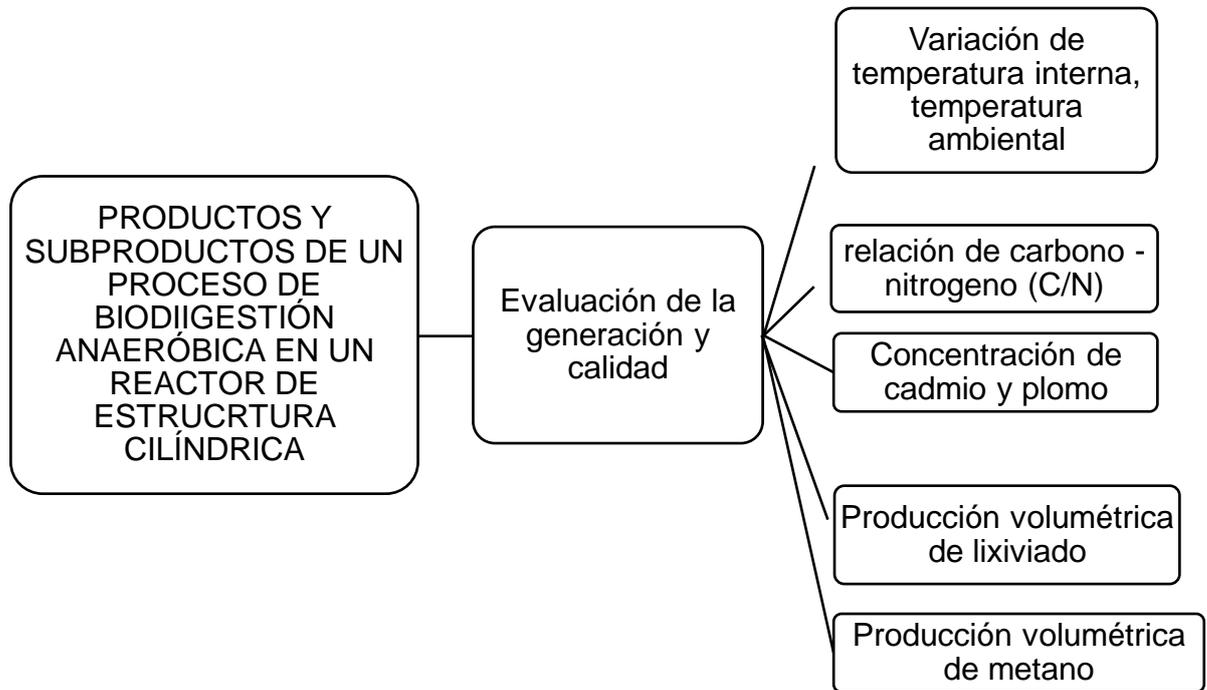


Figura 02. Diseño de investigación

3.3.1. Tipo de investigación

- Descriptiva

3.3.2. Unidad experimental

- Reactor de estructura cilíndrica provisto de tres cámaras

3.3.3. Variables

- Temperatura interna del reactor.
- Temperatura ambiental.
- Relación C/N del lixiviado generado.
- Relación C/N del material sólido generado.

- Concentración de metal pesado cadmio del lixiviado generado.
- Concentración de metal pesado plomo de los lixiviados generados.
- Concentración de metal pesado cadmio del material sólido remanente.
- Concentración de metal pesado plomo del material sólido remanente.
- Volumen de lixiviado generado.
- Volumen de gas Metano generado.
- Volumen de material sólido generado.

3.4. Metodología

3.4.1. Acondicionamiento de las instalaciones a llevar a cabo la investigación

Se identificó el área de trabajo dentro del laboratorio que fue un lugar fresco y seco, despejando el perímetro, se limpió y se determinó el lugar donde se instaló el reactor de estructura cilíndrica.

3.4.2. Diseño del reactor anaerobio vertical

Se utilizó un reactor anaerobio, debido a que sus sistemas reducen considerablemente las superficies de compostaje, logrando un mejor control de sus parámetros de fermentación, controlando los olores de forma adecuada, realizando el proceso en muy corto tiempo y requieren menos espacio vertical porque operan de forma continua (el material a compostar se encuentra en forma

de masa única) o discontinua (la masa en compostaje se sitúa en distintos niveles) (NEGRO *et al.*, 2000).

3.4.3. Características del reactor

El reactor de estructura cilíndrica fue construido de metal galvanizado, cuyas dimensiones fueron 1.19 m de altura y 0.49 m de diámetro; el cual tenía un revestimiento de tecnopor (Poliestireno expandido) que se encontraba ubicado entre dos cilindros concéntricos de metal, que sirvió para aislar las cámaras internas, logrando de esta manera una mejor toma de datos respecto a la variación de la temperatura del proceso de digestión anaerobia (Ver Anexo)

El reactor de estructura cilíndrica estaba provisto de tres cámaras ubicadas a diferente altura que sirvió para separar los sólidos, líquidos y gases generados; al reactor se instaló el equipo para determinar volumétricamente la generación de metano, que consistía en conectar el reactor por medio de una manguera a una botella de vidrio (de 7 L de capacidad aproximadamente) en posición invertida que contuvo una solución fuertemente básica.

3.4.4. Obtención de residuos sólidos

El material a descomponer se obtuvo de la planta de tratamientos de residuos sólidos orgánicos del programa de segregación en la fuente "V.E.C.S." (Vecino Educado Ciudad Sostenible) que pertenece a la Municipalidad Provincial de Leoncio Prado, de la ciudad de Tingo María.

La materia orgánica que se obtuvo de esta planta de tratamiento fue un material fresco, seleccionado (solamente material orgánico procedente de

residuos domésticos) y de tamaño aproximado de 0.01m x 0.01m, este material se sacó justo antes de que ingrese al proceso de descomposición aerobia.

Para cada repetición se utilizó 20 kg de material orgánico, lo cual se trasladó en 02 baldes cada uno de 20 L directamente al reactor.

3.4.5. Variación de la temperatura interna en las cámaras del reactor y la temperatura ambiental durante la etapa de la materia organica en su proceso de descomposición sus etapas en la materia organica durante su proceso de descomposicion.

a. Registro de temperatura de las cámaras del reactor

El reactor de estructura cilíndrica tenía tres (03) cámaras separadas a diferente nivel, la temperatura se registró en cada cámara de manera independiente.

– Cámara 01

Los datos de temperatura en la cámara 01 se registraron tres veces por día en tres diferentes horarios (7 a.m., 1 p.m. y 7 p.m.) durante los primeros 10 días de haber empezado, posteriormente, se realizó mediante un termómetro digital, cuyo sensor se ubicó de manera fija dentro del reactor.

– Cámara 02

Los datos de temperatura en la cámara 02 se registraron tres veces por día en tres diferentes horarios (7 a.m., 1 p.m. y 7 p.m.) entre el día 11 y día 20 de haber empezado el proceso de descomposición, se realizó mediante un termómetro digital, cuyo sensor se ubicó de manera fija dentro del reactor.

– Cámara 03

Los datos de temperatura en la cámara 03, conocida también como cámara de lixiviados, se registraron tres veces por día en tres diferentes horarios (7 a.m., 1 p.m. y 7 p.m.) durante los 20 días que duró la descomposición de la materia orgánica, se realizó mediante un termómetro digital, cuyo sensor se ubicó de manera fija dentro del reactor.

b. Registro de datos de la temperatura ambiental

Los datos de temperatura ambiental se registraron una vez por día en el horario de (1 p.m.) durante los 20 días que duró cada el proceso. Se realizó mediante un termómetro digital, cuyo sensor se ubicó de manera fija afuera del reactor.

c. Variación de temperatura mensual

Se obtuvo tres series de datos mensuales, una serie por cada mes (febrero, marzo y abril), en donde se han producido tres promedios mensuales de variación; la OMM (2011), nos recomienda utilizar medidas de tendencia, debido a que tienen como objeto indicar el valor central en torno al que tienden a agruparse los datos.

Se uso la media aritmética o, como normalmente se conoce, el promedio, debido que es una de las estadísticas más frecuentemente utilizadas en climatología. Se calcula dividiendo la suma de los valores entre el número de valores.

3.4.6. Estimación de la relación carbono/nitrogeno(C-N) y la concentración de metales pesados como cadmio y plomo del

material sólido remanente y lixiviados generados en un proceso de descomposición anaeróbica

Los análisis fisicoquímicos de las muestras de lixiviado y material sólido descompuesto proveniente de cada repetición se enviaron a realizar en el laboratorio de análisis de Suelos de la Facultad de Agronomía de la U.N.A.S.; las muestras se tomaron el día 20, después de haber terminado el periodo de descomposición de cada repetición.

Para cuantificación de metales pesados, se utilizó el método de absorción en llama.

3.4.7. Producción volumétrica de lixiviado generado en la materia orgánica durante su proceso de descomposición orgánica

Los datos volumétricos lixiviados se tomaron a los 20 días de haber iniciado, abriendo una llave que se ubicaba en la parte inferior del reactor, que evacuaba todo el lixiviado producido durante 20 días proveniente de la cámara 01 y cámara 02, y almacenado en la cámara 03 durante todo este tiempo; para poder cuantificar el volumen se utilizó tres probetas graduadas (de 1L, de 100 mL y otra de 10 mL).

3.4.8. Producción volumétrica de metano generado en el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica

Se utilizó un método no convencional de medición de gases en la digestión anaerobia descrita por LÓPEZ (2011) que consistió en estimar el porcentaje de metano presente en el biogás generado en el reactor, el cual fue evacuado a través de un tubo que traslado a todos los gases producidos hacia

una botella de vidrio de 7 L de capacidad que contenía una solución de hidróxido de Sodio (NaOH) al 1 molar (0.9156 molar en condiciones normales) y que a medida que el gas iba llegando a la botella de vidrio este se iba lavando en la solución fuertemente básica (pH mayor a 12) atrapando las impurezas como el CO₂ del biogás que se convirtió en carbonato, que fue absorbido dentro de la solución, y dejando pasar solamente el gas metano; esta acción hizo que únicamente el gas metano pase a través de la solución y un volumen equivalente al este gas sea expulsado de la botella invertida por empuje se evacuó la solución mediante otra manguera que conecta a un contenedor donde diariamente se calculaba el volumen de esta solución con la ayuda de vasos precipitados de 1 L, 0.1 L y 0.01 L.

Los datos de la producción volumétrica del gas metano, se registraron tres veces por día en tres diferentes horarios (7 a.m., 1 p.m. y 7 p.m.) durante los 20 días que duró el proceso de evaluación de la descomposición de la materia orgánica.

3.4.9. Normalización de resultados obtenidos en laboratorio

Fue indispensable tener en cuenta que los resultados obtenidos, fueron generados en condiciones de laboratorio y se vio la necesidad de poder llevar los resultados a condiciones ideales es por eso que en la ecuación 1, se expresa la ley general de los gases ideales:

$$PV=R n T \dots(1)$$

Donde:

- P: presión en atmosferas (atm) 1atm = 760 mmHg.

- V: Volumen en litros
- n : número de moles
- R = 0,082 atm L / K mol (es una constante, siempre la misma)
- T: temperatura en Kelvin (K)

Para transformar la temperatura registrada a grados Kelvin se hizo mediante la ecuación 2:

$$T (^{\circ}\text{K}) = T (^{\circ}\text{C}) + 273 \dots(2)$$

Dónde:

- T ($^{\circ}\text{K}$): Temperatura en grados Kelvin
- T ($^{\circ}\text{C}$): Temperatura registrada en grados Centígrados

Para poder llegar a la ecuación de los gases ideales, se tuvo cuenta 3 leyes:

Para la ley de Boyle: cuando la cantidad fija de un gas a temperaturas constantes hace que el volumen se haga inversamente proporcional a la presión que ejerce, es la ecuación 3:

$$PV = C (T, n) \dots(3)$$

Donde:

- P: Representa la presión
- V: El volumen que ocupa
- C(T, n): Una constante que depende la Temperatura (T) y el número de moles (n)

Para la ley de Charles y Gay-Lussac: donde la cantidad fija de un gas constante hace que el volumen que ocupa sea directamente proporcional a la temperatura que se encuentra, apreciando en la ecuación 4:

$$V/T = C(P, n) \dots(4)$$

Donde:

- T: Representa a la temperatura
- V: Es el volumen que ocupa
- C(P, n): constante que depende la Presión y número de moles (n)

Donde al despejar el volumen de las tres ecuaciones se tuvo la ecuación 5:

$$\left. \begin{array}{l} V = C(T, P) n \\ V = C(T, n) 1/P \\ V = C(P, n) T \end{array} \right\} \rightarrow C(T, n) T \text{ y } C(T, P) n = C(P, n) T \dots(5)$$

La ecuación 6, se puede apreciar que el primer componente no depende la presión y el segundo no depende de temperatura:

$$C(T, n)/T = C(P, n)/ 1/P \dots(6)$$

Por ello, como son iguales, los dos tienen que ser independiente de P y de T; tratándose de una constante, si n no cambia. Así que se cumple que, donde C(n) es una constante que sólo depende del número de moles (n). Despejando C(T, n), se obtiene la ecuación (7):

$$C(T, n) = C(n)T \dots(7)$$

Y llevándolo a la ley de Boyle quedando la siguiente ecuación 8:

$$PV = C(n)T \Rightarrow V = C(n)T / P \dots(8)$$

Y a la vez la ecuación 5, se puede escribir como:

$$C(T,P) / T = C(P,n) / n \dots(9)$$

La ecuación 9, se aprecia apreciar que el primer componente no depende del número de moles (n), el segundo no depende de temperatura (T). Por lo ello, como son iguales, los dos tienen que ser independientes de n y de T; se trata de una constante si presión no cambia, y se obtuvo la ecuación 10:

$$C(P,n) / n = C(T,P) / T = C(P) \dots(10)$$

Donde:

- C(P): Constante que sólo depende de P (Despejando)
- C(P,n) = C(P) n y llevando este resultado a la ley de Charles y Gay-Lussac quedó la ecuación (11),

$$V / T = C(P)n \Rightarrow V = C(P) nT \dots(12)$$

Se combinó las ecuaciones (8) y (11):

$$C(n)T / P = C(P)n T \dots(13)$$

$$C(n) / n = C(P) / 1/P \dots(14)$$

La ecuación 13, se aprecia que el primer componente no depende de la temperatura ni la presión, el segundo no depende de temperatura ni del número de moles. Por ello, como son iguales, los dos tienen que ser independientes de T de P y de n; es decir, se trata de una constante absoluta, R. Donde se cumple que:

$$C(n) / n = C(P) / 1/P = R \dots(15)$$

$$C(n)=nR \dots(16)$$

Se reemplazo la ecuación (8) y se obtuvo la ecuación 18, la ecuación de los gases ideales:

$$V = n RT / P \dots(17)$$

$$PV = n RT \dots(18)$$

Donde:

- P: Presión atmosférica
- V: Volumen
- n: Número de moles
- R: 0 082 atm · L / K · mol
- T: Temperatura en grados Kelvin

La ecuación 18, también se puede escribir de la siguiente forma como se aprecia en la ecuación 19:

$$PV / T = nR, \text{ Sí } nR = \text{Constante para una cantidad fija de gas} \dots(19)$$

Sea una cantidad fija de gas a temperatura T_1 , volumen V_1 y presión P_1 . Si modificamos las variables de estado a otros valores diferentes T_2 , V_2 y P_2 (sin modificar la cantidad de gas), entonces, de la ecuación 19 se desprende a la siguiente ecuación:

$$P_1V_1 / T_1 = P_2V_2 / T_2 \dots(20)$$

En la ecuación 20 expresa de otra forma la ley para una cantidad de gas constante.

IV. RESULTADOS

4.1. Evaluación de la variación de la temperatura en la descomposición de la materia orgánica durante su proceso.

Observamos en el Cuadro 2 que la temperatura interior en el reactor va disminuyendo desde la cámara 01 hasta la cámara 03, donde se reciben los lixiviados, así mismo se observa que la temperatura ambiental fue inferior a la de las cámaras 01 y 02, pero superior a la de la cámara 03.

Cuadro 02. Variación de la temperatura en las cámaras del reactor anaeróbico

Repetición	Cámara 01 (°C)	Cámara 02 (°C)	Cámara 03 (°C)	Variación (°C) 1-Feb	Variación (°C) 2-Mar	Variación (°C) 1-Abr	Temperatura Ambiental (°C)
R1	33.55	30.11	26.90	4.03	3.82	7.26	28.96
R2	33.01	29.73	26.39	3.88	3.94	7.22	27.45
R3	37.62	29.48	27.24	8.76	2.85	10.99	28.51
R4	33.11	29.71	25.56	4.00	4.76	8.15	29.09
Promedio	34.32	29.76	26.52	5.17	3.84	8.41	28.50

4.2. Evaluación de la relación de carbono – nitrógeno (C/N) y metales pesados como cadmio (Cd) y plomo (Pb) del material remanente procedente de la materia orgánica en descomposición.

En el Cuadro 3, se observa que el hierro es el metal con la más alta concentración promedio presente en la materia orgánica residual, así mismo, se aprecia una concentración promedio significativa de plomo de 2.71 ppm comparado con el cadmio con 0.65 ppm y con respecto al C/N se tiene una relación promedio de 12.11 carbonos por cada molécula de nitrógeno, también se observa que el hierro es el metal con la más alta concentración promedio presente en el material lixiviado con 121.28 ppm, así mismo, se aprecia una concentración promedio significativa de plomo de 0.26 ppm comparado con el cadmio con 0.05 ppm y con respecto al C/N se tiene una relación promedio de 16.95 carbonos por cada molécula de nitrógeno

Así mismo se observa que los valores promedios de los parámetros de los elementos y compuestos químicos analizados como cadmio, plomo, nitrógeno, óxido de fósforo III, calcio, magnesio, potasio, sodio, cobre, hierro, zinc y manganeso presentan valores mayores en el material orgánico sólido residual que en los lixiviados, a diferencia que en lo que respecta a los datos promedio analizados de la relación C/N y pH se observa que presentan valores mayores en los lixiviados generados.

Cuadro 03. Comparación de la composición fisicoquímica de sólidos orgánicos residuales y lixiviados procedentes del proceso de la materia organica en descomposicion

Componentes Fisicoquímicos	Materia orgánica Sólida	Lixiviado
Cd (ppm)	0.65	0.05
Pb (ppm)	2.71	0.26
Cu (ppm)	1.96	0.16
Fe (ppm)	1008.28	121.28
Zn (ppm)	44.05	4.48
Mn (ppm)	17.83	1.53
C/N	12.11	16.95
pH	6.21	6.38
Humedad (%)	16.53	93.85
N (base seca %)	5.15	3.87
P ₂ O ₅ (%)	0.56	0.51
Ca (%)	2.12	1.83
Mg (%)	6.58	6.26
K (%)	2.93	2.84
Na (%)	1.31	1.15

4.3. Evaluación de la producción volumétrica de lixiviado generado durante el proceso de la materia orgánica en descomposición.

Del cuadro 04 Observamos que la producción promedio de lixiviado por tratamiento es 5.06 L en condiciones normales, para lo cual se tuvo en cuenta la presión atmosférica de Tingo María, presión atmosférica en condiciones normales, temperatura condiciones normales, temperatura promedio interna del reactor y el volumen registrado en condiciones de laboratorio.

Cuadro 04. Producción volumétrica del lixiviado

Repetición	P Amb. (atm)	P CN (atm)	T Amb. (°K)	T CN (°K)	V Amb (L)	V CN (L)
R1	0.802	1	302.51	273	7.06	5.11
R2	0.802	1	302.04	273	6.99	5.07
R3	0.802	1	303.77	273	6.88	4.96
R4	0.802	1	301.79	273	7.01	5.09
Promedio	0.802	1	302.53	273	6.99	5.06

- P Amb.: Presión atmosférica de Tingo María. - T CN: Temperatura a condiciones normales.

- P CN.: Presión atmosférica a condiciones normales. – V CN: Volumen a condiciones normales.

- T Amb: Temperatura interna promedio de las cámaras. – V Amb: Volumen a condiciones de laboratorio.

Figura 04, se aprecia los volúmenes registrados en en condiciones normales del lixiviado en cada repetición, registrando desde 4.96 hasta los 5.11 litros, para el gráfico de barras y un promedio de 5.06 litros, representada por la línea.

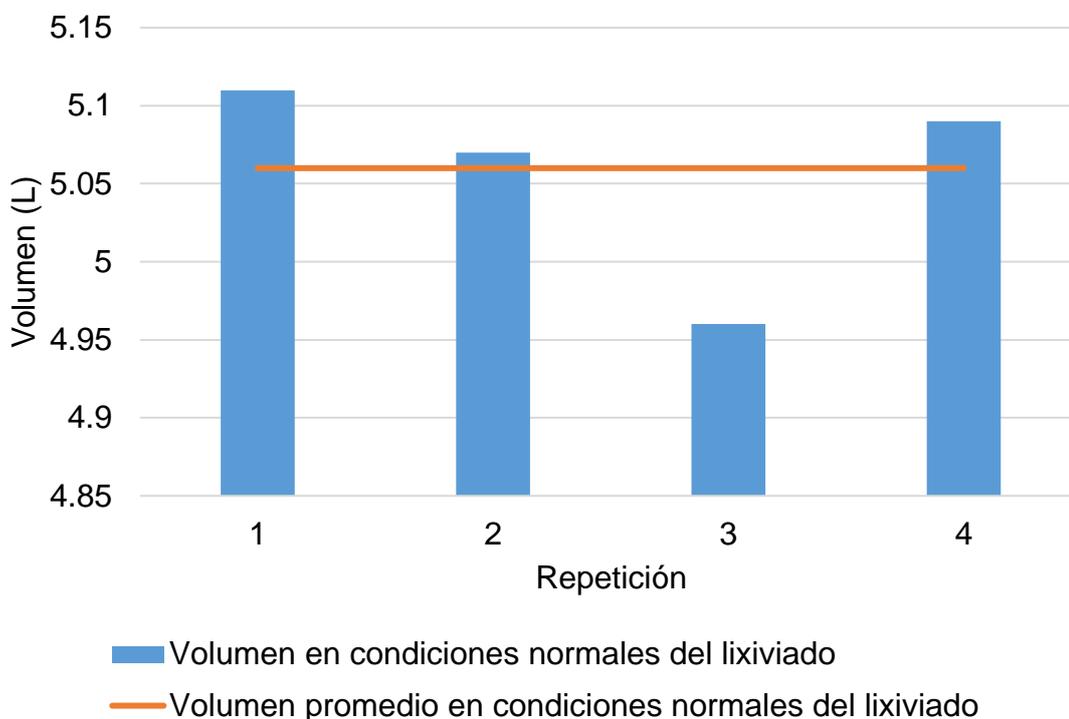


Figura 03. Producción volumétrica del lixiviado

4.4. Evaluación de la producción volumétrica de metano generado en la descomposición de la materia orgánica durante su proceso.

Observamos en el cuadro 5, que la producción volumétrica con respecto al metano, en condiciones normales, lográndose obtener 107.02 litros aproximadamente.

Cuadro 05. Producción de metano en el proceso de descomposición anaerobia de la materia orgánica

Repetición	P (atm)	R (atm·L/mol·K)	T° (°K)	n CH ₄ (mol)	V CH ₄ (L)
R1	1.0000	0.082057	273.00	4.488	100.53
R2	1.0000	0.082057	273.00	4.846	108.57
R3	1.0000	0.082057	273.00	5.111	114.48
R4	1.0000	0.082057	273.00	4.664	104.49
Promedio	1.000	0.082057	273.00	4.777	107.02

P: Presión atmosférica R: Constante de gases ideales n CH₄: Número de moles del metano V CH₄: Volumen generado por el metano

Figura 4, se observa los volúmenes registrados en cada repetición, registrando desde 100.53 hasta los 108.57 litros, para el gráfico de barras y un promedio de 107.02 litros, representada por la línea.

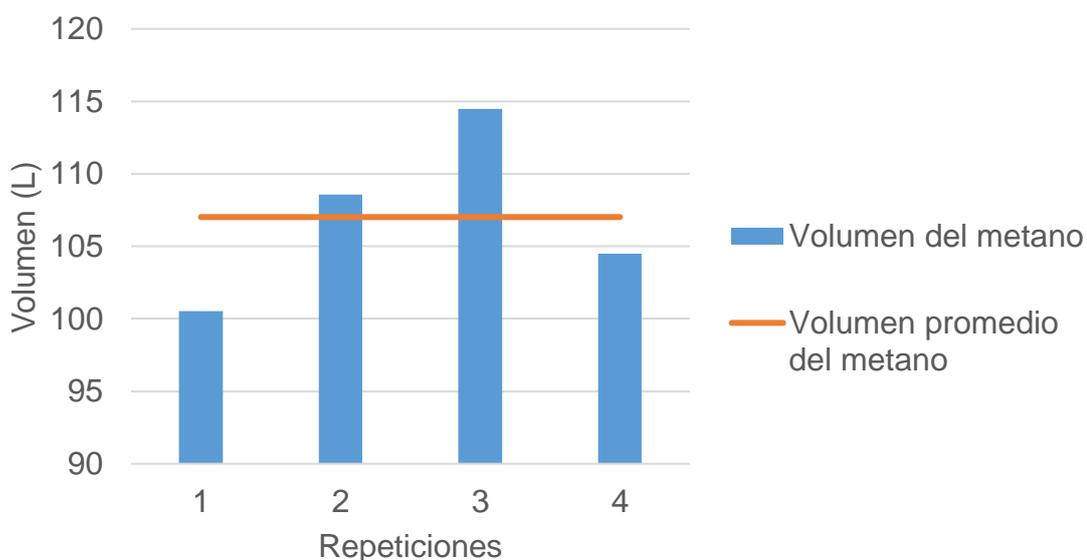


Figura 04. Producción de metano (CH₄) durante la descomposición anaerobia de la materia orgánica

V. DISCUSIÓN

Respecto a la variación de temperatura en las cámaras del tanque reactor anaeróbico aislado, en la cámara 1 que fue la cámara de retención y de un pre acondicionamiento de los residuos sólidos orgánicos, se logró un incremento promedio constante de temperatura de 5.81°C , con respecto a la temperatura ambiental. En la cámara 2 donde se desarrolló la descomposición anaeróbica por completo se obtuvo un incremento promedio de 1.26°C con respecto a la temperatura ambiental. La cámara 3 donde se depositaban los lixiviados tuvo un descenso de 1.97°C con respecto a la temperatura ambiental.

De los resultados obtenidos, podemos observar que se produjo un descenso de temperatura entre las dos primeras cámaras, lo cual teóricamente no favorece el avance de la materia orgánica a descomponerse. Al respecto GURDAL y ARSLAN, (2009) mencionan que al variar la temperatura se da el aumento de los A.G.V. (Ácidos Grasos Volátiles) y pH, generando un desequilibrio en la digestión por lo que directamente participa en la actividad metanogénica. Que la temperatura descienda ralentiza el proceso de descomposición, debido a la inestabilidad en el proceso donde origina la acumulación tanto de compuestos intermedios inhibidores o como la acumulación de los cuales genera acumulación de A.G.V. haciendo la reacción más lenta (IDAE, 2007).

En la investigación se observó que los rangos de temperatura no alcanzaron una degradación en la fase termófila, dado que la temperatura en la cámara 1 fue un promedio de 33.6°C, temperatura que corresponde a una fase mesófila, la cual presentaría una disminución en la cinética microbiana dentro del tanque reactor, sin embargo, se pudo observar un progreso importante de biodegradación.

Algunos autores mencionan que los porcentajes de mineralización superiores al 60% indican la aptitud del polímero para ser degradado biológicamente. Bajo estas condiciones de prueba, la muestra de ensayo (polímero a base almidón de yuca) presenta niveles adecuados de biodegradación en ambientes anaerobios termófilos a las concentraciones de sólidos al presentar un 63% de biodegradación en 30 días (CAMACHO y HOYOS, 2014).

A pesar que el tanque reactor anaeróbico utilizado en esta investigación fue aislado, para reducir el intercambio de calor con los alrededores, se puede atribuir la falta de incremento de temperatura, en las cámaras; al descenso de los lixiviados, producto de la hidrólisis, hacia la cámara 3, la cual no estuvo provista de aislamiento, dado que el diseño del tanque fue acondicionado para separar los lixiviados, lo cual podría haber sido una fuga continua de la carga microbiana, inhibiendo algunas reacciones microbianas.

De las características fisicoquímicas del sólido residual, denominado biosol, y del lixiviado que por la procedencia de un proceso anaeróbico podría

ser denominado un tipo de biol, en los resultados determinados, de manera general el biosol presenta, mayor concentración de macro y micronutrientes con una alta concentración de fierro, sin embargo, debemos resaltar que el biol obtenido tiene mayor relación de C/N, así mismo que su pH es ligeramente mayor.

Con respecto a los valores de cadmio y plomo obtenido en los productos, vemos que son valores bajos, siendo el biol el de menor concentración de cadmio y plomo e inferiores a los establecidos por la Unión Europea para un compost. (BRINTON, 2000).

QUIÑONES *et al.*, (2016), en su investigación sobre la calidad de un abono líquido de heces de alpaca, denominan al producto: Alpa-biol, el cual presentó $0.03 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $0.28 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ y $0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de cadmio, cromo y plomo respectivamente, así mismo la relación C/N es mayor a la obtenida en la presente investigación, dado que se trabaja con un consorcio bacteriano específico.

Para el caso del pH, el valor obtenido del biol es cercano al punto neutro, el cual sería adecuado para su uso directo como abono foliar, sin embargo algunos bioles tienen valores de pH muy ácidos (FÉLIX *et al*, 2008)

Los valores de pH obtenidos fueron de 6.21 y 6.38 para el biosol y el biol respectivamente, los cuales podrían deberse a la buena alcalinidad generada y aprovechada en el proceso de biodegradación, considerando que el rango óptimo de pH para los procesos de biodegradación es de 6 a 8, es probable que el proceso haya conseguido una buena eficiencia.

MCCARTY (1964) citado por SORIA *et al.* (2001), indica que el rango óptimo de pH para lograr una mayor eficiencia de la biodigestión en sistemas anaeróbicos oscila entre 6,6 y 7,6; al mantener este rango, nos indica de que está operando correctamente.

Referente a la masa resultante de los componentes de la biodegradación en el tanque reactor, el 52.91% corresponde al material sólido remanente (biosol), el 46% al lixiviado (biol) y un 1.09% a los gases formados, se puede notar una baja producción de biogás, ya que por el pH de los productos, de 6.21 y 6.38, se habrían desarrollado más microorganismos fermentativos que bacterias metanogénicas, lo que produce mayor cantidad de dióxido de carbono (CH_4), que diluidas y solubiliza en el lixiviado y el agua escurrida, se separan del sólido en biodegradación por gravedad hacia la cámara 3, generando la alcalinidad en el proceso de descomposición de los lixiviados.

Para el Ph la alcalinidad es utilizada como amortiguador y así impedir un abrupto cambio en sus valores del pH. El control de pH por el cual cada microorganismo tiene un rango diferente de pH óptimo (DURRUTY, 2013).

VI. CONCLUSIONES

1. La temperatura máxima lograda con el reactor anaeróbico aislado solo favorece el desarrollo de bacterias mesófilas.
2. La relación C/N es baja comparado con un óptimo de 20 - 30 C/N para abonos líquidos.
3. La concentración de cadmio y plomo en los lixiviados y en el material sólido remanente, son inferiores a los requeridos para un biol y un compost.
4. El pH de los lixiviados y del material sólido remanente obtenidos son estables y cercanos al punto neutro, favorables para biofertilizantes.
5. El tanque reactor anaeróbico en un período de 20 días produjo en promedio respecto a los lixiviados un volumen de 6.98 L con un peso de 9.20 Kg que representa el 46% del peso de carga inicial sólida cuyas características fisicoquímicas finales se asemejan al de un biol.
6. Se estimó el volumen del gas metano (CH_4) producido durante el proceso de descomposición anaerobio el cual fue 148 L a condiciones ambientales con un peso de 0.077 kg aproximadamente.
7. Con la digestión anaeróbica en un periodo de 20 días, el volumen de residuos sólidos se redujo en un 97.48% aproximadamente.

VII. RECOMENDACIONES

1. Realizar investigaciones adicionales a la presente, para evaluar las tecnologías adecuadas que permitan remover metales pesados tales como el plomo y el cadmio.
2. Plantear investigaciones futuras, con pruebas de germinación, en la cual pueda manipular variables que permitan incrementar la relación C/N.
3. Realizar pruebas piloto estableciendo este tipo de reactores a nivel domiciliario, a fin de ajustar la operatividad del reactor anaeróbico.
4. Realizar investigaciones para aplicar un secado a la materia orgánica remanente, a fin de aprovecharlo como un compost.
5. Realizar pruebas en este tipo de biorreactores anaeróbicas, con fines de optimización de la biodigestión, recirculando una fracción de los lixiviados producidos en la carga que va ingresando al reactor.

VIII. ABSTRACT

"Products and sub products of a process of anaerobic biodigestion in a reactor of cylindrical structure"

In the present investigation, the qualitative and quantitative evaluation of products and subproducts of the anaerobic digestion of the organic matter of domestic waste was carried out, for its possible use as biofertilizers. The process was carried out in a cylindrical batch reactor with thermal insulation, equipped with three interior chambers, the first for accumulation and pre-digestion, the second for anaerobic digestion itself with mixing paddles and the third for accumulation and evacuation. leachate. The bioreactor was filled with an initial weight of 20 kg of organic waste, it was hermetically sealed and the temperatures of the three chambers were recorded, the digestion time was 20 days, then the weights and volumes of the remaining solid material were quantified of digestion, leachate and gases emanated. The quantitative results regarding the percentage in weight were: 52.91%, 46% and 1.09% for the residual solid of the digestion, the leached and the gases emitted respectively, for the percentage in volume were: 2.52%, 2.68% and 94.8% for the residual solid, digestion, leachate and gases emanated respectively. Qualitatively the products obtained presented a pH between 6.21 and 6.38 which are stable and favorable for use as biofertilizers. The concentration of heavy metals, cadmium

and lead of the solid residual and leachate products are lower than those required for a compost and the C/N ratio is low compared to an optimum of 20 to 30 for liquid fertilizers.

Keywords: anaerobic biodigestion, discontinuous bioreactor, leachate, organic matter, C/N ratio, heavy metals.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUILAR-VIRGEN, V. 2009. Potencial Energético de los Residuos Sólidos Municipales. (FacuLad de Ingeniería Ensenada, Ed.) México: Universidad Autónoma de Baja California.
- BRINTON, W. 2000. Compost Quality standards and Guidelines. Final Reports by woods End Research Laboratory for the New York State Association of Recyclers. New York, USA. 42 p.
- CAMACHO, R. HOYOS, J. 2014. Biodegradación anaerobia de un Material biodegradable bajo digestión Anaerobia termófila. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial Vol 12 No. 2 (20-29), Colombia.
- CASTRO, G. 2009. Congreso Internacional de Innovación en la Gestión y Tratamiento de los Residuos Municipales. España: Agencia de Residuos de Catalunya.
- CHEN, Y., CHENG, J., CREAMER, K., 2008. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. Bioresource Technology 99, 4044–4064.
- DURRUTY, I. 2013. Degradación anaeróbica de efluentes de la industria del procesado de papa, Tesis para optar por el título de Doctor en Ingeniería Departamento de referencia: Ingeniería Química, Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires, Argentina.

- FÉLIX H., SAÑUDO, T., ROJO, G., MARTÍNEZ M., OLALDE V., 2008. Importancia de los abonos orgánicos. *Ra Ximhai* .4(1). 57-67 pp.
- FERNÁNDEZ J., PÉREZ, M., ROMERO, L. 2014. Dry thermophilic anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid wastes: Solid retention time optimization. *Chem. Eng. J.*251, 435–440.
- FLOTATS, X., CAMPOS, E. 2004. Procesos biológicos: La digestión anaerobia y el compostaje. *Research Gate*.
- GERARDI, M. 2003. *The microbiology of anaerobic digesters*. New Jersey, John Wiley and sons.
- GURDAL, K., ARSLAN, S. 2009. Estimation of Biogas Production Rate in a Thermophilic UASB Reactor Using Artificial Neuronal Networks. *Environ Model Assess*, 607-614.
- IDAE. 2007. *Biomasa-Digestores anaeróbicos*. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- JARABO, F. 1999. *La energía de biomasa*. (2º edición ed.). Madrid, España.
- NAVARRO, R. 2002. *Manual para hacer composta aerobia* (1º Edición. ed.). El Salvador: CESTA Amigos de Tierra.
- NEGRO, M., VILLA, F., AIBAR, J., ALARCÓN, R., CIRIA, P., CRISTÓBAL, M., DE BENITO, A., GARCÍA, A., GARCÍA, G., LABRADOR, C., LACASTA, C., LEZAÚN. C., MECO, R., PARDO, G., SOLANO, M., TORNER, C. y ZARAGOZA, C. 2012. *Producción y gestión del compost*. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. Madrid, España.

- LÓPEZ, G. 2011. Método no convencional de medición de gases en la digestión anaerobia. Posgrado. Bogotá (Colombia). Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- LÓPEZ, C. 2016. Automatización de un Proceso de Biodigestión Anaeróbica. Caracas (Venezuela). Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional Bolivariana.
- PALOMINO, V. 2013. Tratamiento de Residuos Sólidos Domésticos mediante Biodigestores para la Obtención de Biogás y Bioabonos. Lima, Peru: Universidad Nacional Agraria la Molina.
- PERALA, L., JUSCAMAITA, J., MEZA, V. 2016. Obtención y caracterización de abono orgánico líquido a través del tratamiento de excretas del ganado vacuno de un establo lechero usando un consorcio bacteriano ácido láctico. *Ecología Aplicada* 15(1): 1-10. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria la Molina.
- SORIA, M. *et al.* 2001. Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo. *Terra* 19:353-362.
- STAMS, A., 2004. Metabolic interactions between anaerobic bacteria in methanogenic environments. *Antonie Van Leeuwenhoek*.
- ORGANIZACIÓN METEOROLOGICA MUNDIAL (OMM), 2011. Guía de prácticas meteorológicas. Edit. Organización Meteorologica Mundial. Suiza. 128 pp.

X. ANEXOS

Apéndice 1: Registro de temperatura interna y ambiental

Cuadro 06. Registro de temperatura ambiental

R	N°	Evolución	Fecha	T (°C)	R	N°	Evolución	Fecha	T (°C)
	1	1	12/02/2016	27.47	1	41	23/03/2016	26.55	
	2	2	13/02/2016	28.97	2	42	24/03/2016	26.82	
	3	3	14/02/2016	28.81	3	43	25/03/2016	25.45	
	4	4	15/02/2016	29.18	4	44	26/03/2016	27.34	
	5	5	16/02/2016	28.69	5	45	27/03/2016	27.17	
	6	6	17/02/2016	28.09	6	46	28/03/2016	28.2	
	7	7	18/02/2016	27.59	7	47	29/03/2016	27.64	
	8	8	19/02/2016	29.6	8	48	30/03/2016	26.42	
	9	9	20/02/2016	27.53	9	49	31/03/2016	26.89	
	10	10	21/02/2016	28.34	10	50	01/04/2016	27.78	
R1	11	11	22/02/2016	28.03	R3	11	51	02/04/2016	28.46
	12	12	23/02/2016	25.46	12	52	03/04/2016	28.51	
	13	13	24/02/2016	28.72	13	53	04/04/2016	28.79	
	14	14	25/02/2016	29.38	14	54	05/04/2016	27.28	
	15	15	26/02/2016	29.26	15	55	06/04/2016	28.46	
	16	16	27/02/2016	27.59	16	56	07/04/2016	28.68	
	17	17	28/02/2016	27.92	17	57	08/04/2016	28.82	
	18	18	29/02/2016	27.56	18	58	09/04/2016	28.95	
	19	19	01/03/2016	29.12	19	59	10/04/2016	29.21	
	20	20	02/03/2016	28.41	20	60	11/04/2016	29.34	

	1	21	03/03/2016	27.13		1	61	12/04/2016	26.31
	2	22	04/03/2016	27.36		2	62	13/04/2016	26.82
	3	23	05/03/2016	28.12		3	63	14/04/2016	27.81
	4	24	06/03/2016	26.39		4	64	15/04/2016	28.45
	5	25	07/03/2016	24.36		5	65	16/04/2016	28.81
	6	26	08/03/2016	26.69		6	66	17/04/2016	29.12
	7	27	09/03/2016	25.9		7	67	18/04/2016	29.35
	8	28	10/03/2016	26.33		8	68	19/04/2016	28.82
	9	29	11/03/2016	26.78		9	69	20/04/2016	28.91
	10	30	12/03/2016	26.29		10	70	21/04/2016	29.12
R2	11	31	13/03/2016	25.61	R4	11	71	22/04/2016	29.32
	12	32	14/03/2016	26.12		12	72	23/04/2016	28.86
	13	33	15/03/2016	25.84		13	73	24/04/2016	28.21
	14	34	16/03/2016	26.86		14	74	25/04/2016	28.32
	15	35	17/03/2016	26.96		15	75	26/04/2016	28.53
	16	36	18/03/2016	27.12		16	76	27/04/2016	28.11
	17	37	19/03/2016	28.44		17	77	28/04/2016	27.76
	18	38	20/03/2016	28.64		18	78	29/04/2016	28.64
	19	39	21/03/2016	26.97		19	79	30/04/2016	28.95
	20	40	22/03/2016	27.64		20	80	01/05/2016	28.1

- R: Repetición del tratamiento. - N°: Número de evaluación. - T(°C): Temperatura en grados centígrados.

Cuadro 07. Registro de temperatura interna en la cámara 1 y cámara 2

R	N°	C	Fecha	T (°C)	R	N°	C	Fecha	T (°C)
R1	1	C1	12/02/2016	32.87	R3	1	C1	23/03/2016	36.93
	2		13/02/2016	37.43		2		24/03/2016	37.80
	3		14/02/2016	37.07		3		25/03/2016	38.40
	4		15/02/2016	37.20		4		26/03/2016	36.87
	5		16/02/2016	37.13		5		27/03/2016	35.40
	6		17/02/2016	35.40		6		28/03/2016	34.97
	7		18/02/2016	36.80		7		29/03/2016	36.03
	8		19/02/2016	35.47		8		30/03/2016	35.30
	9		20/02/2016	35.67		9		31/03/2016	35.10
	10		21/02/2016	35.20		10		01/04/2016	34.43
	11	22/02/2016	29.13	11	02/04/2016	29.17			
	12	23/02/2016	29.13	12	03/04/2016	29.23			
	13	24/02/2016	28.83	13	04/04/2016	29.00			
	14	25/02/2016	29.53	14	05/04/2016	29.13			
	15	26/02/2016	29.03	15	06/04/2016	28.70			
	16	C2	27/02/2016	29.10	16	C2	07/04/2016	28.37	
	17		28/02/2016	29.00	17		08/04/2016	28.47	
	18		29/02/2016	30.23	18		09/04/2016	28.27	
	19		01/03/2016	30.50	19		10/04/2016	28.53	
	20	02/03/2016	29.93	20	11/04/2016	29.20			
R2	1	C1	03/03/2016	32.33	R4	1	C1	12/04/2016	32.43
	2		04/03/2016	36.43		2		13/04/2016	36.83

3	05/03/2016	38.03	3	14/04/2016	37.70
4	06/03/2016	38.03	4	15/04/2016	38.03
5	07/03/2016	36.57	5	16/04/2016	37.03
6	08/03/2016	35.23	6	17/04/2016	35.67
7	09/03/2016	35.63	7	18/04/2016	36.43
8	10/03/2016	34.93	8	19/04/2016	35.27
9	11/03/2016	32.77	9	20/04/2016	34.43
10	12/03/2016	32.07	10	21/04/2016	34.43
11	13/03/2016	30.80	11	22/04/2016	29.83
12	14/03/2016	30.23	12	23/04/2016	29.77
13	15/03/2016	28.90	13	24/04/2016	28.73
14	16/03/2016	28.10	14	25/04/2016	28.57
15	17/03/2016	28.67	15	26/04/2016	28.53
16	C2 18/03/2016	28.93	16	C2 27/04/2016	28.50
17	19/03/2016	28.63	17	28/04/2016	28.13
18	20/03/2016	28.90	18	29/04/2016	29.33
19	21/03/2016	28.70	19	30/04/2016	29.67
20	22/03/2016	28.77	20	01/05/2016	29.33

R: Repetición del tratamiento N°: Número de evaluación T(°C): Temperatura en grados centígrados.

Cuadro 08. Temperatura interna en la cámara 3

R	N°	C	Fecha	T (°C)	R	N°	C	Fecha	T (°C)
	1		12/02/2016	26.23	1			23/03/2016	26.57
	2		13/02/2016	27.37	2			24/03/2016	26.97
	3		14/02/2016	27.63	3			25/03/2016	27.23
	4		15/02/2016	28.30	4			26/03/2016	27.67
	5		16/02/2016	28.00	5			27/03/2016	27.87
	6		17/02/2016	27.27	6			28/03/2016	28.30
	7		18/02/2016	27.27	7			29/03/2016	28.70
	8		19/02/2016	28.00	8			30/03/2016	29.33
	9		20/02/2016	27.93	9			31/03/2016	29.07
R1	10	C3	21/02/2016	27.33	R3	10	C3	01/04/2016	27.57
	11		22/02/2016	27.13		11		02/04/2016	28.20
	12		23/02/2016	27.10		12		03/04/2016	27.70
	13		24/02/2016	27.53		13		04/04/2016	27.63
	14		25/02/2016	27.70		14		05/04/2016	28.23
	15		26/02/2016	28.30		15		06/04/2016	28.43
	16		27/02/2016	27.80		16		07/04/2016	28.13
	17		28/02/2016	27.60		17		08/04/2016	28.30
	18		29/02/2016	27.53		18		09/04/2016	28.47
	19		01/03/2016	28.00		19		10/04/2016	28.73
	20		02/03/2016	28.23		20		11/04/2016	28.80
	1		03/03/2016	25.73	1			12/04/2016	24.90
R2	2	C3	04/03/2016	26.03	R4	2	C3	13/04/2016	25.37
	3		05/03/2016	26.77		3		14/04/2016	25.87

4	06/03/2016	27.80	4	15/04/2016	26.87
5	07/03/2016	27.83	5	16/04/2016	27.30
6	08/03/2016	28.10	6	17/04/2016	27.47
7	09/03/2016	27.93	7	18/04/2016	27.80
8	10/03/2016	28.50	8	19/04/2016	27.67
9	11/03/2016	28.73	9	20/04/2016	27.77
10	12/03/2016	28.63	10	21/04/2016	27.93
11	13/03/2016	29.07	11	22/04/2016	28.27
12	14/03/2016	28.77	12	23/04/2016	28.17
13	15/03/2016	28.97	13	24/04/2016	28.00
14	16/03/2016	28.17	14	25/04/2016	28.27
15	17/03/2016	28.17	15	26/04/2016	28.43
16	18/03/2016	28.00	16	27/04/2016	28.27
17	19/03/2016	28.33	17	28/04/2016	27.63
18	20/03/2016	28.60	18	29/04/2016	28.23
19	21/03/2016	28.63	19	30/04/2016	28.50
20	22/03/2016	28.47	20	01/05/2016	27.77

R: Repetición del tratamiento N°: Número de evaluación T(°C): Temperatura en grados centígrados

Cuadro 09. Registro de datos de la cámara 01 y cámara 02 del biorreactor

Repetición de tratamiento	Cámara 01	N° de evaluación por cámara	N° de evaluación en general	Fecha de Evaluación	Hora de Evaluación	Cámara	Temperatura	Temperatura promedio por día	Temperatura promedio por tratamiento
							(°C)	(°C)	(°C)
R1	C3		1		07:30:00 a.m.	Lixiviados	22.9		
		1	2	12/02/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.3	26.23	
			3		07:30:00 p.m.	Lixiviados	27.5		
			4		07:30:00 a.m.	Lixiviados	24.8		
		2	5	13/02/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29.5	27.37	
			6		07:30:00 p.m.	Lixiviados	27.8		26.23
			7		07:30:00 a.m.	Lixiviados	25.3		
		3	8	14/02/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29	27.63	
			9		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.6		
			10		07:30:00 a.m.	Lixiviados	29.1		
		4	11	15/02/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	27.2	28.30	
			12		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.6		

	13		07:30:00 a.m.	Lixiviados	26.6	
5	14	16/02/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29.2	28.00
	15		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.2	
	16		07:30:00 a.m.	Lixiviados	26.4	
6	17	17/02/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.3	27.27
	18		07:30:00 p.m.	Lixiviados	27.1	
	19		07:30:00 a.m.	Lixiviados	26.7	
7	20	18/02/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	27.9	27.27
	21		07:30:00 p.m.	Lixiviados	27.2	
8	22	19/02/2016	07:30:00 a.m.	Lixiviados	24.6	28.00
	23		01:30:00 p.m.	Lixiviados	30.1	
	24		07:30:00 p.m.	Lixiviados	29.3	
9	25	20/02/2016	07:30:00 a.m.	Lixiviados	27.6	27.93
	26		01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.9	
	27		07:30:00 p.m.	Lixiviados	27.3	
	28		07:30:00 a.m.	Lixiviados	26.8	
10	29	21/02/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.2	27.33
	30		07:30:00 p.m.	Lixiviados	27.0	

	31		07:30:00 a.m.	Lixiviados	25.6	
11	32	22/02/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.4	27.13
	33		07:30:00 p.m.	Lixiviados	27.4	
	34		07:30:00 a.m.	Lixiviados	24.2	
12	35	23/02/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.7	27.10
	36		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.4	
	37		07:30:00 a.m.	Lixiviados	26.5	
13	38	24/02/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.1	27.53
	39		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28	
	40		07:30:00 a.m.	Lixiviados	26	
14	41	25/02/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	27.8	27.70
	42		07:30:00 p.m.	Lixiviados	29.3	
	43		07:30:00 a.m.	Lixiviados	27.2	
15	44	26/02/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.1	28.30
	45		07:30:00 p.m.	Lixiviados	29.6	
	46		07:30:00 a.m.	Lixiviados	27.1	
16	47	27/02/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	27.6	27.80
	48		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.7	

27.69

		49		07:30:00 a.m.	Lixiviados	26.7	
17		50	28/02/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29.3	27.60
		51		07:30:00 p.m.	Lixiviados	26.8	
		52		07:30:00 a.m.	Lixiviados	25.9	
18		53	29/02/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.6	27.53
		54		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.1	
		55		07:30:00 a.m.	Lixiviados	25.5	
19		56	01/03/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29.5	28.00
		57		07:30:00 p.m.	Lixiviados	29	
		58		07:30:00 a.m.	Lixiviados	26.7	
20		59	02/03/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.9	28.23
		60		07:30:00 p.m.	Lixiviados	29.1	
R2	C3	61		07:30:00 a.m.	Lixiviados	25.1	
		62	03/03/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	26.8	25.73
		63		07:30:00 p.m.	Lixiviados	25.3	
		64		07:30:00 a.m.	Lixiviados	24.9	25.73
2		65	04/03/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	26.8	26.03
		66		07:30:00 p.m.	Lixiviados	26.4	

	67		07:30:00 a.m.	Lixiviados	25.5	
3	68	05/03/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	27.6	26.77
	69		07:30:00 p.m.	Lixiviados	27.2	
	70		07:30:00 a.m.	Lixiviados	26.9	
4	71	06/03/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.4	27.80
	72		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.1	
	73		07:30:00 a.m.	Lixiviados	26.4	
5	74	07/03/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.6	27.83
	75		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.5	
	76		07:30:00 a.m.	Lixiviados	26.9	
6	77	08/03/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.8	28.10
	78		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.6	
	79		07:30:00 a.m.	Lixiviados	26.9	
7	80	09/03/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.6	27.93
	81		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.3	
	82		07:30:00 a.m.	Lixiviados	26.8	
8	83	10/03/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29.5	28.50
	84		07:30:00 p.m.	Lixiviados	29.2	

	85		07:30:00 a.m.	Lixiviados	27.8	
9	86	11/03/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29.3	28.73
	87		07:30:00 p.m.	Lixiviados	29.1	
	88		07:30:00 a.m.	Lixiviados	27.7	
10	89	12/03/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29.2	28.63
	90		07:30:00 p.m.	Lixiviados	29.0	
	91		07:30:00 a.m.	Lixiviados	27.8	
11	92	13/03/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29.8	29.07
	93		07:30:00 p.m.	Lixiviados	29.6	
	94		07:30:00 a.m.	Lixiviados	27.7	
12	95	14/03/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29.4	28.77
	96		07:30:00 p.m.	Lixiviados	29.2	
	97		07:30:00 a.m.	Lixiviados	27.9	
13	98	15/03/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29.6	28.97
	99		07:30:00 p.m.	Lixiviados	29.4	
	100		07:30:00 a.m.	Lixiviados	26.3	
14	101	16/03/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29.4	28.17
	102		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.8	

28.52

	103		07:30:00 a.m.	Lixiviados	27.5	
15	104	17/03/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.8	28.17
	105		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.2	
	106		07:30:00 a.m.	Lixiviados	26.7	
16	107	18/03/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.8	28.00
	108		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.5	
	109		07:30:00 a.m.	Lixiviados	26.7	
17	110	19/03/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29.2	28.33
	111		07:30:00 p.m.	Lixiviados	29.1	
	112		07:30:00 a.m.	Lixiviados	27.6	
18	113	20/03/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29.3	28.60
	114		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.9	
	115		07:30:00 a.m.	Lixiviados	27.2	
19	116	21/03/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29.6	28.63
	117		07:30:00 p.m.	Lixiviados	29.1	
	118		07:30:00 a.m.	Lixiviados	27.6	
20	119	22/03/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29.1	28.47
	120		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.7	

		121		07:30:00 a.m.	Lixiviados	25.7	
	1	122	23/03/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	27.2	26.57
		123		07:30:00 p.m.	Lixiviados	26.8	
		124		07:30:00 a.m.	Lixiviados	25.8	
	2	125	24/03/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	27.7	26.97
		126		07:30:00 p.m.	Lixiviados	27.4	
		127		07:30:00 a.m.	Lixiviados	26.3	
	3	128	25/03/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	27.9	27.23
		129		07:30:00 p.m.	Lixiviados	27.5	
R3	C3	130		07:30:00 a.m.	Lixiviados	26.4	26.57
	4	131	26/03/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.5	27.67
		132		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.1	
		133		07:30:00 a.m.	Lixiviados	26.9	
	5	134	27/03/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.5	27.87
		135		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.2	
		136		07:30:00 a.m.	Lixiviados	27.1	
	6	137	28/03/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29.1	28.30
		138		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.7	

	139		07:30:00 a.m.	Lixiviados	27.2	
7	140	29/03/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29.5	28.70
	141		07:30:00 p.m.	Lixiviados	29.4	
	142		07:30:00 a.m.	Lixiviados	28.4	
8	143	30/03/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29.8	29.33
	144		07:30:00 p.m.	Lixiviados	29.8	
	145		07:30:00 a.m.	Lixiviados	28.4	
9	146	31/03/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29.5	29.07
	147		07:30:00 p.m.	Lixiviados	29.3	
	148		07:30:00 a.m.	Lixiviados	24.9	
10	149	01/04/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29.1	27.57
	150		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.7	
	151		07:30:00 a.m.	Lixiviados	27.2	
11	152	02/04/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29	28.20
	153		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.4	
	154		07:30:00 a.m.	Lixiviados	26.9	
12	155	03/04/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.2	27.70
	156		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28	

28.26

	157		07:30:00 a.m.	Lixiviados	26.1	
13	158	04/04/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.4	27.63
	159		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.4	
	160		07:30:00 a.m.	Lixiviados	26.8	
14	161	05/04/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29.1	28.23
	162		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.8	
	163		07:30:00 a.m.	Lixiviados	27.1	
15	164	06/04/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29.4	28.43
	165		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.8	
	166		07:30:00 a.m.	Lixiviados	27.1	
16	167	07/04/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.8	28.13
	168		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.5	
	169		07:30:00 a.m.	Lixiviados	27.3	
17	170	08/04/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.9	28.30
	171		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.7	
	172		07:30:00 a.m.	Lixiviados	27.1	
18	173	09/04/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29.3	28.47
	174		07:30:00 p.m.	Lixiviados	29	

		175		07:30:00 a.m.	Lixiviados	27.8	
	19	176	10/04/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29.3	28.73
		177		07:30:00 p.m.	Lixiviados	29.1	
		178		07:30:00 a.m.	Lixiviados	28	
	20	179	11/04/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29.3	28.80
		180		07:30:00 p.m.	Lixiviados	29.1	
		181		07:30:00 a.m.	Lixiviados	24.1	
	1	182	12/04/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	25.8	24.90
		183		07:30:00 p.m.	Lixiviados	24.8	
		184		07:30:00 a.m.	Lixiviados	24.2	
	2	185	13/04/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	26.2	25.37
		186		07:30:00 p.m.	Lixiviados	25.7	
R4	C3	187		07:30:00 a.m.	Lixiviados	24.8	24.90
	3	188	14/04/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	26.6	25.87
		189		07:30:00 p.m.	Lixiviados	26.2	
		190		07:30:00 a.m.	Lixiviados	25.8	
	4	191	15/04/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	27.5	26.87
		192		07:30:00 p.m.	Lixiviados	27.3	

	193		07:30:00 a.m.	Lixiviados	26.4	
5	194	16/04/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	27.9	27.30
	195		07:30:00 p.m.	Lixiviados	27.6	
	196		07:30:00 a.m.	Lixiviados	26.8	
6	197	17/04/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.0	27.47
	198		07:30:00 p.m.	Lixiviados	27.6	
	199		07:30:00 a.m.	Lixiviados	26.9	
7	200	18/04/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.4	27.80
	201		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.1	
	202		07:30:00 a.m.	Lixiviados	27.0	
8	203	19/04/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.2	27.67
	204		07:30:00 p.m.	Lixiviados	27.8	
	205		07:30:00 a.m.	Lixiviados	26.8	
9	206	20/04/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.4	27.77
	207		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.1	
	208		07:30:00 a.m.	Lixiviados	27.0	
10	209	21/04/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.6	27.93
	210		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.2	

	211		07:30:00 a.m.	Lixiviados	27.4	
11	212	22/04/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.8	28.27
	213		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.6	
	214		07:30:00 a.m.	Lixiviados	27.7	
12	215	23/04/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.4	28.17
	216		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.4	
	217		07:30:00 a.m.	Lixiviados	27.1	
13	218	24/04/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.6	28.00
	219		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.3	
	220		07:30:00 a.m.	Lixiviados	26.9	
14	221	25/04/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29.1	28.27
	222		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.8	
	223		07:30:00 a.m.	Lixiviados	27.5	
15	224	26/04/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29	28.43
	225		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.8	
	226		07:30:00 a.m.	Lixiviados	27	
16	227	27/04/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29	28.27
	228		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.8	

28.15

	229		07:30:00 a.m.	Lixiviados	26.9	
17	230	28/04/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.2	27.63
	231		07:30:00 p.m.	Lixiviados	27.8	
	232		07:30:00 a.m.	Lixiviados	26.6	
18	233	29/04/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29.1	28.23
	234		07:30:00 p.m.	Lixiviados	29	
	235		07:30:00 a.m.	Lixiviados	27.7	
19	236	30/04/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	29	28.50
	237		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28.8	
	238		07:30:00 a.m.	Lixiviados	27.1	
20	239	01/05/2016	01:30:00 p.m.	Lixiviados	28.2	27.77
	240		07:30:00 p.m.	Lixiviados	28	

Apéndice 2: Relación carbono nitrógeno y metales pesados

Cuadro 10. Composición fisicoquímica de la materia orgánica sólida remanente de la descomposición anaeróbica

Componentes Fisicoquímicos	Repeticiones				Promedio
	R1	R2	R3	R4	
Cd (ppm)	0.69	0.47	0.64	0.80	0.65
Pb (ppm)	2.92	2.21	2.62	3.08	2.71
Cu (ppm)	1.96	1.95	1.98	1.97	1.96
Fe (ppm)	1007.16	1000.63	1016.21	1009.14	1008.28
Zn (ppm)	44.00	43.71	44.39	44.08	44.05
Mn (ppm)	17.81	17.70	17.97	17.85	17.83
C/N	12.08	12.14	12.29	11.94	12.11
pH	6.08	6.11	6.51	6.13	6.21
Humedad (%)	16.57	15.71	16.12	17.73	16.53
N (base seca %)	5.15	5.10	5.12	5.22	5.15
P ₂ O ₅ (%)	0.56	0.55	0.56	0.56	0.56
Ca (%)	2.12	2.11	2.14	2.12	2.12
Mg (%)	6.57	6.53	6.63	6.59	6.58
K (%)	2.93	2.91	2.95	2.93	2.93
Na (%)	1.30	1.30	1.32	1.31	1.31

Apéndice 3: Panel fotográfico

Figura 05. Reactor anaeróbico cilíndrico de triple cámara

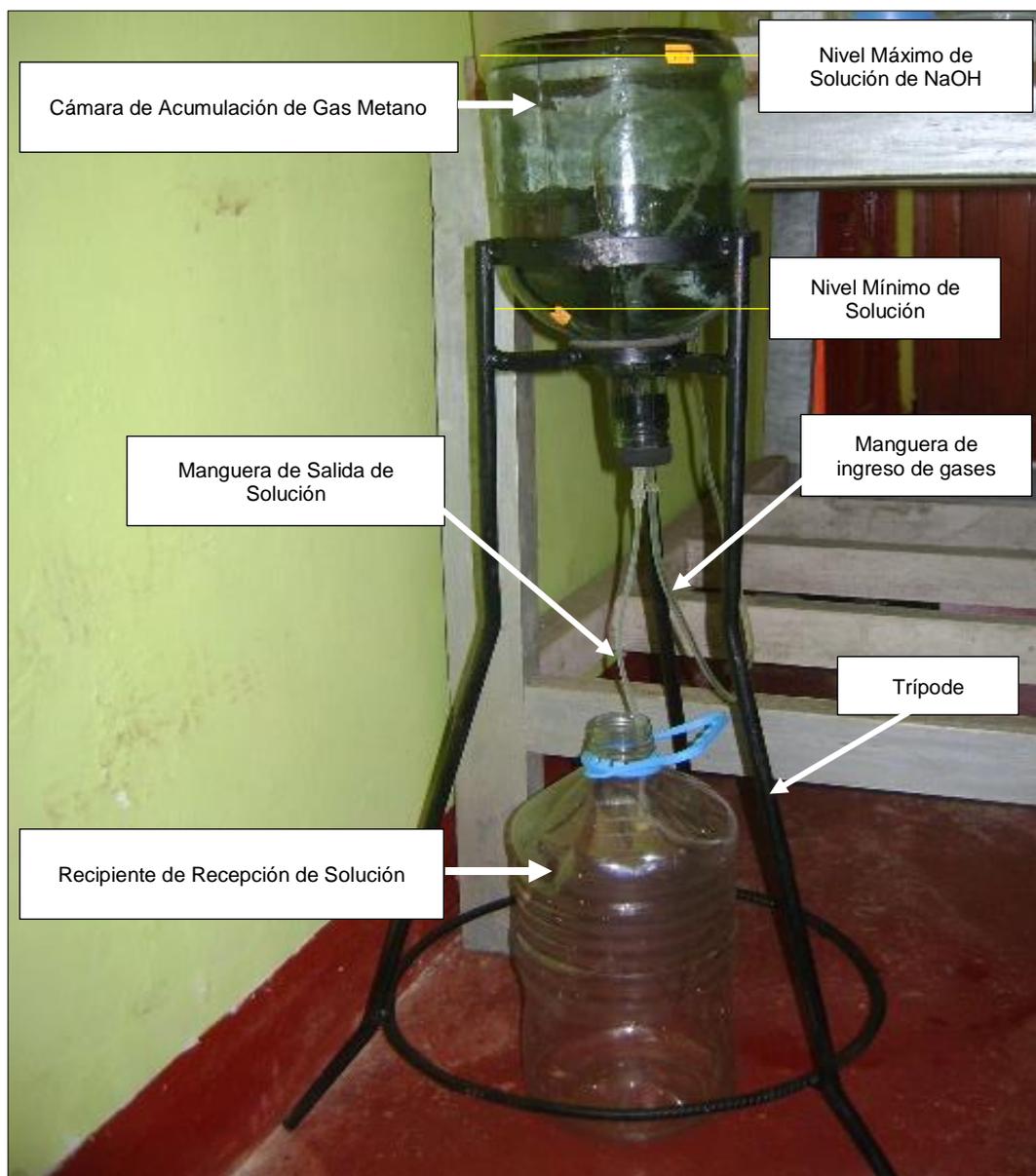


Figura 06. Equipo de Cuantificación de gas metano



Figura 07. Reactivo Hidróxido de Sodio (NaOH)



Figura 08. Cálculo de peso del Hidróxido de Sodio (NaOH)

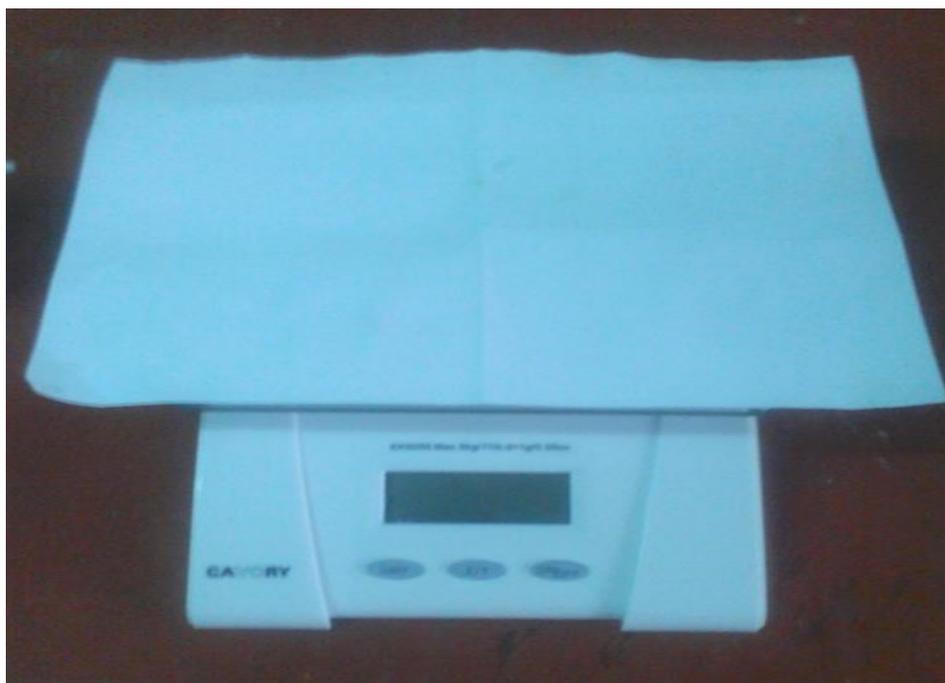


Figura 09. Balanza digital calibrada



Figura 10. Preparación de solución de Hidróxido de Sodio (NaOH) a 1 mol



Figura 11. Agregado de solución de Hidróxido de Sodio (NaOH) a 1 mol al equipo de cuantificación de gas metano



Figura 12. Recolección de datos de las temperaturas del reactor y temperatura ambiental mediante termómetros digitales calibrados



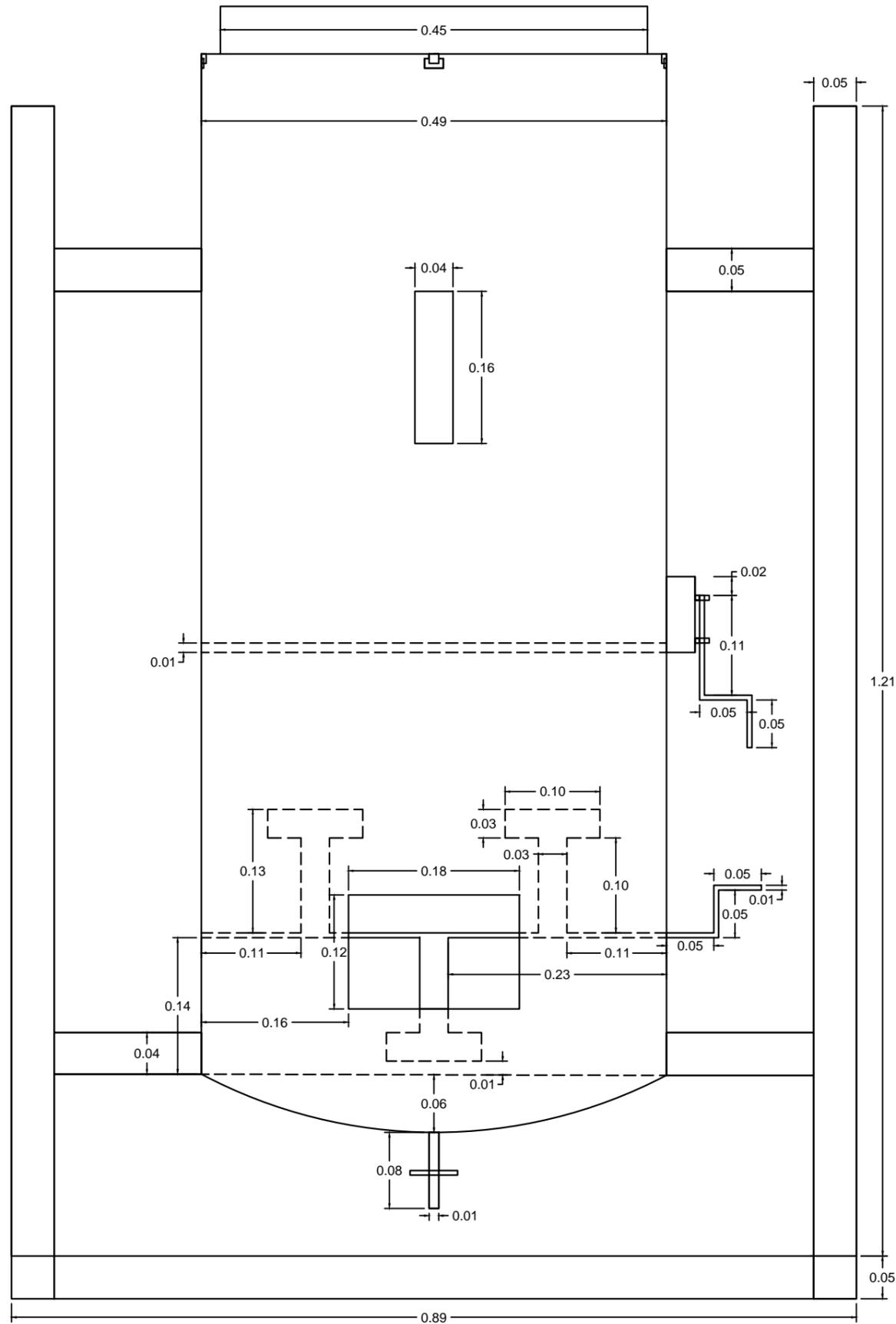
Figura 13. Extracción de lixiviados



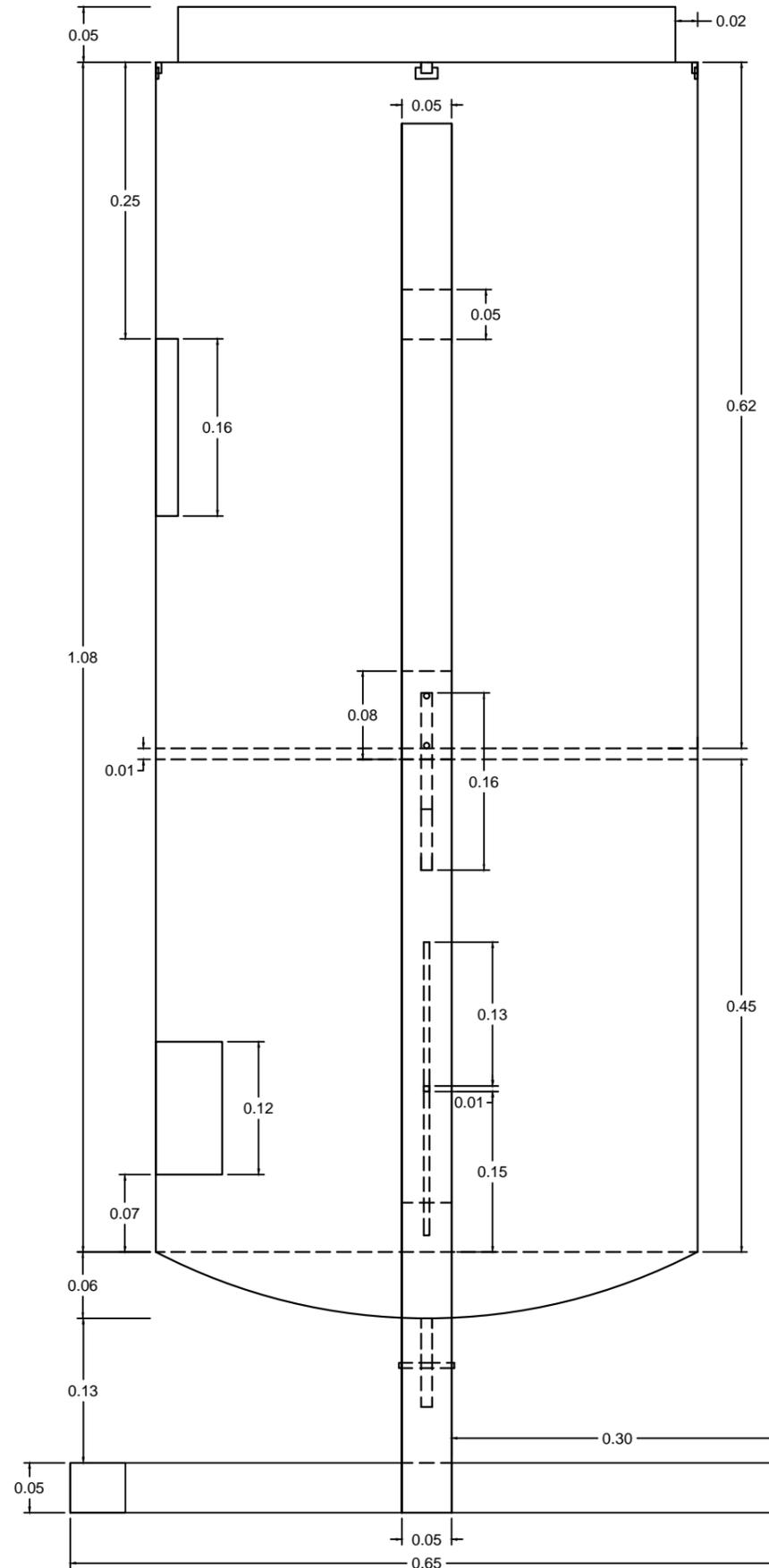
Figura 14. Recolección de lixiviados del reactor.

Apéndice 4: Diseño de bioreactor

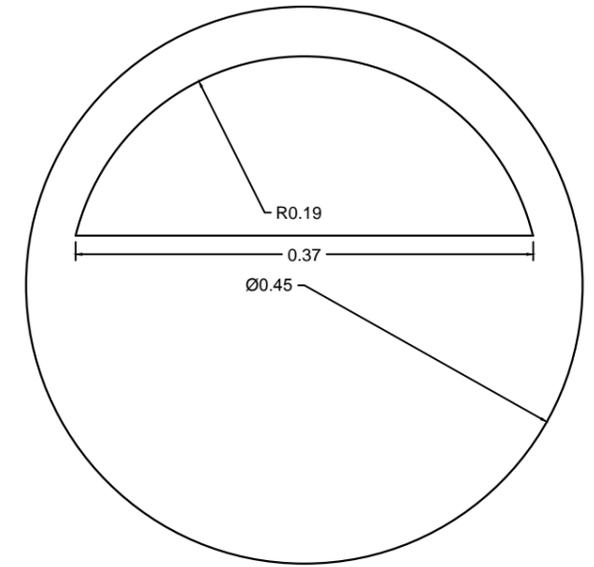
VISTA FRONTAL



VISTA PERFIL



VISTA EN PLANTA



LEYENDA

Descripcion	Simbologia
Estructura Externa	—————
Estructura Interna	- - - - -
Acotacion Lineal	← →
Acotacion Diametral	∅
Acotacion Radial	R0

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
INGENIERIA AMBIENTAL

TITULO DE LA TESIS:		REGION : HUANUCO	
"PRODUCTOS Y SUB PRODUCTOS OBTENIDOS DE UN PROCESO DE COMPOSTAJE ANAEROBICO EN UN REACTOR DE ESTRUCTURA CILINDRICA CON TRES FASES"		PROVINCIA : LEONCIO PRADO	
PLANO:	DISEÑO DE REACTOR DE ESTRUCTURA CILINDRICA	DISTRITO : RUPA RUPA	
RESPONSABLE:	JUAN DIEGO SANCHEZ ZEVALLOS	LUGAR :	
REVISADO Y APROBADO POR:	ING. JOSE LUIS PAREDES SALAZAR	ESCALA:	Laboratorio de Procesos Y Operaciones Unitarias de Ingenieria Ambiental de la UNAS - Tingo Maria
DISEÑADO POR:	JUAN DIEGO SANCHEZ ZEVALLOS	FECHA:	LAMINA:
ING. JOSE LUIS PAREDES SALAZAR	J.D.S.Z.	01/08/2015	