

Universidad de Bío-Bío
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Profesor Patrocinante: Dr. Pedro Cisterna Osorio

Propuesta de Fosa Séptica con Retiro Autónomo y Monitoreo Cualitativo y Cuantitativo de Lodos

Digeridos.

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de Ingeniero
Civil

Evelyn Natalia Baza Torres

Concepción, octubre, 2018

“Propuesta de Fosa Séptica con Retiro Autónomo y Monitoreo Cualitativo y Cuantitativo de Lodos Digeridos”

Evelyn Natalia Baza Torres

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

ebaza@alumnos.ubiobio.cl

Dr. Pedro Eulogio Cisterna Osorio

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

pcisterna@ubiobio.cl

RESUMEN

Las aguas residuales siempre estarán presentes ya que es producto de la actividad humana, es por esto, que siempre se es de constante estudio para mejorar su funcionamiento y/o eficiencia de la captación y almacenamiento de éstas. En este estudio en particular se buscar crear un sistema autónomo para el almacenamiento de las aguas servidas del sector rural, sector que no tiene conectividad a una red de aguas servidas como en el sector urbano.

La fosa séptica es una cámara hermética por lo tanto las aguas residuales que se almacenan en ella entran en un proceso de digestión anaeróbica, se crea un sistema de tuberías que se conecta a la fosa séptica en el fondo de ésta para poder retirar los lodos digeridos.

Durante 5 meses de estudio se fueron sacando muestras una vez a la semana donde se caracterizan los lodos residuales muestreados, donde son llevados al laboratorio para un estudio físico mediante un proceso de secado en un horno a 105°C durante 24 hr, donde se obtiene la concentración de sólidos totales y el porcentaje de humedad, luego por un proceso de calcinación en una mufla a las 550°C durante 2 hr, se obtiene el porcentaje de sólidos volátiles y el porcentaje de sólidos minerales (SM).

Como resultado final después de 3 meses de estudio se logra tener una reducción de sólidos volátiles, que representa la cantidad de materia orgánica que se biodegrada, obteniendo un lodo bioestabilizado, estos lodos pueden ser utilizados en el suelo para mejorar la calidad de éste, siempre manteniendo los parámetros establecidos.

Palabras claves: digestión anaeróbica, sólidos volátiles, lodos residuales.

9745 palabras texto + 21 figuras/tablas*250 = 14995 palabras totales

“Proposal for a Septic Tank with Autonomous Withdrawal and Qualitative and Quantitative Monitoring of Digested Sludge”

Evelyn Natalia Baza Torres

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío

ebaza@alumnos.ubiobio.cl

Dr. Pedro Eulogio Cisterna Osorio

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío

pcisterna@ubiobio.cl

ABSTRACT

Wastewater will always be present as it is the product of human activity, which is why it is always a constant study to improve its operation and / or efficiency of the collection and storage of these. This particular study seeks to create an autonomous system for the storage of wastewater from the rural sector, a sector that does not have connectivity to a sewage network as in the urban sector.

The septic tank is an airtight chamber therefore the wastewater that is stored in it enters a process of anaerobic digestion, a pipe system is created that is connected to the septic tank at the bottom of it to be able to remove the digested sludge .

During 5 months of study, samples were taken once a week where the residual sludge samples are characterized, where they are taken to the laboratory for a physical study by means of a drying process in an oven at 105 ° C for 24 hr, where it is obtained the concentration of total solids and the percentage of moisture, then by a process of calcination in a muffle at 550 ° C for 2 hr, the percentage of volatile solids and the percentage of mineral solids are obtained.

As a final result after 3 months of study it is possible to have a reduction of volatile solids, which represents the amount of organic matter that biodegrades, obtaining a bio-stabilized sludge, these sludges can be used in the soil to improve the quality of this, always maintaining the established parameters.

Keywords: anaerobic digestion, volatile solids, waste sludge.

9745 text words + 21 figures/tables*250 = 14995 total words

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 Objetivos | 3 |
| 1.1.1 Objetivos Generales | 3 |
| 1.1.2 Objetivos específicos..... | 3 |
| 1.2 Antecedentes Preliminares | 4 |
| 1.2.1 Compostaje..... | 4 |
| 1.2.2 ¿Qué es y para qué sirve una fosa séptica? | 4 |
| 2 MARCO TEÓRICO | 6 |
| 2.1 Materia Prima..... | 6 |
| 2.2 Estabilización de los lodos | 7 |
| 2.3 Digestión Anaeróbica:..... | 9 |
| 2.3.1 Etapas de la digestión anaeróbica..... | 9 |
| 2.3.2 Factores que inciden en la digestión anaeróbica | 13 |
| 2.3.3 Tipos de tecnologías utilizadas en la Digestión Anaeróbica | 17 |
| 2.3.4 Ventajas y Desventajas de la Digestión Anaeróbica | 20 |
| 2.4 Deposición Final de los Lodos Estabilizados..... | 21 |
| 2.5 Impacto ambiental de la Digestión anaeróbica..... | 22 |
| 2.6 Metales pesados | 22 |
| 2.7 Uso del lodo estabilizado en la agricultura | 23 |
| 3 METODOLOGÍA | 25 |
| 3.1 Descripción de la Toma de Muestras | 25 |
| 3.2 Determinación de los sólidos totales | 26 |
| 3.3 Determinación de la humedad | 26 |
| 3.4 Determinación de los sólidos volátiles..... | 27 |
| 3.5 Determinación de los sólidos minerales | 27 |
| 3.6 Determinación de la constante de degradación (k) | 28 |
| 3.7 Determinación del Volumen Mensual..... | 28 |
| 3.8 Factibilidad de retirar los lodos de la fosa séptica..... | 29 |
| 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS | 32 |
| 4.1 Características del Residuo Solido | 32 |
| 4.2 Humedad | 32 |
| 4.3 Sólidos totales y Sólidos volátiles | 33 |
| 4.4 Sólidos Minerales..... | 35 |

| | |
|--|-----------|
| 4.5 Constante de degradación..... | 35 |
| 4.6 Factibilidad hidráulica y tiempo de extracción. | 36 |
| 4.7 Volumen mensual..... | 37 |
| 5 CONCLUSIONES..... | 39 |
| 5.1 Conclusiones | 39 |
| 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 40 |
| 7 ANEXOS | 42 |
| Índice de Anexos..... | 42 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1: Digestor de baja carga..... | 5 |
| Figura 2: Diversas materias primas de diferentes fuentes | 6 |
| Figura 3: Etapas de la digestión anaeróbica | 12 |
| Figura 4: Mapa de visualización del sector de toma de muestras | 25 |
| Figura 5: Muestreador | 25 |
| Figura 6: Toma de muestras | 26 |
| Figura 7: Vista frontal de la fosa séptica..... | 29 |
| Figura 8: Vista lateral de la fosa séptica con válvula cerrada..... | 30 |
| Figura 9: Vista lateral de la fosa séptica con válvula abierta..... | 30 |
| Figura 10: Procesos físicos del residuo sólido..... | 31 |
| Figura 11: Variación de la humedad en función del tiempo..... | 31 |
| Figura 12: Variación de los sólidos totales en función del tiempo..... | 32 |
| Figura 13: Variación de los sólidos volátiles en función del tiempo..... | 32 |
| Figura 14: Reducción de los sólidos volátiles en función del tiempo..... | 33 |
| Figura 15: Variación de los sólidos volátiles en función del tiempo | 34 |
| Figura 16: Variación del $\ln(SV_0/SV_t)$ en función del tiempo | 34 |
| Figura 17: Variación de los sólidos volátiles en función del tiempo | 36 |
| Figura 18: Volumen mensual y promedio | 36 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Relación C/N de las materias primas empleadas corrientemente (aproximacion) | 15 |
| Tabla 2: Concentraciones máximas de metales pesados en lodos para la aplicación al suelo | 23 |
| Tabla 3: Composición porcentual del bioabono..... | 24 |
| Tabla 4: Datos para determinar la constante de degradación..... | 35 |
| Tabla 5: Altura de los lodos residuales | 36 |

1 INTRODUCCIÓN

La generación de aguas residuales es inevitable por resultado de las actividades humanas principalmente domésticas, su tratamiento y deposición final se realizará según las características de su afluente, es por esto, que siempre es un tema de constante estudio ya sea para ir mejorando los sistemas que existen para su tratamiento o creando algo nuevo con mejor funcionamiento ya sea con más eficiencia productiva o más compatible con el medio ambiente y la sociedad. Este estudio se enfoca principalmente a mejorar el sistema que está presente en el sector rural, que según el censo del 2017 en la región del Bío Bío el 11,6% y en la región del Ñuble alcanza un 30,6% de la población en ésta en esta situación, actualmente el sector rural no tiene la posibilidad de conectarse a una red de alcantarillado, sistema sanitario utilizado en las zonas urbanas, por lo que las aguas residuales deben ser tratados mediante la fosa séptica, donde el material orgánico que ingresa está en la fosa durante varios meses en reposo y sin utilizar, tiempo necesario para que este lodo alcance una biodegradación mediante digestión anaerobia. En esta descomposición se ve una oportunidad y/o necesidad de crear un sistema que sea compatible con el medio ambiente ya que se reduciría la cantidad de material sólido destinada a ser basura y evitar además que la acumulación del material en la fosa eventualmente sea un foco de contaminación. Este sistema afecta positivamente la economía de las personas, quienes no necesitarían de una entidad externa para retirar los residuos de la fosa, otorgando autonomía a las mismas.

Los residuos sólidos urbanos abarcan más del 50% de los residuos sólidos totales generados, lo que conlleva a considerar los costos que implican su deposición final o así también considerarlo como un recurso reutilizable. En el sector rural para retirar las aguas residuales que están en la fosa séptica se necesita de una entidad externa el cual las lleva a una planta de tratamiento donde los lodos después son llevados a un vertedero. Como las personas deben pagar por este servicio y generalmente no tienen los recursos económicos para realizarlo este sistema en vez de ser un tratamiento sanitario pasa a ser un foco de contaminación, atrayente de vectores.

En la década del 70' aumento la conciencia del medio ambiente, acompañado por la demanda de nuevas estrategias de gestión de residuos y formas de energía renovable, se amplió el campo de aplicaciones para la digestión anaeróbica, por lo tanto, también introdujo desechos industriales y municipales (Steeffen R et al, 2012).

La digestión anaeróbica es un método atractivo para la estabilización de residuos orgánicos con altas concentraciones de sólidos (22 – 40 %). Su reducido costo y potenciales subproductos obtenidos en el proceso han despertado interés en investigadores (Kothari et al, 2014).

Por lo tanto, la aplicación del lodo como un producto mejorador del suelo agrícola es de mayor confiabilidad y rentabilidad, porque los precios son reducidos debido a que consiste en un reciclaje constante del residuo.

De acuerdo con Mandujano (1981), un metro cúbico de bioabono producido y aplicado diariamente, puede fertilizar más de 2 hectáreas (ha) de tierra por año.

Además, actualmente la realización de nuevos vertederos cada vez es más difícil por las restricciones ambientales que se tienen hoy en día además de que la población no quiere tener un vertedero cerca de sus propiedades, por lo que queda poco espacio físico para este tipo de depósito que es el más utilizado actualmente en Chile, en el cual los ya existentes tienen una vida útil que eventualmente ya no darán a basto, por lo tanto, es necesario crear diferentes sistemas para disminuir la cantidad de residuos que llegan a los rellenos sanitarios.

Este sistema consiste en la creación de una fosa tal que en el fondo mediante una tubería esté conectada a una compostera, los desechos orgánicos deben estar en la fosa durante un tiempo considerable hasta que se logre una biodegradabilidad de los lodos residuales, pasado ese tiempo se abre paso con una válvula lo que haría pasar el material retenido durante estos meses a la compostera, la ubicación se hará con respecto a la topografía del lugar por lo tanto dependerá de cómo es el sector, una vez que el material está en la compostera es mezclado con otros materiales orgánicos y/o bichos para acelerar el proceso de biodegradación mediante digestión aeróbica y así obtener un abono de alta calidad que puede ser utilizado para la agricultura u otros fines que se estimen convenientes.

Durante todo el proceso desde que el material está en la fosa se irán haciendo ensayos para tener un seguimiento de la descomposición del material y la disminución principalmente de los sólidos volátiles.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos Generales

Proponer una fosa séptica con retiro autónomo y monitoreo cualitativo y cuantitativo de lodos digeridos.

1.1.2 Objetivos específicos

- Estudiar el nivel de estabilización de los lodos digeridos en la fosa séptica.
- Determinar el volumen mensual de los desechos orgánicos que ingresan a la fosa séptica.
- Evaluar la factibilidad hidráulica de retirar los lodos de la fosa séptica

1.2 ANTECEDENTES PRELIMINARES

1.2.1 Compostaje

El compostaje es un proceso biológico aeróbico, mediante el cual los microorganismos actúan sobre la materia rápidamente biodegradable (restos de cosecha, excremento de animales y residuos urbanos), permitiendo obtener “compost”, abono de alta calidad para su utilización en la agricultura.

El compost se puede definir como el resultado de un proceso de humificación de la materia orgánica, bajo condiciones controladas. El compost es un nutriente para el suelo que mejora la estructura, ayuda a reducir la erosión, ayuda a la absorción de agua y nutrientes por parte de las plantas.

El compostaje es una manera racional, económica y segura de obtener un abono a partir de residuos de origen orgánico, conservando y aprovechando al máximo los nutrientes presentes en la materia orgánica (Torres E, 2002)

1.2.1.1 Propiedades del compost

- Mejora las propiedades físicas del suelo. La materia orgánica (MO) favorece la estabilidad de la estructura de los agregados del suelo agrícola, reduce la densidad aparente, aumenta la porosidad y permeabilidad, y aumenta su capacidad de retención de agua en el suelo.
- Mejora las propiedades químicas, aumenta el contenido en macro nutrientes N, P, K, y micro nutrientes, la capacidad de intercambio catiónico (C.I.C) y es fuente y almacén de nutrientes para los cultivos.
- Mejora la actividad biológica del suelo. Actúa como soporte y alimento de los microorganismos ya que viven a expensas del humus y contribuyen a su mineralización. La población microbiana es un indicador de la fertilidad del suelo.

1.2.2 ¿Qué es y para qué sirve una fosa séptica?

Es una cámara hermética para el almacenamiento y tratamiento de los residuos domésticos, donde se realiza la separación y transformación físico-química de la materia sólida presente en las aguas residuales. Es una forma sencilla y económica de tratar las aguas residuales y está indicada preferentemente para zonas rurales.

La fosa que se utilizara para el estudio será una fosa séptica de 3250 lt de capacidad que consta de una cámara donde los sólidos contenidos en las aguas vertidas sedimentan quedando en el fondo de la fosa y las grasas y aceites flotan quedando en la parte superior de fosa. El funcionamiento de una fosa es tanto más efectivo cuanto más tiempo permanezcan las aguas usadas en ella, tiempo suficiente donde los lodos sedimentados puedan ser tratados como una digestión anaeróbica (DA). La fosa séptica funciona como un digestor de baja carga, el cual se muestra en la figura 1.

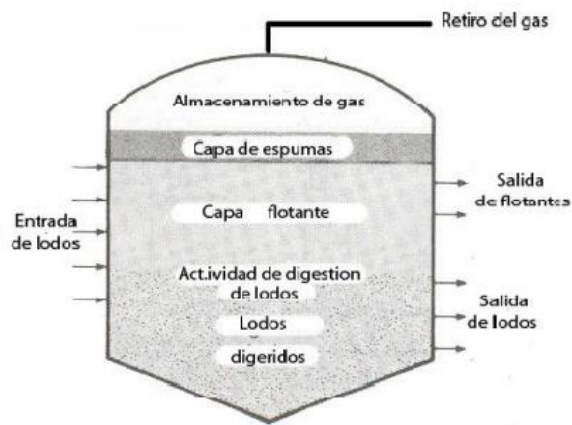


Figura 1. Digestor de Baja Carga

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Materia Prima

Se debe tener presente que tipo de materia prima es la que se utiliza para la digestión anaeróbica. La digestión anaeróbica es capaz de recuperar energía renovable de una amplia gama de materia prima. La materia prima necesita ser: (a) biodegradable; como es el caso de mayoría de la materia orgánica; (b) no leñosa; materia prima con una alta proporción de material lignocelulósico (con alto contenido de azúcares o almidón); (c) balance en macro y micro nutrientes, como es el caso de la mayoría de los residuos de materia orgánica. Por lo tanto, la materia prima puede variar desde aguas residuales fácilmente degradables hasta complejos desechos de alta solidez incluso los compuestos tóxicos pueden degradarse anaeróbicamente dependiendo de la tecnología aplicada. Un importante requisito es que en un determinado residuo/ agua residual contenga una cantidad sustancial de materia orgánica que finalmente se deba convertir en los productos principales de la digestión anaeróbica como el CH₄ y el CO₂. (Steffen R, y otros, 2012).

La materia orgánica puede provenir principalmente de desechos agrícolas, residuos biológicos municipal y de sólidos y/o aguas residuales industriales. Los que se desglosan en la figura 2.

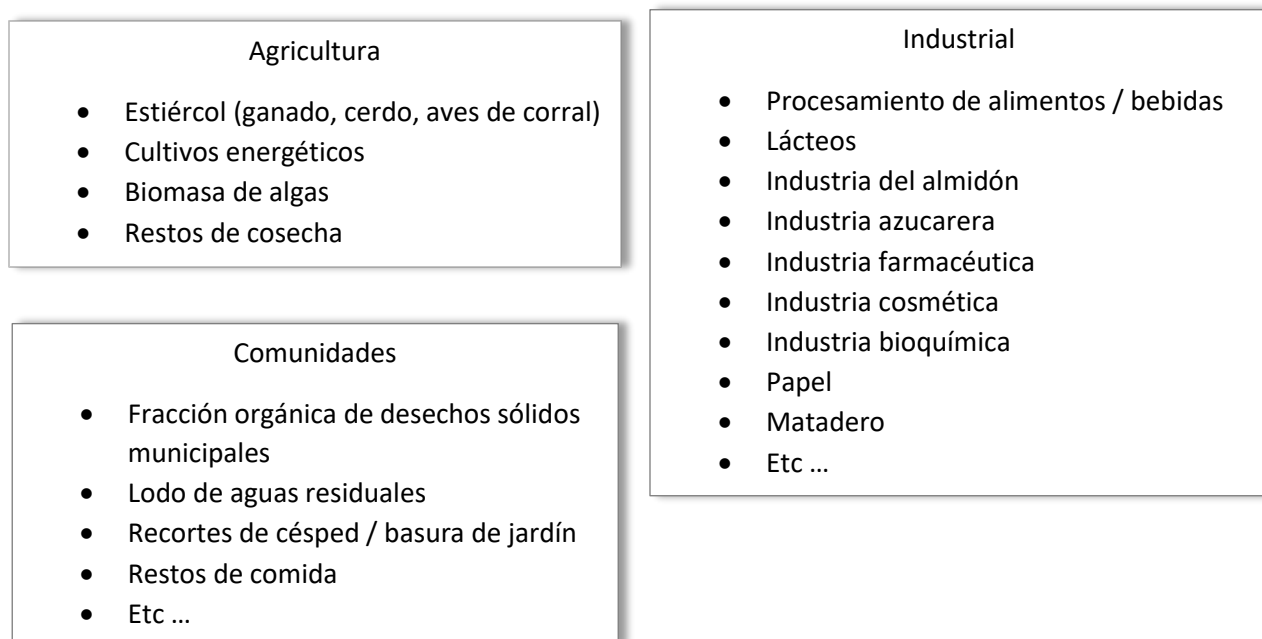


Figura 2. Diversas Materias Primas de Diferentes Fuentes

Fuente: Feedstocks for Anaerobic Digestion (1998)

La materia prima determina la calidad de los productos, como el biogás, el lodo excedente anaeróbico y la necesidad de un post-tratamiento del efluente al final de la digestión. Dado que los productos finales de la DA se procesan adicionalmente a energía térmica y eléctrica (biogás) y acondicionamiento del suelo (lodo anaeróbico), se requiere una evaluación exhaustiva de la composición, la pureza (calidad de la materia prima).

Comúnmente el contenido de materia orgánica biodegradable varía entre el 70% y 95% del contenido de la materia seca. Los sustratos con contenido orgánico de materia seca inferior al 60% rara vez se consideran sustratos valiosos que valen la pena para la digestión anaeróbica.

La MO influye considerablemente en la configuración del reactor (diseño y funcionamiento) como también tiene una influencia integral en la fisiología bacteriana.

Los parámetros por considerar para la clasificación sanitaria de lodos corresponden a la reducción del potencial de atracción de vectores y la presencia de patógenos. Los lodos se pueden clasificar en:

Lodo Clase A: lodo sin restricciones sanitarias para aplicación al suelo, ya que la concentración de microorganismos presentes no representa riesgo para la salud pública (Coliformes < 1000 Numero Mas Probable (NMP) y huevos de helmito < 1 NMP)

Lodo Clase B: lodo apto para aplicación al suelo, con restricciones sanitarias de aplicación según tipo y localización de los suelos o cultivos, ya que presenta una cantidad del patógenos que debe ser vigilada (coliformes < 2.000.000 NMP y huevos de helmito > 1 NMP). Esto se logra teniendo al menos un tiempo de permanencia de 15 a 60 días a 22 – 55 °C, en condiciones anaerobicas

Lodo Crudo: lodo proveniente de la etapa de decantación primaria.

Lodo estabilizado: lodo con reducción del potencial de atracción de vectores sanitarios de acuerdo con lo establecido en reglamento existente.

2.2 Estabilización de los lodos

La estabilización de los lodos se lleva a cabo principalmente para, reducir problemas de malos olores de los lodos y transformar la materia orgánica en biogás, reducir la presencia de patógenos. La supervivencia de microorganismos patógenos y la proliferación de olores en el lodo se producen cuando se permite que los microorganismos se desarrollen sobre la fracción orgánica del mismo. Según el Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servida en el Art N°6 dice “Se consideran lodos estabilizados o con reducción potencial de atracción de vectores sanitarios, a los lodos que se les ha reducido los sólidos volátiles en un 38% como mínimo.

Sin perjuicio de lo anterior, también se consideran estabilizados, los lodos que cumpla con uno de los siguientes requerimientos, enumerados a continuación:

1.- Reducción del contenido de sólidos volátiles.

Si los lodos son tratados por digestión anaeróbica, y la reducción de sólidos inferior al 38%, es posible demostrar la reducción de atracción de vectores mediante una prueba de digestión adicional de lodos a escala de laboratorio. La reducción de atracción de vectores queda demostrada si después de la digestión anaeróbica de los lodos por un periodo adicional de 40 días a una temperatura de entre 30 y 37°C, los sólidos volátiles son reducidos en un porcentaje inferior al 17% del valor al inicio de este periodo.

2.- Tasa máxima específica de oxígeno para los lodos de digestión aeróbica.

3.- Proceso aeróbicos con temperaturas mayores a 40°C.

4.- Adición de material alcalino.

El pH de los lodos debe ser elevado a 12 o más mediante agregación de material alcalino, sin adición de más material alcalino, el pH deberá mantenerse a 12 ó más por 2 horas y posteriormente a 11,5 ó más por 22 horas adicionales,

5.- Reducción de Humedad.

En caso, que los lodos no contengan lodos crudos provenientes de un tratamiento primario de residuos líquidos, el porcentaje de sólidos debe ser igual o superior a 75%, previo a la mezcla de lodos con otros materiales.

En caso, que los lodos contengan lodos crudos provenientes de un tratamiento primario de residuos líquidos, el porcentaje de sólidos debe ser igual o superior a 90%, previo a la mezcla de lodos con otros materiales.

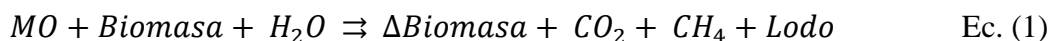
6.- tiempo de residencia.

El tiempo de residencia del lodo en el sistema debe ser igual o superior a 25 días, siempre y cuando se trate de lodos procedentes de PTAS, en las que la estabilización de los lodos se realiza en la misma unidad en que ocurre la oxidación biológica de la MO.”

La estabilización de los lodos se puede realizar mediante diferentes mecanismos tales como la digestión anaeróbica, digestión aeróbica, pasteurización, estabilización con cal, etc. Para la realización de este estudio se enfoca en la digestión anaeróbica

2.3 Digestión Anaeróbica:

La digestión anaeróbica es caracterizada por la siguiente ecuación 1:



Donde:

MO: materia orgánica

H₂O: agua

CO₂: dióxido de carbono

CH₄: metano

Lodo: sustrato no biodegradado, nutrientes y H₂O

La biodegradación de la materia orgánica se produce sin la presencia de oxígeno, donde la materia orgánica es degradada mediante microorganismos, el oxígeno necesario para su desarrollo se produce del mismo alimento. El proceso se desarrolla en un reactor completamente cerrado, donde los lodos son introducidos de forma continua o intermitente, permaneciendo en el reactor por un tiempo considerable. La materia orgánica que ingresa se convierte principalmente en metano y en dióxido de carbono como se puede apreciar en la ecuación 1, siendo estos los que representan un 99% del gas total producido y también se obtiene un subproducto, el lodo estabilizado.

Los digestores anaeróbicos contribuyen de manera significativa a la sustentabilidad ambiental a través de la estabilización de residuos orgánicos y remoción de patógenos, lo que trae como resultado la conservación de la buena calidad de las cuencas hidrográficas por la no disposición incontrolada de residuos frescos (De Baere, 2000).

2.3.1 Etapas de la digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica se caracteriza por la existencia de varias fases consecutivas, las cuales se diferencian en el proceso en el que el sustrato (el alimento de los microorganismos) se va degradando, produciéndose en cadena los diferentes tipos de bacterias (Avendaño, 2010).

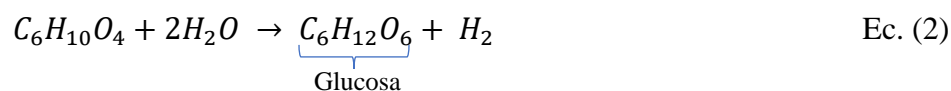
En el proceso de degradación anaeróbica, los microorganismos trabajan en serie o en serie-paralelo degradando la MO en sucesivas etapas.

La concentración de hidrógeno juega un papel fundamental en la regulación del flujo del carbono en la biodigestión. Los microorganismos que en forma secuencial intervienen en el proceso son: (a) bacterias hidrolíticas y fermentadoras; (b) bacterias acetogénicas obligadas reductoras de

protones de hidrógenos (sintróficas); (c) bacterias sulfato reductoras (sintróficas facultativas) consumidoras de hidrogeno; (d) bacterias homocetogénicas; (e) bacterias metanogénicas; (f) bacterias desnitrificantes.

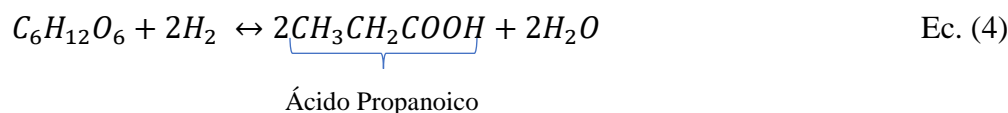
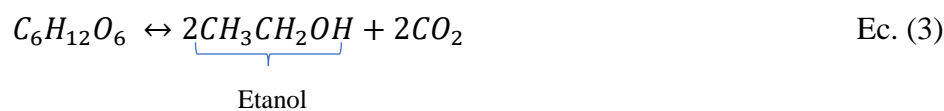
En general los microorganismos no son capaces de utilizar esos polímeros debido al gran tamaño de las moléculas, que no pueden penetrar la pared celular de los microbios, es por ello que se diferencian cuatro etapas principales (Kothari et al, 2014). Las cuales se explican a continuación.

Hidrolisis o liquefacción: en esta etapa los compuestos orgánicos complejos se disocian en monómeros más sencillos, tales como azúcares, aminoácidos, ácidos grasos volátiles de bajo peso y alcoholes, con ayuda de enzimas extracelulares como celulasa, amilasa y otras enzimas proteolíticas. Así, se permite que las bacterias puedan asimilar la MO como fuente de nutrientes (Avedaño, 2010). La reacción de la hidrolisis puede ser escrita como la ecuación 2.

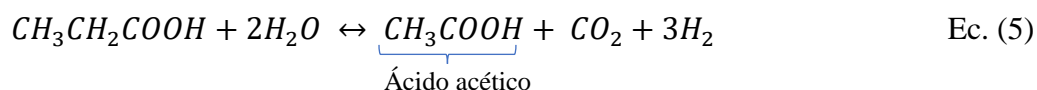


Acidogénesis: en esta etapa los compuestos orgánicos solubles que provienen de la fase de hidrolisis son degradados por bacterias acidogénicas siendo convertidas en ácidos orgánicos tales como acético, ácido propiónico, ácido butírico y ácido valérico junto con dióxido de carbono, agua e hidrogeno.

Estas bacterias son de rápido crecimiento con un tiempo de duplicación sobre los 30 minutos (Kothari et al, 2014). La acumulación de ácidos grasos volátiles se puede escribir como la ecuación 3 y ecuación 4.

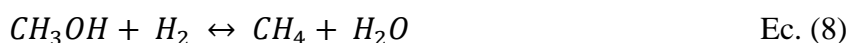
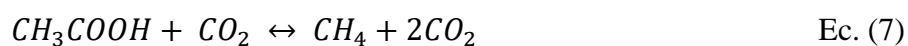
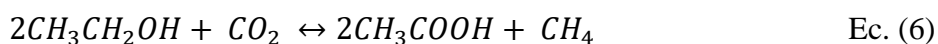


Acetogénesis: también conocida como acidogénesis intermediaria en la cual los productos de la fase anterior, a excepción del ácido acético, sirven como sustrato para las bacterias que intervienen durante la fase, formándose ácido acético, hidrogeno y dióxido de carbono (Avedaño, 2010). El crecimiento de estos procariontes es lento con un tiempo de duplicación de 1.5 – 4 días. La reacción acetogénesis puede ser escrita como la ecuación 5



Metanogénesis: en esta etapa metabólica el CH₄ es producido a partir del ácido acético o de mezclas de H₂ y CO₂, pudiendo formarse también a partir de otros sustratos simples tales como ácido acético, etanol y metanol. Conversión de acetato, dióxido de carbono e hidrogeno a gas metano (Reith et al, 2003) El rol de las bacterias metenogénicas se define por el tipo de sustrato disponible.

Las bacterias metanogénicas son de lento crecimiento, pues su tiempo de duplicación es de 2 – 4 días. Medigan et al (2009), encontraron estequiométricamente que alrededor del 70% del metano se produce a través de la vía del acetato. Las reacciones de metanogénesis pueden escribirse como la ecuación 6, ecuación 7, ecuación 8 y/o ecuación 9.



La formación de biogás y del lodo se rige por la especificidad de los microorganismos y las regulaciones metabólicas que dependen de los parámetros del proceso. Por lo tanto, la vigilancia del crecimiento de las células hacia el sustrato y el producto, particularmente en su concentración, necesitan estudios cuidadosos.

En la mayoría de los procesos, las altas concentraciones de sustrato y/o producto a menudo conducen a efectos inhibidores. La digestión anaeróbica generalmente experimenta inhibición del crecimiento de las células del sustrato y del ácido. La inhibición puede clasificarse en tres secciones: (a) inhibición del sustrato; (b) inhibición del producto; (c) inhibición tanto del sustrato como del producto. A medida que aumenta la formación de ácido, el ácido inhibe el crecimiento de acidógenos, acetógenos y metanógenos

Para que proceda una digestión estable es de vital importancia que las diferentes conversiones biológicas permanezcan acopladas durante el proceso, y así prevenir la acumulación de compuestos intermedios. Por ejemplo, si se aculan los AGV el pH tiende a disminuir por lo que la metanogénesis, en tal condición no puede ocurrir (Mendoza, 2015).

Las cuatro etapas descritas se pueden representar según la figura 3.

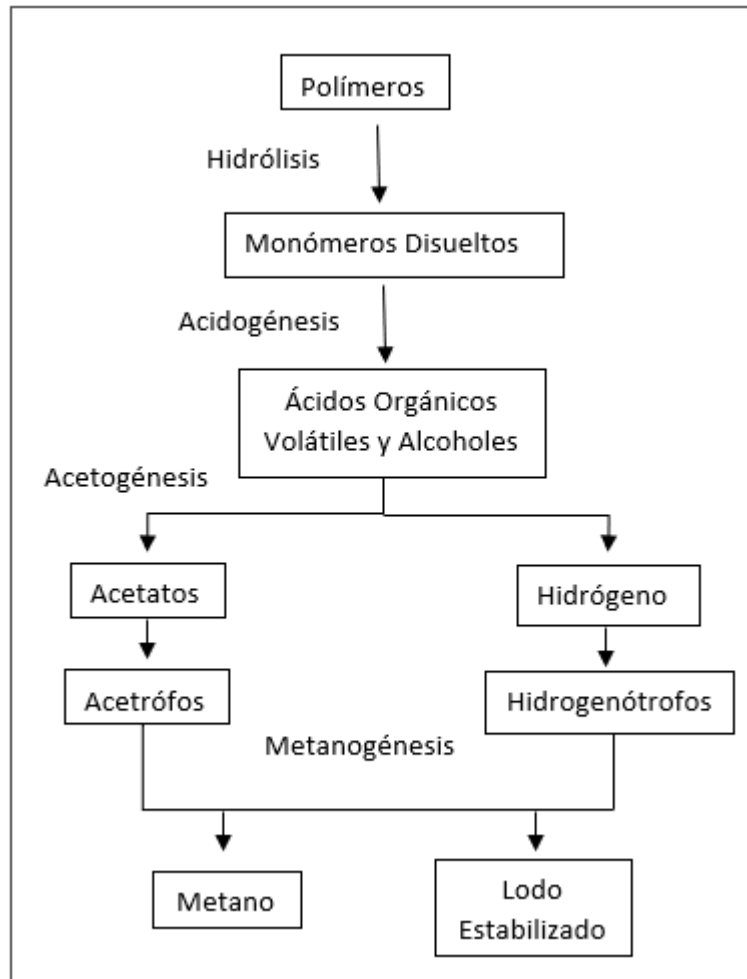


Figura 3. Etapas de la Digestión Anaeróbica

En general, la velocidad del proceso está delimitada por la velocidad de la etapa más lenta, la cual depende de la composición de cada residuo. Para sustratos solubles, la fase limitante acostumbra a ser la metanogénesis, y para aumentar la velocidad la estrategia consiste en adoptar diseños que permitan una elevación de concentración de microorganismos acetogénicos y metanogénicos en el reactor. Para residuos en los que la materia orgánica este en forma de partículas, la fase limitante es la hidrólisis, proceso enzimático cuya velocidad depende de la superficie de las partículas, para aumentar la velocidad, una de las estrategias es el pretratamiento para disminuir el tamaño de partículas o ayudar a la solubilización (maceración, ultrasonidos, tratamiento térmico, alta presión, o combinación de altas presiones y temperatura) (IDEA, 2007).

2.3.2 Factores que inciden en la digestión anaeróbica

Existen un número de parámetros que influyen en el proceso de digestión anaeróbica, como son: temperatura, tipo de sustrato, nivel de pH, tiempo de retención, relación C/N, etc. La máxima producción se obtiene cuando estos parámetros se mantienen en los rangos óptimos (Khotari et al, 2014).

La DA es un proceso bioquímico complejo por lo tanto hay que tener un equilibrio entre los factores que interfieren en su funcionamiento para tener una realización tanto en el proceso químico de la matriz líquida como del proceso bioquímico intracelulares de los organismos presentes en la digestión. El tratamiento de la digestión anaeróbica acelera la descomposición natural de la MO si la temperatura, el pH y el contenido de humedad están cercanos al óptimo. Estos factores y otros son explicados a continuación.

2.3.2.1 Temperatura

La temperatura es uno de los factores más importantes ya que influye directamente a la degradación de la materia orgánica a una mayor temperatura mayor será la actividad de éstas y, por lo tanto, menor será el tiempo necesario que deba permanecer el sustrato en el digestor y a una menor temperatura el tiempo que el sustrato permanece en el digestor tenderá a aumentar.

Podrá operarse en los rangos psicrófilo (temperatura ambiente entre 10 – 20 °C), mesófilo (temperaturas en torno a los 30 – 40 °C) o termófilo (temperaturas en torno a los 50 - 60 °C). Las tasas de crecimiento y reacción aumentan conforme lo hace el rango de temperatura, pero también la sensibilidad a algunos inhibidores, como el amoníaco. En el rango termófilo se aseguran tasas superiores de destrucción de patógenos.

Se ha encontrado que los digestores termofílicos tienen tiempos de retención inferiores, el cual es debido a la alta actividad catalítica de los microorganismos termofílicos. Otro aspecto que es de gran importancia es que a altas temperaturas que opera este sistema se obtiene un sólido estabilizado sin patógenos (Kothari et al, 2014). Por lo tanto, mediante procesos termofílicos se puede obtener un sustrato de alta calidad y libre de patógenos que sirva como acondicionador de suelos.

El proceso de digestión anaeróbica puede llevarse a cabo en un intervalo de temperaturas que abarca desde los 0° hasta los 70°C aunque, en general, a temperaturas bajas ($\leq 15^{\circ}\text{C}$) el proceso de fermentación se ralentiza (Avedaño, 2010).

Por lo tanto, es necesario aumentar la temperatura cuando se trabaja a bajas temperaturas para que las reacciones bioquímicas que se producen en el reactor tengan un mejor funcionamiento, y así tener un mejor aprovechamiento de la digestión anaeróbica.

2.3.2.2 Tiempo de Retención

El tiempo de retención marca la duración del proceso de la digestión anaeróbica, la fracción de materia orgánica que se degrada aumenta conforme lo hace el tiempo que permanece en el interior del digestor.

El tiempo de retención es definido como el tiempo requerido para completar la degradación de la materia orgánica o como el tiempo promedio en que ésta permanece en el digestor. Y se obtiene por la ecuación 10.

$$TR = \frac{V}{Q} \quad \text{Ec. (10)}$$

Donde:

TR: Tiempo de retención (días)

V: volumen del reactor (m³)

Q: Caudal diario (m³/días)

Para un régimen estacionario, el tiempo de retención será el que transcurre entre la carga de materia orgánica al sistema y su descarga.

El tiempo de retención varía de acuerdo al cambio de otros parámetros, como temperatura y composición del sustrato, para lograr completar todas las reacciones de la DA prueba de ello es que a temperatura mesofílica se requiere de 10 – 40 días para la digestión, mientras que en un proceso termofílico tiende a ser menos, puesto que la biodegradación es más rápida, el rango está entre 14 días. El tiempo de retención es directamente proporcional a la tasa de degradación; si esta es baja, el TR aumenta (Kothari et al, 2014)

2.3.2.3 Relación Carbono a Nitrógeno C/N

Los microbios siempre consumen estos elementos en determinada proporción, medido por la relación C/N que contiene la materia orgánica. Existen muchos criterios en lo referente a esta relación, pero se reconoce en general como aceptable una relación C:N de 20-30:1.

Los desechos humanos y de animales son ricos en nitrógeno, con una relación C/N inferior a 25:1, durante la fermentación tienen una mejor velocidad de biodegradación, en cambio los residuos

agrícolas son ricos en carbono, con una relación C/N superior a 30:1, pero con una generación más lenta en el proceso de digestión.

La relación de nutrientes en los materiales de desechos es de gran importancia para el proceso de biodegradación microbiana. La relación C:N en los desechos pueden variar en un amplio rango considerable entre 6 (por ejemplo, suspensiones de animales) y más de 500 (por ejemplo, virutas de madera). Para una degradación óptima, se recomienda una relación C:N:P de 100:5:1 (Steffen, R. et al, 1998).

En caso de una alta proporción C/N la metanogénesis consume rápidamente el nitrógeno, resultando en un bajo rendimiento de formación de biogás. Por otro lado, un bajo valor causa la acumulación de amoniaco y aumenta el pH hasta alcanzar valores de 8.5, el cual es tóxico para las bacterias metanogénicas (Mendoza, 2015).

Para obtener una mejor relación C:N es necesario mezclar varias materias primas, a continuación en la tabla 1 se da una lista de materias con sus respectivas relaciones, que se pueden utilizar que están disponibles en el sector rural.

Tabla 1. Relación C/N de las Materias Primas Empleadas Corrientemente (aproximación)

| Materia Prima | Contenido de carbono de las materias primas por peso (%) | Contenido de nitrógeno de las materias primas por peso (%) | Relación carbono a nitrógeno (C/N) |
|---------------------------|--|--|------------------------------------|
| Paja seca de trigo | 46 | 0.53 | 87:1 |
| Tallo de maíz | 40 | 0.75 | 53:1 |
| Pasto | 14 | 0.54 | 27:1 |
| Estiércol fresco de vaca | 7.3 | 0.29 | 25:1 |
| Estiércol fresco de cerdo | 7.8 | 0.60 | 13:1 |
| Excretas frescas humanas | 2.5 | 0.85 | 3:1 |

Fuente: Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos en el sector rural (1996)

2.3.2.4 pH

El valor del pH es una medición de la concentración de ácido en sistemas acuosos, El pH óptimo es de 6.6-7.4 cercanos a la neutralidad. Resultado de los múltiples equilibrios de ácidos y bases débiles, de la alcalinidad y acidez mineral y del equilibrio con el CO₂ (g).

Los organismos que están presentes en cada etapa son diferentes, pero deben coexistir dentro del mismo reactor y deben tener sus condiciones ambientales para su desarrollo. Las bacterias anaeróbicas, especialmente las metanogénicas, las cuales son sensibles a la concentración ácida en el digestor y su crecimiento puede ser inhibido por esta condición, aumentando la proporción de dióxido de carbono

Las causas por las cuales puede descender el pH son, entre otras:

- Aumento repentino de la carga orgánica.
- Presencia de elementos tóxicos en la materia orgánica.
- Cambio súbito de la temperatura.

En algunos casos el pH puede corregirse con adiciones de sustancias alcalinas como agua con cal. La alcalinidad representa la capacidad buffer (capacidad amortiguadora) del sistema para evitar la bajada del pH por acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV).

En residuos sólidos orgánicos proviene fundamentalmente del amoníaco (NH₃) producto de la hidrólisis de proteínas. Se almacena principalmente como bicarbonato (HCO₃⁻).

Solo la alcalinidad debida al bicarbonato actúa dentro del rango de pH óptimo.

2.3.2.5 Velocidad de carga orgánica

Es la cantidad de materia orgánica introducida por unidad de volumen y tiempo. Valores bajos implican baja concentración en el influente y/o elevado tiempo de retención. El incremento en la velocidad de la carga orgánica (OLR sigla en inglés) implica una reducción en la producción de gas por unidad de materia orgánica introducida, debiendo encontrar un valor óptimo técnico/económico para cada instalación y residuo a tratar. Puede ser descrito mediante la ecuación 11 y ecuación 12

$$OLR = \frac{Q \cdot S}{V} \quad \text{Ec. (11)}$$

$$OLR = \frac{S}{TR} \quad \text{Ec. (12)}$$

Donde

OLR: velocidad de carga orgánica (kg/m³*día)

V: volumen del reactor (m³)

Q: caudal diario ($\text{m}^3/\text{día}$)

S: concentración de SV ($\text{mg/L} \approx \text{kg/m}^3$)

TR: tiempo de retención (día)

2.3.2.6 Porcentaje de sólidos

Toda materia orgánica está compuesta por agua y una fracción sólida (sólidos totales).

El porcentaje de sólidos totales contenidos en la mezcla es también, un factor importante a considerar para asegurar que el proceso se lleve a cabo satisfactoriamente. Experimentalmente se ha demostrado que una carga que contenga entre un 1 y 10% de sólidos totales es óptima para la digestión (Soria M, et al, 2001). Estos lodos contienen una gran cantidad de materia orgánica biodegradable.

2.3.2.7 Agitación

La agitación, sirve para reducir el tiempo de digestión, además sirve para mantener los microorganismos y la materia prima o sustrato que deben estar en contacto de manera continua, el alimento suministrado esta siempre a disposición de los microorganismos, se mantiene a niveles mínimos la concentración de productos finales, así como también los posibles inhibidores del metabolismo bacteriano.

Otro aspecto por lo que es beneficioso hacer agitación del lodo es para evita la formación de la capa de espuma o conseguir la rotura de esta, la capa de espuma se forma en la parte superior del reactor, se ha demostrado que con una agitación de 60 r.p.m o menor no cambia la eficiencia de la digestión.

2.3.3 Tipos de tecnologías utilizadas en la Digestión Anaeróbica

Una amplia variedad de sistemas han sido desarrolladas para el tratamiento de diversos tipos de residuos orgánicos en condiciones anaeróbicas. Esos sistemas pueden ser categorizados de acuerdo a las variaciones en los procesos y/o modo de operación como se describe a continuación:

Sólidos totales

- Procesos en vía húmeda: la materia de entrada es suspendida por una gran cantidad de agua, hasta lograr una concentración de 10 – 15 % de ST.
- Proceso en vía seca: la materia empleada contiene de 20 – 40 % de ST.

Aunque ambas aplicaciones han seguido aumentando la capacidad total, la digestión en vía seca ha sido dominante desde principio de los noventa. Se observó un aumento de los sistemas húmedos entre el 2000 y 2005 cuando se pusieron en funcionamiento varias plantas húmedas a gran escala, mientras que se están instalando más plantas secas de fermentación desde 2005 (De Baere et al, 2008).

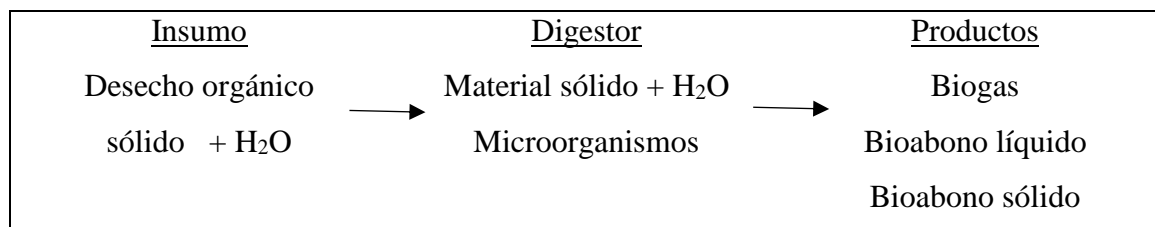
Alimentación al digestor

- Proceso discontinuo (régimen estacionario): también conocida como operación “Batch”, todo adentro todo fuera. Los digestores se cargan con material en un solo lote, cuando el rendimiento de la digestión decae, después de un periodo de fermentación, se vacían los digestores por completo y se alimenta con una nueva carga.

Este sistema es aplicable en situaciones particulares como por ejemplo para la obtención de fertilizantes orgánicos, en este caso, la carga se hace al tener disponibles los desechos y se descarga una o dos veces al año, en la época de siembra

El material se caracteriza, por una alta concentración de sólidos, la cual debe ser adecuadamente inoculado, sobre todo cuando se fermentan materiales vegetales.

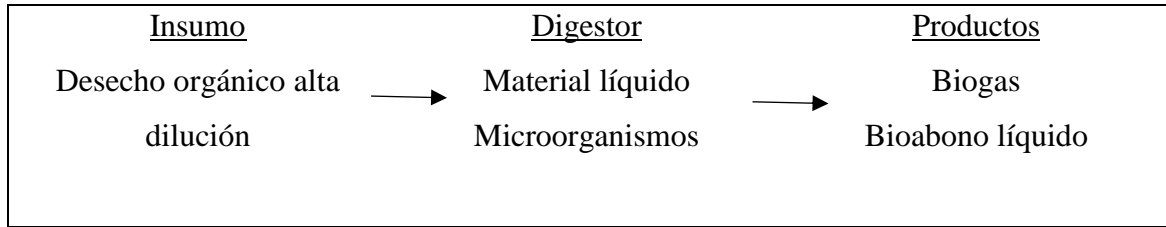
Esquema del proceso (Jacome, 1990)



- Proceso continuo: el sustrato es continuamente alimentado al reactor, al mismo tiempo el efluente es descargado.

Los de régimen continuo se utilizan principalmente para tratamiento de aguas negras; son plantas muy grandes que emplean equipos para proporcionar calefacción y agitación, estos generalmente son de tipo industrial (Soria et al. 2000).

Esquema del proceso (Jacome, 1990):



- Proceso semicontinuo: la primera carga que se introduce consta de gran cantidad de materiales; cuando va disminuyendo gradualmente el rendimiento se agregan nuevas materias primas y se descarga el efluente regularmente en la misma cantidad. Esta operación reúne las ventajas y desventajas del Batch, pero para el caso del bioabono, por la adición continua de materia rica en nutrientes incrementa aún más su calidad.

Este es el tipo de digestor más usado en el medio rural, cuando se trata de sistemas pequeños para uso doméstico. Los diseños más populares son el hindú y el chino. (Mandujano, M. 1981).

Digestores tipo hindú: en general son verticales y enterrados, semejando un pozo. Se cargan por gravedad una vez al día, con un volumen de mezcla que depende del tiempo de fermentación o retención y producen una cantidad diaria más menos constantes. La carga diaria además de producir agitación provoca la salida de un volumen equivalente de lodos digeridos, los que se hacen fluir hasta una pileta para su aplicación a los cultivos

Digestores tipo chino: son tanques cilíndricos con el techo y el piso en forma de domo y se construyen totalmente enterrados. Al iniciar el proceso, el digestor se llena con residuos agrícolas compostados mezclados con lodos activos de otro digestor, una vez cargado así, se va alimentando diariamente con los desechos que se encuentran disponibles provenientes de las letrinas y de los desechos de animales domésticos, a través del tubo de carga el cual llega a la parte media del digestor.

Los abonos líquidos provienen de digestores continuos de alta tasa de carga, con bajo contenido de sólidos totales, (inferior al 12%), el inconveniente de este abono es su comercialización por el estado físico de su presentación. Los abonos sólidos provienen de digestores batch o semicontinuos, estos producen residuos sólidos de buen poder fertilizante y luego de secados se pueden comercializar sin problemas (Guevara, 1996)

Pasos implicados

- Sistema de una etapa: todas las fases de la digestión ocurren en un reactor. Su estructura es simple, de fácil operación y bajo costo, se usa mucho en las zonas rurales.
- Sistema de etapas múltiples: consiste en varios reactores, a menudo la etapa de formación de AGV de la digestión es separada de la etapa de formación de metano. Los digestores de etapas múltiples se caracterizan por un largo periodo de retención, buena descomposición de la materia, pero con una alta inversión.

En los digestores hay varios procesos que ocurren continua y consecutivamente. Estos procesos requieren diferentes condiciones óptimas especialmente con respecto a la acidez. Esta separación se lleva a cabo mediante la instalación de dos reactores diferentes con bacteria diferentes y que funciones en diferentes conducciones. De esta forma, ambos procesos pueden optimizarse (De Baere & et al, 2008).

Conforme al material alimentado

- Co-Digestión: el MO es mezclado con otro sustrato biodegradable, con el objetivo de aprovechar la complementariedad de las composiciones permitiendo mayores eficiencias del proceso. Este proceso, pueden enumerarse las siguientes: mejora el proceso de digestión por mantener la relación C/N, disminuye los contenidos de residuos estacionales, genera una mayor producción de biogás, constituye una vía eficaz para conseguir materias primas o ingresos por concepto de gestión de residuos.

2.3.4 Ventajas y Desventajas de la Digestión Anaeróbica

La digestión anaeróbica es uno de los procesos de estabilización de lodos más utilizado, por lo mismo hay que tener en cuenta cuales son las ventajas y desventajas que existen para poder escoger con mas certeza si este es el proceso que mas se adecua a las necesidades que se plantea en cada proyecto. Las ventajas y desventajas se señalan a continuación:

Ventajas:

- Eliminación de SV (40 - 60%).
- Reduce la masa del lodo (destrucción de 25 – 45% de sólidos). Esto reduce los costos de disposición final.
- Lodo final rico en nutrientes.
- Producción de biogas (55 – 70% gas metano).

- Potencial de recuperar el metano.
- Se eliminan malos olores (70 – 95%).
- Reducción logarítmica de patógenos (coliformes) de 0.5 a 4.
- Degrada compuestos tóxicos y contaminantes orgánicos.
- Costo de operación bajos.
- Simplicidad de operación y mantenimiento.
- Método rentable para grandes volúmenes.

Desventajas:

- Los cambios bruscos de temperatura pueden ocasionar un desequilibrio en la población microbiana y afectar el proceso.
- Sobrenadante con alto nivel de nitrógeno, DBO y DQO.
- Problemas de seguridad (gas inflamable)
- Tiene una lenta tasa de degradación biológica por lo que el tratamiento puede tardar más que la digestión aeróbica.
- malos olores durante el proceso.

2.4 Deposición Final de los Lodos Estabilizados

La disposición de los lodos residuales dependerá de la procedencia y características de estos lodos, los cuales podrán ser dispuestos después de su estabilización en los siguientes sistemas:

Rellenos sanitarios: en un volumen no superior al 8% del total de residuos domésticos. En este caso la humedad del lodo será del 70% o menos. Solo permite lodos A y B. Asimismo, puede habilitarse un mono-relleno, es decir un relleno exclusivo para lodos, con recubrimiento diario.

Plantas de tratamiento de aguas servidas: donde también se puede habilitar un mono-relleno, como instalación anexa, con recubrimiento diario.

Monorellenos independientes: con sistema de impermeabilización, control de olores y recubrimiento diario. La frecuencia de recubrimiento puede aumentarse si es necesario.

Suelos: los que debes cumplir con ciertos requisitos de seguridad, ubicación, humedad, precipitaciones, composición, acidez y pendiente.

Suelos: los que deben cumplir con ciertos requisitos de seguridad, ubicación, humedad, precipitaciones, composición, acidez y pendiente. Por lo tanto, no se pueden aplicar los lodos a: suelos con más de 70% de arena y que tengan más de 100 mm de precipitación media anual; tampoco a suelos con pH inferior a 5; si la pendiente es superior al 15%; No se pueden aplicar si

los suelos están saturados de agua la mayor parte del tiempo (vegas, pantanos, etc) o tengan riesgo de inundación; si la napa freática está a menos de 1 metro de profundidad ni en suelo cubiertos de nieve; no se recomienda a menos de 15 metros de la ribera de ríos y lagos o áreas que sean fuentes de agua para consumo animal.

2.5 Impacto ambiental de la Digestión anaeróbica

La DA comprende una serie de beneficios al medio ambiente porque todos los productos son de posible aprovechamiento, siempre y cuando se cumpla con los estándares establecidos. La DA logra los siguientes resultados

- Minimización del uso de vertederos y por ende de las emisiones de gases de efecto invernadero atribuidas al mismo.
- Mejora de la calidad del agua tratada sin provocar efectos secundarios perjudiciales.
- Recuperación de energía mediante la valorización de residuos
- Reducción de demanda y uso de fertilizantes sintéticos que alteran las condiciones del suelo.
- Mejora la calidad del aire debido a menos emisiones de CO₂.

La finalidad del proyecto es lograr reducir los parámetros físico-químico y biológicos de las aguas servidas domésticas, después de un periodo de tiempo en el digestor que permita obtener al final un efluente, cuyas características y calidad aseguren una baja o nula contaminación y que los lodos puedan ser dispuestos al medio ambiente sin peligro

2.6 Metales pesados

Otros de los temas que se tiene que tener en cuenta sobre la utilización de los lodos son los metales pesados que están presentes en las aguas residuales y en el caso de las aguas provenientes de domicilio están presentes en los detergentes que contienen Cd, Cu, Zb. Estos metales se concentran principalmente en los lodos residuales. Estos metales son causales de contaminación en las aguas y en el suelo.

Estos afectan a microorganismos, macroorganismos y plantas, por lo tanto, su presencia no solo afecta al ambiente externo, sino también reduce en gran medida la actividad microbiana del proceso de tratamiento.

La presencia de estos en el fango tratado puede determinarse, bien durante la digestión o en análisis posteriores al tratamiento, cuando ya se dispone de un sólido capaz de ser o al suelo agrícola.

Durante la digestión se puede evaluar el rendimiento registrado en un determinado tiempo, puesto que la presencia de metales pesados puede ser perjudicial para la actividad microbiológica en el reactor.

El análisis del lodo estabilizado es necesario para conocer y garantizar los niveles contenidos de estos elementos, además es importante cumplir con lo establecido por el Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servida en el Art N°24. En la tabla 2 se presenta las concentraciones máximas de metales pesados en lodos para aplicación al suelo.

Tabla 2. Concentraciones Máximas de Metales Pesados en Lodos para la Aplicación al Suelo

| Metales | Concentraciones máximas en mg/kg de sólidos totales (base materia seca) ¹ | |
|----------|--|--|
| | Suelos que cumplen los requisitos establecidos en este título | Suelos degradados que cumplen los requisitos establecidos en este título |
| Arsénico | 20 | 40 |
| Cadmio | 8 | 40 |
| Cobre | 1000 | 1200 |
| Mercurio | 10 | 20 |
| Níquel | 80 | 420 |
| Plomo | 300 | 400 |
| Selenio | 50 | 100 |
| Zinc | 2000 | 2800 |

Nota: ¹Concentraciones expresadas como contenidos totales

Fuente: Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servida.

2.7 Uso del lodo estabilizado en la agricultura

El sólido estabilizado es producto del tratamiento del lodo mediante la digestión anaeróbica, que contiene gran cantidad de nutrientes que pueden acondicionar un suelo para la agricultura.

Existe la posibilidad de que la incorporación del lodo sea perjudicial si no se logra una buena estabilización, una de estas puede ser la presencia de metales pesados que son los principales contaminantes. Por lo que es importante tener en cuenta la legislación vigente sobre los límites de presencia de estos elementos en los lodos.

Otro aspecto importante es el grado de patogenicidad de sólido estabilizado, que puede ser controlado mediante un tratamiento térmico durante la digestión, siendo la temperatura utilizada para la estabilización un factor importante para la eliminación o disminución de patógenos. Siendo en la digestión anaeróbica termofílica donde se produce la mayor disminución de patógenos.

Por lo tanto, el bioabono no posee mal olor, no contamina y no atrae a vectores. Puede ser aplicado directamente al campo en forma líquida o bien deshidratado y almacenado para usarse posteriormente.

También se puede utilizar como materia prima para producir compostas mezclado con rastrojos; se puede utilizar para cultivos por hidroponía, en los que se proporciona a la planta la humedad y los nutrientes que requiere sin utilizar tierra.

El impacto ambiental del sólido producido sería positivo al momento de usar en la agricultura como fertilizante, debido a que se evita la aplicación de insumos sintéticos que perjudican la dinámica ambiental del suelo y las aguas subterráneas si no se tiene los correspondientes conocimientos de dosificación, condiciones del suelo, profundidad de manto freático, etc.

La composición del bioabono varía según los desechos utilizados, y en promedio un análisis en base seca es la que se muestra en la tabla 3 (Gomez, G. & Viniegra, G. 1978).

Tabla 3. Composición Porcentual del Bioabono

| | |
|------------------|--------|
| pH | 7.5 |
| Materia Orgánica | 85.0 % |
| Nitrógeno | 2.6 % |
| Fósforo | 1.5 % |
| Potasio | 1.0 % |

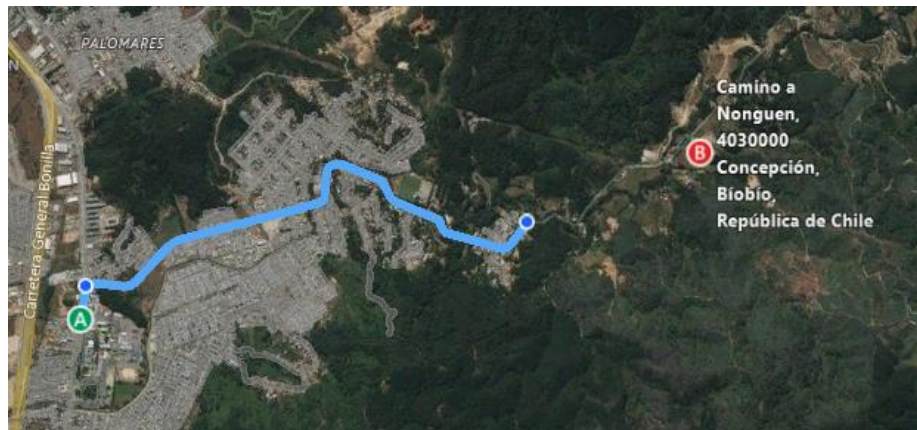
Las principales ventajas del fertilizante de estos lodos radican principalmente en lo siguiente (Pichardo, E. 1980):

- Posee mayor cantidad de nitrógeno que la materia prima original en base seca, el que mediante el proceso de digestión se torna más asimilables por las plantas.
- Es un buen material para el mejoramiento de suelos.
- A diferencia del estiércol fresco, no posee olores desagradables.
- No contiene bacterias patógenas o semillas de malas hierbas, puesto que el proceso de digestión las elimina.
- Un metro cubico de biabono producido diariamente puede fertilizar más de 2 has de tierra por año a un nivel de 200 kg N/ha.
- El incremento de la producción agrícola por el uso del biabono puede alcanzar un promedio de 10 – 20 %.

3 METODOLOGÍA

3.1 Descripción de la Toma de Muestras

Las muestras son sacadas de una fosa séptica recién dispuesta en una casa particular que se ubica en la comuna de Concepción en el sector de Nonguén como muestra la figura 4, las muestras extraídas son del rango de 15 a 25 gr, las muestras son puestas en un frasco de $23,15 \text{ cm}^3$ de capacidad, se sacarán muestras de lodos 1 vez por semana, durante 4 meses, las que luego de ser sacadas son llevadas al laboratorio de Mecánica de Suelos, de la Universidad de Bío Bío, para realizar los respectivos ensayos. Para la toma de muestra se diseña un muestreador la cual se muestra en la figura 5, para tomar las muestras de lodos desde el fondo de la fosa séptica, el muestreador se ingresa a la fosa como se ilustra en la figura 6.



Nota. A: Universidad del Bío Bío; B: Lugar de toma de muestras, Camino Nonguén.

Figura 4. Mapa de Visualización del Sector de Toma de Muestras

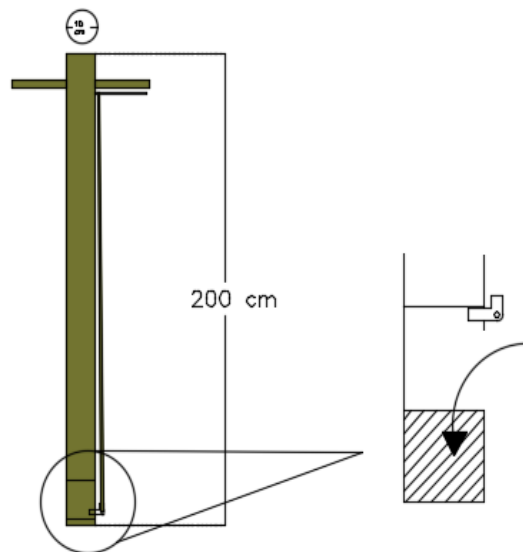


Figura 5. Muestreador

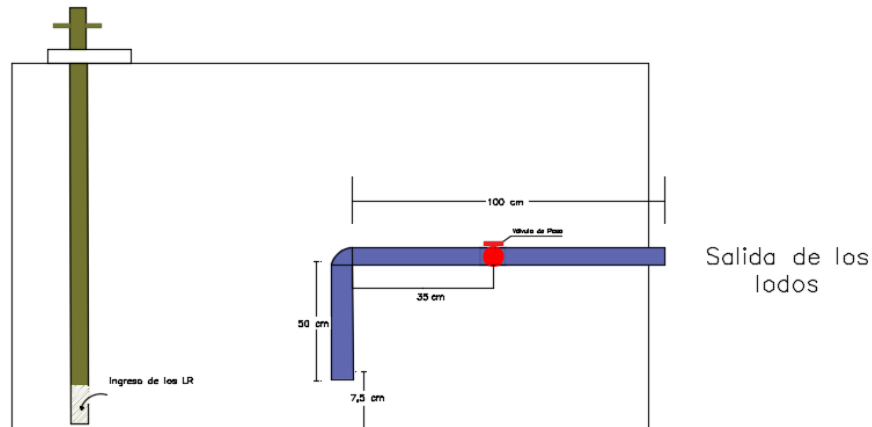


Figura 6. Toma de muestras

3.2 Determinación de los sólidos totales

Los sólidos totales son la fracción sólida de la materia orgánica. Para la determinación de la concentración de los ST en el lodo, se utilizará la muestra extraída de la fosa séptica de 25,13 cm³, la cual es llevada al laboratorio, la muestra es colocada en una capsula previamente pesada en una balanza digital con precisión de 0.01 g, ésta se seca en un horno de secado a 105°C durante 24 horas, pasado este tiempo se vuelve a pesar la muestra en la balanza. Con los datos obtenidos, los sólidos totales se determinan por la ecuación 13.

$$ST = \frac{A-B}{V} * 1000 \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad \text{Ec. (13)}$$

Donde:

A = Peso de la capsula más muestra seca (g)

B = Peso de la capsula (g)

V = Volumen muestra inicial (cm³)

3.3 Determinación de la humedad

El porcentaje de humedad se determina según se indica en la ecuación 14.

El volumen de lodo depende en su mayoría del contenido de humedad. Un lodo primario tiene del 91 al 95% de humedad. En cambio, un lodo secundario, tiene del 98,5 al 99,5% de humedad (Metcalf & Eddy, 2003)

$$\%H = \frac{A-B}{C} * 100 \quad \text{Ec. (14)}$$

Donde:

A: Peso de la capsula más muestra inicial (g)

B: Peso de la capsula más muestra seca (g)

C: Peso muestra inicial (g)

3.4 Determinación de los sólidos volátiles

Los sólidos volátiles es la materia que es capaz de volatizarse tras un proceso de incineración, representa la cantidad de materia orgánica de los residuos sólidos. Para la determinación del porcentaje de los SV se utiliza la muestra seca que quedo del proceso anteriormente mencionada (ST) la muestra se coloca en un crisol previamente pesado, la muestra es llevada a una mufla a 550°C durante 2 horas, luego de dejar enfriar la muestra es pesada obteniendo el peso del crisol más las cenizas. Por lo tanto, los SV son calculados por la siguiente ecuación 15

$$\%SV = \frac{A-B}{M} * 100 \quad \text{Ec. (15)}$$

Donde:

A = Peso del crisol más masa del residuo antes de la calcinación

B = Peso del crisol más masa del residuo después de la calcinación

M = Peso del residuo seco

La estabilización de los lodos se comprueba mediante los SV que está relacionada con la fracción de materia orgánica biodegradable que se busca reducir.

3.5 Determinación de los sólidos minerales (SM)

Los sólidos minerales, también llamados sólidos fijos, son los sólidos que quedan luego de la calcinación de los sólidos totales y se determina según la ecuación 16

$$\%SM = 100 - \%SV \quad \text{Ec. (16)}$$

Donde:

SV: porcentaje de los sólidos volátiles obtenido de la ecuación 15

3.6 Determinación de la constante de degradación (k)

Se debe tener presente que la materia orgánica pasa por un proceso de biodegradación, la cual es medida a través de los sólidos volátiles en función del tiempo y está determinada por una tasa de consumo de la materia orgánica por parte de los microorganismos en un ambiente anaeróbico. Esta constante (k) es la que nos indicara el factor con que los lodos se degradan diariamente, el cual se calcula mediante el valor de los sólidos volátiles obtenidos durante todo el tiempo de estudio. La constante se obtiene según indica la ecuación 17.

$$\begin{aligned}
 \text{Masa desaparece} &= kM_t \\
 (M_t &= V * SSV) \\
 -\frac{d(V * SSV)}{dt} &= k * V * SSV \\
 \frac{dSSV}{dt} &= kSSV \\
 \ln \frac{SSV_0}{SSV_i} &= kt_i \\
 \ln \frac{SV_0}{SV_i} &= kt_i \qquad \text{Ec. (17)}
 \end{aligned}$$

Donde:

SV₀: sólidos volátiles inicial

SV_i: sólidos volátiles en el tiempo i

k: constante de degradación

t_i: tiempo i

3.7 Determinación del Volumen Mensual

Para determinar el volumen ocupado por los lodos residuales que ingresan a la fosa séptica se hará mediante el método de la toalla, este método consiste en colocar una toalla blanca en una estaca, ésta es introducida a las aguas residuales hasta llegar al fondo, donde en la toalla quedara marcada la altura de los lodos sedimentados. Estos datos fueron tomados una vez al mes.

El volumen es calculado por la siguiente ecuación 18:

$$V = L(r^2 * \arcsin\left(1 - \frac{h-h_0}{r}\right) + (h - h_0 - r) * \sqrt{2r(h - h_0) - (h - h_0)^2}) \quad \text{Ec. (18)}$$

Donde:

L = Largo de la Fosa

r = Radio de la Fosa
 h = Altura de los lodos
 h₀ = Altura de los lodos anterior

Para efecto de este cálculo se considera que la fosa séptica es un cilindro perfecto.

Se determinará el volumen utilizando la diferencia de alturas que se obtienen mes a mes, teniendo el volumen mensual se sacará un promedio de ésta para determinar una aproximación del volumen de lodos sedimentados que aumenta mensualmente.

3.8 Factibilidad de retirar los lodos de la fosa séptica y tiempo de extracción.

Los lodos después de pasar el tiempo necesario serán retirados por un mecanismo elaborado manualmente en la fosa séptica utilizada para el estudio, que se construyó con tubos de pvc de 55 mm de diámetro y una válvula la cual al abrirla se dará el paso a la salida de los lodos como se indica en la figura 7, 8 y 9. Se caracterizara el sólido tomando una muestra cada 30 segundos para determinar el tiempo que se debe mantener la válvula abierta para obtener un lodo digerido. Procedimiento de la implementación del dispositivo se encuentra en el anexo B en la figura B1.

El sistema de tuberías se realiza bajo el teorema de bernoulli la cual se muestra en la ecuación 19 y la ecuación de continuidad entre 2 secciones de la ecuación 20

$$\frac{P_1}{\rho} + gZ_1 + \frac{V_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + gZ_2 + \frac{V_2^2}{2} \quad \text{Ec. (19)}$$

Donde

P: presión a lo largo de la línea de corriente del fluido

ρ : densidad del fluido

g: constante de gravedad

Z: altura desde una cota de referencia

V: velocidad de flujo del fluido

Nota: Se supone que la velocidad en la sección 1 es despreciable comparada con la velocidad en la sección 2. Al abrir la válvula la presión de la sección 1 es la presión atmosférica.

$$Q_A = Q_B \quad \text{Ec. (20)}$$

$$V_A A_A = V_B A_B$$

$$V_A \frac{\pi d_A^2}{4} = V_B \frac{\pi d_B^2}{4}$$

Donde

Q: caudal

V: velocidad de flujo del fluido

A: área de la tubería

d: diámetro de la tubería

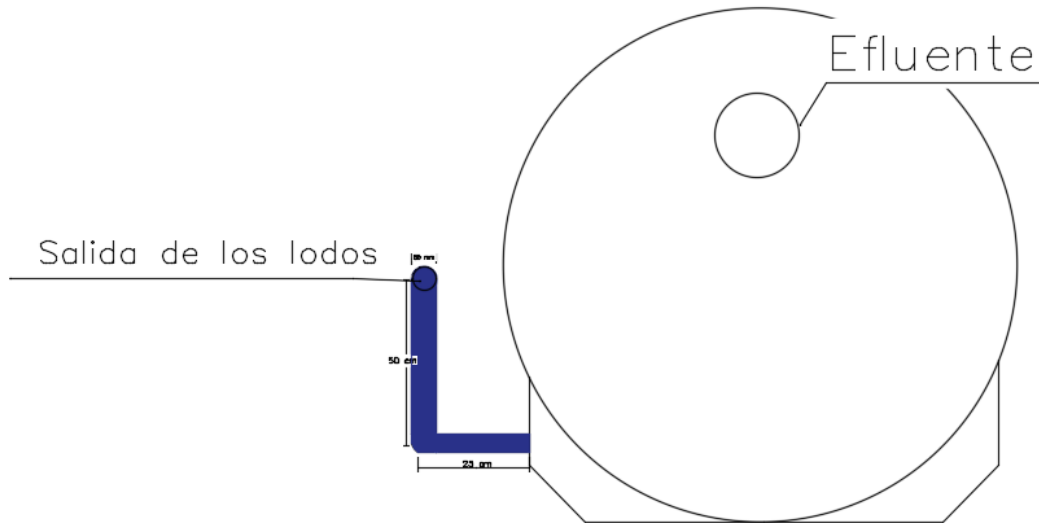


Figura 7. Vista Frontal de la Fosa Séptica

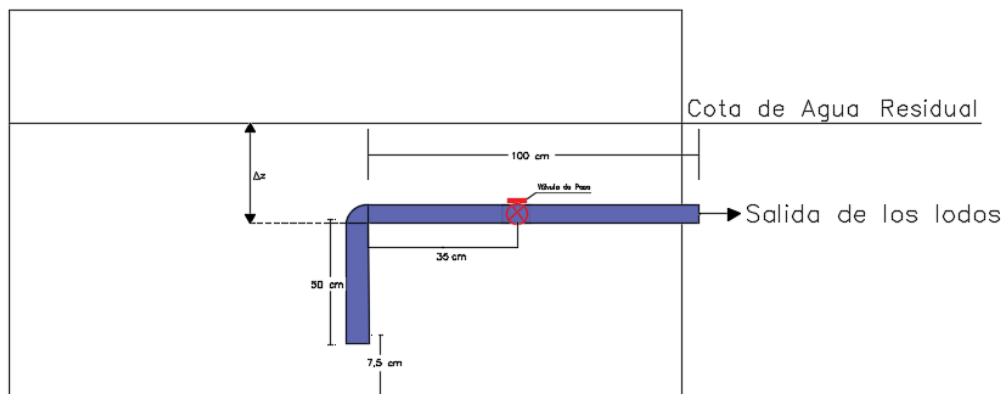


Figura 8. Vista Lateral de la Fosa Séptica con Válvula Cerrada

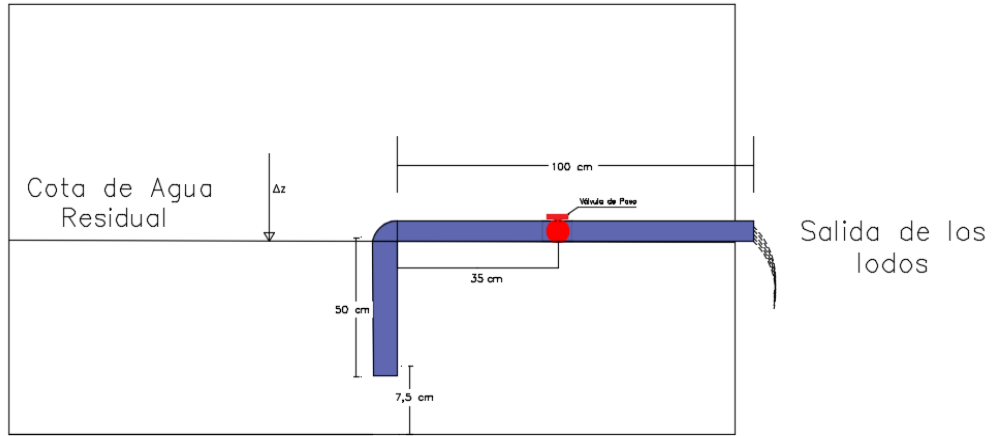


Figura 9. Vista Lateral de la Fosa Séptica con Válvula Abierta

4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Características del Residuo Sólido.

Para la obtención de los datos, la muestra debió pasar por diferentes procesos de secado y de calcinación, el cual se representa en la siguiente figura 10.



Figura 10. Proceso físico del residuo sólido

Cada imagen representa una etapa, donde A es el lodo inicial, B es la materia seca después de pasar por el horno de secado a 105°C y C es la ceniza después que la masa seca de la imagen B es calcinada en la mufla a 550°C.

4.2 Humedad

La humedad se obtiene después de que la muestra pasa por la etapa del secado obteniendo lo que muestra la figura 11. Para la determinación del porcentaje de humedad los datos se encuentran en la tabla A1 del Anexo A.

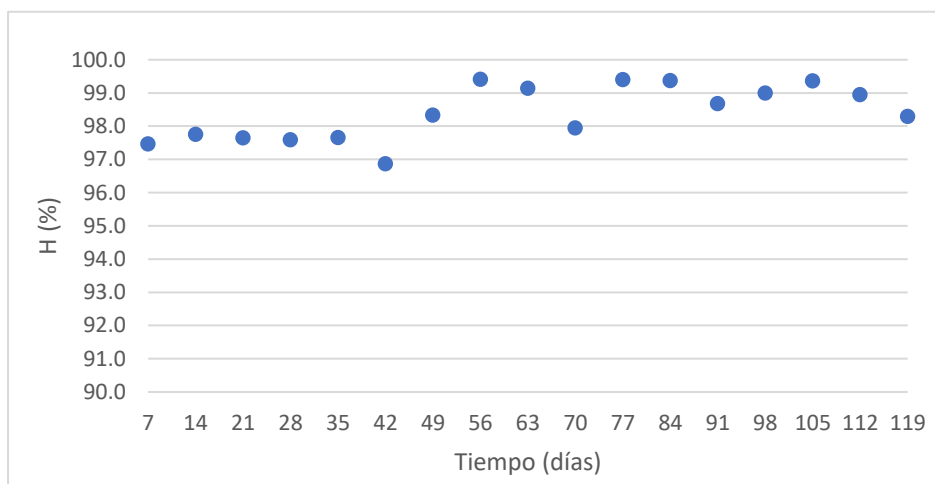


Figura 11. Variación de la humedad en función del tiempo.

Durante el estudio la humedad varía entre 96,34% a 99,41%. Respecto a lo descrito por Metcalf et Eddy, la humedad concuerda con que los lodos residuales estudiados son lodos secundarios, donde el porcentaje de humedad esta entre 98,5 y 99,5% y además el porcentaje de humedad es alto ya que los lodos están en un proceso de biodegradación por vía húmeda.

4.3 Sólidos totales y Sólidos volátiles

De las 17 muestras tomadas a lo largo del estudio durante 119 días, se obtuvieron los siguientes valores de ST y SV como se muestra en la figura 12 y 13 respectivamente. Los datos son presentados en la tabla A.1 y tabla A.2 del Anexo A.

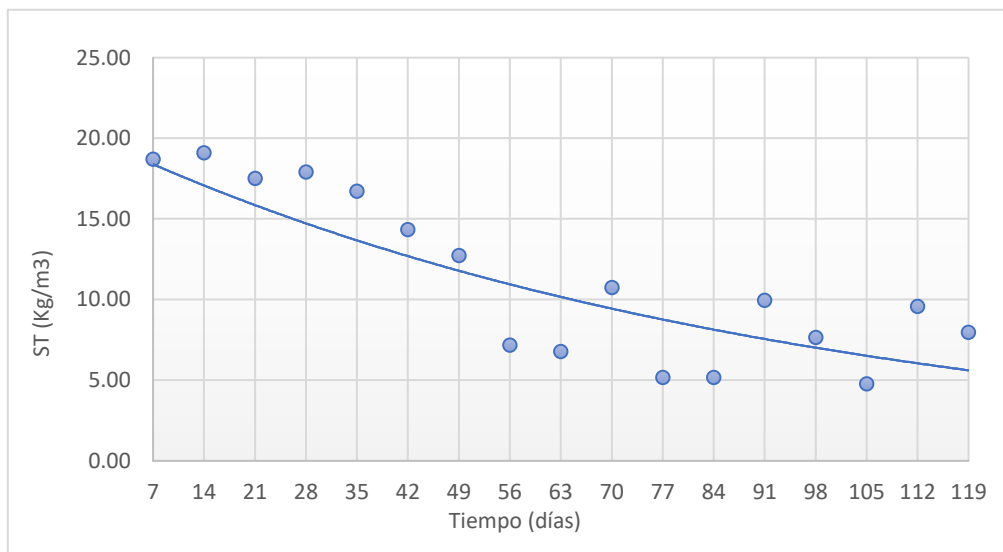


Figura 12. Variación de los sólidos totales en función del tiempo.

Con respecto a los ST, las concentraciones son bajas ya que los sólidos están inmersos en agua residual, durante los primeros 50 días las concentraciones fluctúan entre los 19,1 a 15,92 kg/m³ mientras que en el último mes estas concentraciones están entre 9,95 a 4,78 kg/m³, la disminución de los sólidos totales se debe a que la materia orgánica disminuye debido a la degradación que existe.

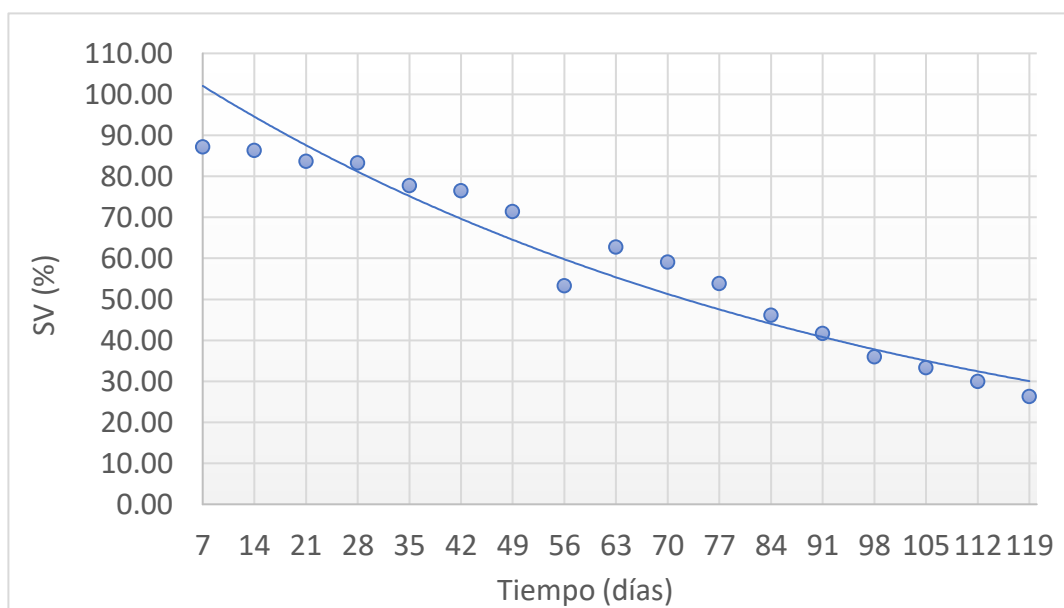


Figura 13. Variación de los sólidos volátiles en función del tiempo.

En el caso de los sólidos volátiles que se pueden considerar como la fracción de materia orgánica biodegradable, tienen una baja considerable alrededor del día 84, esto se debe principalmente a la acción de la biodegradación anaeróbica que se produjo en los lodos.

Al inicio del estudio de los lodos los SV alcanzaban un 87,16%, a los 70 días tiene un contenido de 59,09% de SV a los 91 días donde se produce la mayor baja de SV alcanzando un 41,67%, terminando el estudio el día 119 con 26,32% de SV.

La curva de los SV en algún momento se vuelve constante y esto se debe a que se biodegrada toda la materia orgánica al llegar a esta estabilización se establece que es el punto donde se obtiene la cantidad de sólidos minerales que están presentes en el lodo residual

De los sólidos volátiles según el reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas, como se mencionaba anteriormente, para que un lodo pueda ser considerado un lodo estabilizado se necesita que la reducción de los sólidos volátiles sea de un 38% mínimo, esto se aprecia en la figura 14 donde se puede observar que al día 77 se logra una reducción de los sólidos volátiles en más de un 38%, el cual tiene una consistencia con la figura 13 donde al día 81 se observa una reducción considerable de SV. Además de la figura 14 se puede decir que al último día de estudio (día 119) se alcanza un 71% de reducción de SV.

Se conoce que para una digestión anaeróbica a los 60 días se alcanza una reducción de los SV permitida, en este caso alrededor de los 60 días solo hay una reducción entre 25%.

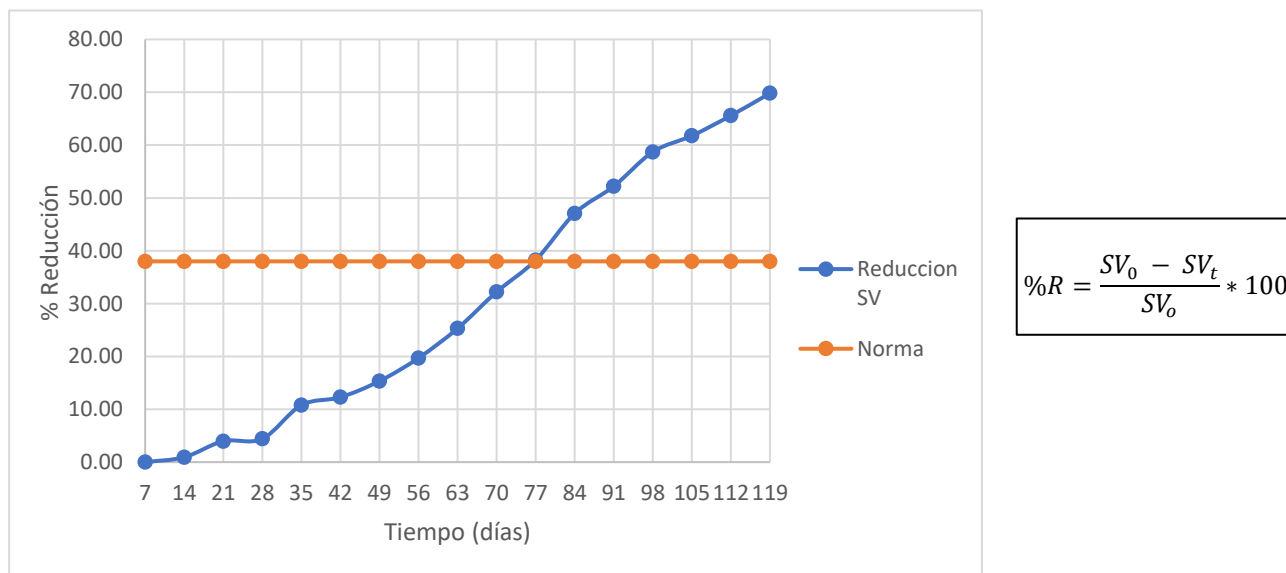


Figura 14. Reducción sólidos volátiles en función del tiempo.

4.4 Sólidos Minerales

De los SV se puede obtener los sólidos minerales que se muestran en la figura 15 a continuación. Para la determinación de los SM se encuentran en la tabla A2.

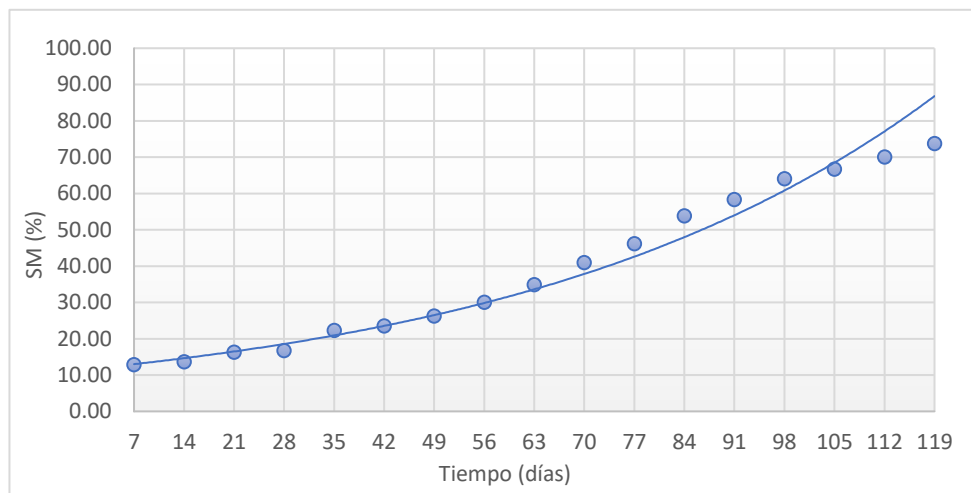


Figura 15. Variación de los sólidos minerales en función del tiempo.

Los sólidos minerales se representan por la cantidad de cenizas que queda después de que la muestra seca es calcinada a 550°C, estas cenizas representan los sólidos inertes que contiene el lodo, los SM a medida que pasa el tiempo va aumentando y se debe a la biodegradación que tiene la materia orgánica, las cenizas comienzan con un 12,82% llegando a 73,68% el día 119 del estudio. Se debe tener presente que la cantidad de SM es constante y la que varía es la cantidad de SV, por lo tanto, lo que cambia es la fracción mineral.

4.5 Constante de degradación

De la linealización de los sólidos volátiles en función del tiempo se determina la constante de degradación como se muestra en la ecuación 17 antes descrita, como resultado se obtiene el gráfico que muestra la figura 16.

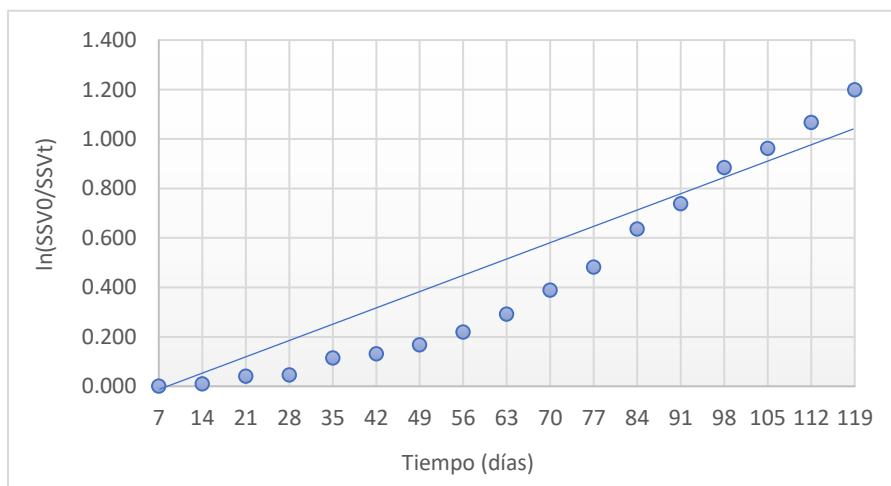


Figura 16. Variación del ln(SSVo/SSVt) en función del tiempo.

De los datos obtenidos que se muestran en la tabla 4 se obtiene la constante de degradación, dando como resultado lo que se muestra a continuación.

Tabla 4. Datos para determinar la constante de degradación

| Solidos Volátiles (%) | Ln(SSVo/SSVt) | k |
|-----------------------|---------------|-------|
| 87,18 | 0,000 | 0,000 |
| 86,36 | 0,009 | 0,001 |
| 83,72 | 0,040 | 0,002 |
| 83,33 | 0,045 | 0,002 |
| 77,78 | 0,114 | 0,003 |
| 76,47 | 0,131 | 0,003 |
| 73,81 | 0,166 | 0,003 |
| 70,00 | 0,219 | 0,004 |
| 65,12 | 0,292 | 0,005 |
| 59,09 | 0,389 | 0,006 |
| 53,85 | 0,482 | 0,006 |
| 46,15 | 0,636 | 0,008 |
| 41,67 | 0,738 | 0,008 |
| 36,00 | 0,884 | 0,009 |
| 33,33 | 0,961 | 0,009 |
| 30,00 | 1,067 | 0,010 |
| 26,32 | 1,198 | 0,010 |

$$k = \frac{\ln\left(\frac{SSVo}{SSVt}\right)}{ti} = 0,0052\left(\frac{1}{\text{día}}\right)$$

El factor con que los lodos se degradan es de 0.0052 1/día. Con respecto a la constante se puede comentar que, si la biodegradación de la materia orgánica mediante digestión anaeróbica se logra antes de lo establecido en este estudio, la constante de degradación (k) aumentaría en caso contrario el factor disminuiría.

4.6 Factibilidad hidráulica y tiempo de extracción.

Para verificar la factibilidad de retirar los lodos de la fosa con el sistema creado, esto se comprobó abriendo la válvula puesta y observar si los lodos salen por la tubería, estos lodos si salen por las tuberías incorporadas a la fosa séptica, por lo tanto, se comprueba que el sistema descrito en las figuras 7 y 8 resulta la salida de los lodos se muestra en la figura B.1 expuesta en el anexo B1.

Además, se realizó un estudio de los lodos que fueron sacados de la tubería, la prueba se realizó a los 3 meses de puesta en marcha la fosa séptica, para esto se tomaron 6 muestras cada 30 segundos y el resultado fue el que se presenta en el figura 17, en el cual se puede estimar, comparado con lo encontrado en el figura 12 y 13, donde se verifica que con un 53% de SV se cumple con el reglamento de la eliminación de un 38% de SV, con esta información se puede inferir que teniendo la válvula abierta durante 2 minutos o menos se puede asegurar que salen de ella los lodos estabilizados.

Los datos están presentados en la tabla A.3 del Anexo A

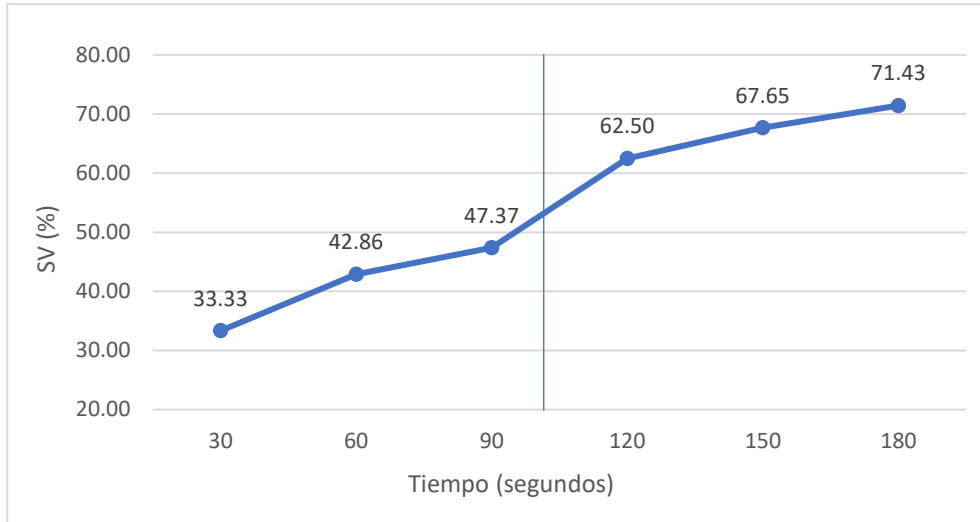
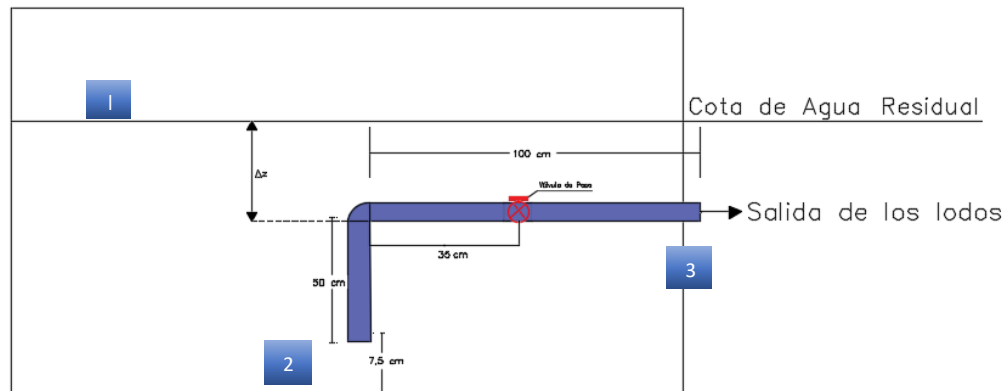


Figura 17. Variación de los sólidos volátiles en función del tiempo.

Con respecto a la factibilidad hidráulica del sistema de tuberías instalado se puede observar lo siguiente:



Nota: se toma como nivel de referencia la cota de la sección 3 y sabiendo las condiciones descritas en la sección 3.8

Se tiene:

$$\frac{P_1}{\rho} + gZ_1 + \frac{V_1^2}{2} = \frac{P_3}{\rho} + gZ_3 + \frac{V_3^2}{2}$$

$$9.8 * 0.62 = \frac{V_3^2}{2}$$

$$V_c = \sqrt{2 * 9.8 * 0.62} = 3.5 \text{ m/s}$$

$$Q_3 = V_3 A_3$$

$$Q_3 = 3.5 \frac{\pi * 0.055^2}{4} = 8.3 * 10^{-3} m^3/s$$

Si se disminuye el diámetro por ejemplo a 20 mm se tiene:

$$Q_3 = 3.5 \frac{\pi * 0.02^2}{4} = 1.09 * 10^{-4} m^3/s$$

De esto se puede inferir que al disminuir el diámetro el caudal disminuye considerablemente por lo tanto si se disminuye el diámetro el retiro de los lodos digeridos del sistema se dificulta. Pero en este caso llevado a la realidad con el caudal de 392.4 lt/hr es factible ya que según lo estipulado se deberá tener la válvula abierta durante máximo 2 minutos lo cual nos lleva un 12 litros aproximado de los lodos que son retirados.

Al igual que si se aumenta la altura de la tubería, disminuye la distancia entre la altura de la salida de los lodos y la cota de agua residual, lo que implicara que la velocidad de salida disminuya por lo tanto disminuye así también el caudal de salida.

4.7 Volumen mensual

Para el cálculo del volumen se necesitan las alturas de los lodos residuales sedimentados en la fosa séptica. Los cuales se muestran en la tabla 5.

Se calcula el valor del volumen mensual según la ecuación 16 descrita anteriormente en el apartado 3.7. Teniendo el volumen mensual se calcula el volumen promedio que nos indica cual es el volumen utilizado de los lodos residuales una vez decantado a lo largo de los meses depositados en la fosa séptica. Estos volúmenes se muestran en la figura 18.

Tabla 5. Altura de los lodos residuales.

| Mes | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------|-----|---|------|----|----|
| Altura (cm) | 3,5 | 9 | 13,5 | 16 | 20 |

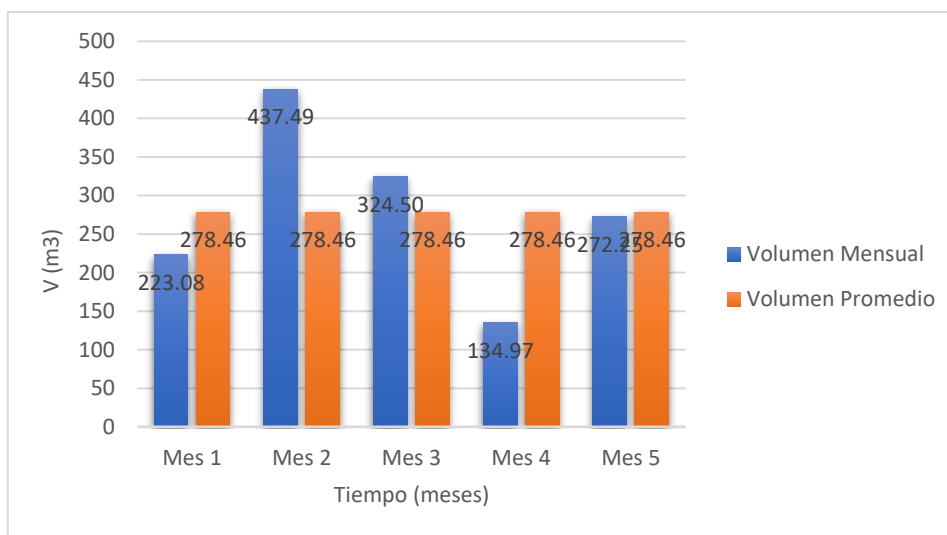


Figura 18. Volumen mensual y promedio.

5 CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones

- Con respecto a la biodegradación de la materia orgánica, se puede indicar que a los tres meses de puesta en marcha una fosa séptica ocurre la mayor reducción de la misma, alcanzando un 41,67% de sólidos volátiles.
- A los 77 días con una fracción de sólidos volátiles 53,85% se cumple con la reducción de un 38% de SV mínimo establecido por el “reglamento para el manejo de lodos residuales generados en planta de tratamiento de aguas servidas”.
- El retiro de los lodos residuales sedimentados es factible hidráulicamente mediante el dispositivo instalado en la fosa séptica. De los lodos retirados por el sistema creado, a los 100 segundos de tener la válvula abierta se tiene un 54% de SV.
- Durante la estación de verano entre los meses de enero y febrero ocurre la mayor reducción de sólidos volátiles, hay aproximadamente un 40% de reducción.
- El volumen oscila entre $140 m^3$ y $430 m^3$, con un promedio de $278 m^3$.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Avendaño, D. (2010). Diseño y Construcción de un Digestor Anaerobio de Flujo Pistón que Trate los Residuos Generados en una Explotación Ganadera de la Localidad de Loja, Ecuador, Empleando Tecnologías Apropriadas. Loja, EC: Universidad Politécnica de Madrid.

Cisterna, P. (2017). Gestión de residuos sólidos, apunte de clases.

De Baere L & Mattheeuwa B. (2008). State of art – Anaerobic digestión of solid waste.

Gomez, G.J. & Viniegra, G.G. (1979). The use of anaerobically digested cattle slurry as a fertilizer for vegetables. Tropical animal production No 4.

Guevara A. (1996). Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. Produccion de gas y saneamiento de efluentes.

Karthikeyan, O. & Visvanathan, C. (2013). Bio-energy recovery from high-solid organic substrates by dry anaerobic bio-conversion processes: a review. Rev Environ Sci Biotechnol, 257-284.

Kothari, R., Pandey, A., Kumar, S., Tyagi, V., & Tyagi, S. (2014). Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 174-195.

Madigan MT, Martinko JM, Dunlap PV, Clark DP (2009). Brock biology of microorganisms. 12th ed. Benjamin Cummings.

Mandujano M., I. (1981). Biogas: Energía y fertilizantes a partir de desechos orgánicos. Manual para el promotor de la tecnología. Organización Latinoamericana de Energía. Cuernavaca, Morelos, México.

Mendoza C. (2015). Digestión anaeróbica en vía seca – Diseño de tratamiento de fangos generados en estación depuradora de aguas residuales.

Metcalf & Eddy. (2003). Wastewater Engineering Treatment and Reuse (4 ed.). Nueva York, Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill.

Pichardo, E.J. et al. (1980). Obtención de energía mediante la digestión de estiércol de vaca. Tesis profesional. ENEP-Cuautitlán. UNAM, Mexico. D.F.

Reith, J., Wijffels, R., & Barten, H. (2003). Bio-methane & Bio-hydrogen - Status and perspectives of biological methane and hydrogen production. Petten, NL: Smiet offset.

Soria M., Ferrera R., Etchevers J., Alcantar G., Trinidad J., Borges L., Pereyda G. (2001). Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo. Terra Latinoamericana, 19 (4), 353-362.

Torres E. (2002). Reutilización de agua y lodos residuales. pag 1-11

7 ANEXOS

Índice de Anexos

| | |
|---------------|----|
| Anexos A..... | 43 |
| Anexos B..... | 46 |

Anexo A

A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante todo el proceso de medición de los lodos residuales.

Tabla A.1. Datos para Determinar los Sólidos Totales y Humedad

| Dato | Peso Capsula (g) | Peso Capsula + Muestra (g) | Peso Capsula + Muestra Seca (g) | Peso Muestra (g) | Peso Seco (g) | Volumen Lodos Residuales (cm ³) |
|------|------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|---------------|---|
| 1 | 25,58 | 44,11 | 25,98 | 18,53 | 0,4 | 25,13 |
| 2 | 23,7 | 45,04 | 24,18 | 21,34 | 0,48 | 25,13 |
| 3 | 27,01 | 45,74 | 27,48 | 18,73 | 0,47 | 25,13 |
| 4 | 26,48 | 45,19 | 26,95 | 18,71 | 0,47 | 25,13 |
| 5 | 25,18 | 43,13 | 25,62 | 17,95 | 0,44 | 25,13 |
| 6 | 25,18 | 36,66 | 25,6 | 11,48 | 0,42 | 25,13 |
| 7 | 25,18 | 44,31 | 25,61 | 19,13 | 0,43 | 25,13 |
| 8 | 25,57 | 56,09 | 25,75 | 30,52 | 0,18 | 25,13 |
| 9 | 26,93 | 46,68 | 27,1 | 19,75 | 0,17 | 25,13 |
| 10 | 25,18 | 38,34 | 25,5 | 13,16 | 0,32 | 25,13 |
| 11 | 24,43 | 46,2 | 24,56 | 21,77 | 0,13 | 26,13 |
| 12 | 26,97 | 47,63 | 27,1 | 20,66 | 0,13 | 25,13 |
| 13 | 27,02 | 45,92 | 27,27 | 18,9 | 0,25 | 25,13 |
| 14 | 26,44 | 46,32 | 26,64 | 19,88 | 0,2 | 25,13 |
| 15 | 24,44 | 43,34 | 24,56 | 18,9 | 0,12 | 25,13 |
| 16 | 25,56 | 49,27 | 25,81 | 23,71 | 0,25 | 25,13 |
| 17 | 25,18 | 36,9 | 25,38 | 11,72 | 0,2 | 25,13 |

Tabla A.2. Datos para Determinar los Sólidos Volátiles y Sólidos Minerales

| Dato | Peso Crisol (g) | Peso Crisol + Muestra Seca (g) | Peso Crisol + Cenizas (g) | Peso Seca (g) | Peso Cenizas (g) |
|------|-----------------|--------------------------------|---------------------------|---------------|------------------|
| 1 | 23,93 | 24,32 | 23,98 | 0,39 | 0,05 |
| 2 | 23,92 | 24,4 | 24 | 0,48 | 0,08 |
| 3 | 23,79 | 24,23 | 23,85 | 0,44 | 0,06 |
| 4 | 20,6 | 21,03 | 20,67 | 0,43 | 0,07 |
| 5 | 36,11 | 36,55 | 36,24 | 0,44 | 0,13 |
| 6 | 38,82 | 39,24 | 38,93 | 0,42 | 0,11 |
| 7 | 38,8 | 39,23 | 38,92 | 0,43 | 0,12 |
| 8 | 22,09 | 22,27 | 22,13 | 0,18 | 0,04 |
| 9 | 22,1 | 22,27 | 22,14 | 0,17 | 0,04 |
| 10 | 23,9 | 24,2 | 23,98 | 0,3 | 0,08 |
| 11 | 38,61 | 38,74 | 38,65 | 0,13 | 0,04 |
| 12 | 20,32 | 20,45 | 20,38 | 0,13 | 0,06 |
| 13 | 37,23 | 37,47 | 37,36 | 0,24 | 0,13 |
| 14 | 23,8 | 24 | 23,94 | 0,2 | 0,14 |
| 15 | 38,62 | 38,74 | 38,7 | 0,12 | 0,08 |
| 16 | 20,6 | 20,85 | 20,76 | 0,25 | 0,16 |
| 17 | 38,62 | 38,81 | 38,76 | 0,19 | 0,14 |

Tabla A.3. Datos Utilizados para la Factibilidad Hidráulica.

| Dato | Peso Capsula (g) | Peso Capsula + Muestra (g) | Peso Capsula + Muestra Seca (g) | Peso Muestra (g) | Peso Seco (g) |
|------|------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|---------------|
| 1 | 26,79 | 47,14 | 26,85 | 20,35 | 0,06 |
| 2 | 24,44 | 44,27 | 24,51 | 19,83 | 0,07 |
| 3 | 25,56 | 47,79 | 25,75 | 22,23 | 0,19 |
| 4 | 23,7 | 45,54 | 23,86 | 21,84 | 0,16 |
| 5 | 26,45 | 46,58 | 26,79 | 20,13 | 0,34 |
| 6 | 27 | 46,99 | 27,07 | 19,99 | 0,07 |

Tabla A.4. Datos para determinar los Sólidos Volátiles en Factibilidad Hidráulica.

| Dato | Peso Crisol (g) | Peso Crisol + Muestra Seca (g) | Peso Crisol + Cenizas (g) | Peso Muestra Seca (g) | Peso Cenizas (g) |
|------|-----------------|--------------------------------|---------------------------|-----------------------|------------------|
| 1 | 36,01 | 36,07 | 36,05 | 0,06 | 0,04 |
| 2 | 23,93 | 23,98 | 23,95 | 0,05 | 0,02 |
| 3 | 23,79 | 23,93 | 23,84 | 0,14 | 0,05 |
| 4 | 38,61 | 38,75 | 38,65 | 0,14 | 0,04 |
| 5 | 20,6 | 20,89 | 20,66 | 0,29 | 0,06 |
| 6 | 22,09 | 22,16 | 22,11 | 0,07 | 0,02 |

Anexo B

A continuación, se presentarán las fotografías correspondientes a los diferentes procesos que se realizaron durante el estudio.



Figura B.1 Instalación del dispositivo en la fosa séptica.

Materiales utilizados para cada proceso



Figura B.2. Balanza con precisión de 0,01 g.

En la primera fotografía se muestra la capsula que se utiliza para colocar la muestra inicial y la cual es llevada al horno de secado. En la segunda se muestra el crisol utilizado con la muestra seca el cual es llevado a la mufla para la calcinación de la materia.



Figura B.3. Horno de secado.



Figura B.4. Mufla utilizada para la calcinación a 550°C



Figura B.5. Método de la toalla, altura de los lodos sedimentados