

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Tesis previa a la obtención del
título de Ingeniero Ambiental**

TÍTULO:

**“OPTIMIZACIÓN DE UN BIODIGESTOR EN LA DEPURACIÓN DE AGUA
RESIDUAL CON ESTIÉRCOL DE GANADO BOVINO”**

AUTORES:

Guerrero Maxi Clara Daniela

Inga Chacón Erika Tamara

Samaniego Calle Fabián Eduardo

DIRECTOR:

ING. SERVIO ASTUDILLO

Cuenca, Noviembre del 2011

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Clara Daniela Guerrero Maxi, Erika Tamara Inga Chacón y Fabián Eduardo Samaniego Calle, bajo mi supervisión.

Ing. Servio Astudillo

DIRECTOR DE TESIS

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Los conceptos desarrollados, análisis realizados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Cuenca, Octubre del 2011

f)

Clara Guerrero

f)

Erika Inga

f)

Fabián Samaniego

AGRADECIMIENTO

“No Basta Saber Las Cosas, Es Necesario Practicarlas” Don Bosco.

Queremos agradecer primeramente a la Universidad Politécnica Salesiana quien nos abrió sus puertas para emprender nuestros estudios y culminar con éxito nuestra carrera universitaria.

Hacemos también votos de fraterno agradecimiento hacia nuestro director de tesis, Ing. Servio Astudillo, quien ha dedicado su tiempo para compartir sus conocimientos en la elaboración de este proyecto; es para nosotros un privilegio haber contado con tan valioso apoyo.

De manera especial, agradecemos el apoyo recibido por parte del Señor Vicerrector de esta institución, Economista Luis Tobar, quien nos ha respaldado desde el inicio de este trabajo de tesis.

Hacemos extenso nuestro agradecimiento a los docentes de la carrera de Ingeniería Ambiental con quienes hemos compartido varios años de estudios y a quienes quedamos en deuda por habernos formado académicamente durante nuestros estudios.

DEDICATORIA

El resultado del esfuerzo se refleja en los frutos obtenidos. Dedico este trabajo a *Dios* y a mi madre la *Virgen María*, de quienes he recibido la fortaleza, paciencia y la iluminación necesaria para no desfallecer frente a los retos que día a día se me han presentado.

Con el presente trabajo quiero también honrar el esfuerzo, los consejos, la paciencia y confianza de *mis padres Pedro y Laura*, quienes han creído en mis capacidades y me han apoyado en cada instante de mi vida, ayudándome a superar cualquier adversidad con su ejemplo de amor al sacrificio, que todo lo alcanza.

A mis hermanos, *Juan Carlos, Fernando y Catalina* de quienes he recibido el buen ejemplo de perseverancia para superarme cada día.

Que Dios les Bendiga mi Querida Familia

Clara

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a:

A mi Dios por darme vida y permitirme haber llegado a cumplir una meta más en mi vida.

A mis queridos padres que con su cariño, sacrificio, trabajo, honestidad y dedicación abnegada día a día, siempre ha sido y será un ejemplo de vida y superación.

A mis hermanos, por impulsarme a ser mejor cada día y darme la fuerza necesaria para alcanzar las metas propuestas.

Erika

DEDICATORIA

El presente trabajo de tesis dedico a toda mi familia que gracias a su apoyo y confianza pude terminar mi carrera.

A mis padres Ángel Eduardo y María Isabel que nunca perdieron la fe, y por brindarme los recursos necesarios para cumplir mis objetivos como persona y estudiante, en especial a mi madre que con sus consejos y amor me animo a seguir adelante día a día.

A mis hermanos María Angélica y Miguel Ángel, que han sido una inspiración en mi vida y me han apoyado incondicionalmente.

A mi tía Naty que desde mi infancia me enseñó el valor de un trabajo duro, perseverancia y responsabilidad.

A mi Mami Rosa que desde el cielo junto a dios me mira y me cuida todo los días, siempre recordare cada una de tus palabras que llevaban consejos y amor, gracias por ser mi más grande inspiración.

Y a todos mis amigos y compañeros, en especial a Clara y Erika, que juntos compartimos esta hermosa experiencia.

Fabián

SÍNTESIS

La elaboración del presente proyecto se ha llevado a cabo en base a la importancia que demanda el cuidado del medio ambiente y de la disposición correcta de desechos orgánicos que pueden ser aprovechados como fuentes energéticas alternativas.

La implementación del biodigestor en la granja Juan Lunardi de la Universidad Politécnica Salesiana, se realizó una vez determinada el tipo de aguas residuales que se encuentra generando el lavado del establo, a las que se les clasificó como aguas residuales de origen ganadero.

Una vez conocido el tipo de aguas a tratar se tomaron los respectivos criterios de diseño para la construcción de la planta de biodigestión con el levantamiento topográfico correspondiente, determinando la ubicación para cada etapa del proceso: fase de captación: conformada por dos etapas a) levantamiento topográfico y construcción del canal de captación, b) tanque de carga, c) sistema de tubería para captación; en cuanto a la fase de carga constituye el sistema de alimentación; en la fase de biodigestión se encuentran las siguientes etapas: a) construcción de la base de concreto en media luna, b) construcción de la estructura externa, c) emplazamiento del biodigestor, d) zona de descarga y e) carga del biodigestor con agua del lavado del establo; por último la fase de captación de gas comprende: a) instalación de la tubería, b) purificación del biogás, c) y almacenamiento y quema del biogás.

La determinación de la carga contaminante se hizo en relación a la presencia de coliformes totales, y a su comportamiento de acuerdo al tiempo de retención dentro del biodigestor, a más de considerar la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) como parámetros de comparación para la determinación de la calidad del agua. El método experimental consistió en la realización de tres tratamientos de 25 días cada uno considerado como el tiempo de retención

adecuado para que se dé correctamente un proceso de degradación anaerobia, siendo el día cero el testigo de cada tratamiento. Así mismo, cada cinco días de cada tratamiento, se midieron parámetros tales como el DBO5, el DQO y coliformes totales a más de medirse otros parámetros de monitoreo como el pH, T° y ST. En lo que se refiere a los valores del pH la ventaja de las aguas residuales de origen ganadero por su alcalinidad, tienden a la neutralidad por lo que es un parámetro óptimo para trabajar con los demás pruebas químicas de medición.

En cuanto a la estadística de los resultados obtenidos se utilizó como herramienta el software informático Minitab® 15.1.30.0., 2007, versión español. En este software se trabajó con los métodos de Anova y Tukey a fin de determinar el comportamiento de los parámetros antes mencionados durante los diferentes días que se encuentra el agua dentro del biodigestor.

En cuanto al comportamiento de los parámetros analizados los sólidos totales tienden a disminuir en gran cantidad; mientras que en la demanda bioquímica de oxígeno sigue el normal comportamiento logarítmico de crecimiento microbiano y en cuanto a la demanda química tiene una tendencia a disminuir en el transcurso de cada tratamiento.

Una vez realizada la digestión anaerobia de las aguas residuales sometidas al tratamiento, los resultados de laboratorio dieron respuestas satisfactorias al disminuir la presencia de coliformes notablemente para el día 25 con 115 UFC/ml¹ respecto al día cero, cuya presencia de coliformes fue de 143 UFC/ml¹.

RESUMEN.

La elaboración del presente artículo se ha llevado a cabo en base a la importancia que demanda el cuidado del medio ambiente y de la disposición correcta de desechos orgánicos que pueden ser aprovechados como fuentes energéticas alternativas.

Siguiendo el criterio del diseño de biodigestores se determinó luego de una caracterización del tipo de agua a tratar la implementación de un biodigestor tipo tubular con flujo discontinuo, el mismo que se ha adaptado a un efluente proveniente del lavado del establo de ganado de la granja Juan Lunardi de la UPS Campus Paute.

Luego de un tiempo de retención de 25 días se obtuvo una remoción de Coliformes Totales, DBO₅, DQO y siendo lo que más disminuyó el SST

Palabras claves: SST, DQO, DBO₅, Coliformes totales, biodigestor tubular, geomembrana.

ABSTRACT.

The preparation of this article was carried out based on the importance of the care of the environment and proper disposal of organic waste that can be exploited as alternative energy sources.

Following the biodigester design criteria was determined after a characterization of the type of water to treat the implementation of a tubular biodigester discontinuous flow type, it has been adapted to a washing effluent from livestock barn on the farm John Lunardi at the UPS Campus.

After a retention time of 25 days was obtained by removal of total coliforms, DBO₅, DQO and most declined to be what is the SST

Keywords: TSS, COD, BOD₅, Total coliforms, tubular biodigester, geomembrane.

INDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	16
JUSTIFICACIÓN	18
OBJETIVOS	20
OBJETIVO GENERAL	20
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
HIPÓTESIS	20
CAPÍTULO 1:	
ANTECEDENTES GENERALES	21
1. 1 PRODUCCIÓN DE GANADO BOVINO DE LA GRANJA JUAN LUNARDI	21
1.1.1 Área de estudio	21
1.1.2 Descripción de la granja	22
1.1.3 Caracterización del estable	22
1.1.4 Contaminación producida por los desechos de ganado bovino	23
1.2 NORMATIVA DE DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES DE LA PRODUCCIÓN PECUARIA	25
1.2.1 Normativa Ecuatoriana	25
1.2.2 Normativa de Costa Rica	27
CAPÍTULO 2:	
SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA LA DEPURACIÓN DE DESECHOS ORGÁNICOS	28
2.1 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL DE ORIGEN GANADERO	28
2.1.1 Aspectos físicos	28
2.1.2 Aspectos químicos	29
2.1.3 Aspecto biológico	30
2.2 PRINCIPIO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO ANAEROBIO	30
2.2.1 Selección del tratamiento	30
2.3 CARACTERÍSTICAS DE UN BIODIGESTOR ANAEROBIO	31
2.3.1 Condiciones para la biodigestión anaerobia	32

2.3.2 Estructura general de un biodigestor.	32
2.3.3 Clasificación de los biodigestores anaerobios.	32
2.4 PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.	34
2.4.1 Respiración anaerobia.	34
2.5 PROCESO MICROBIOLÓGICO Y BIOQUÍMICO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.	35
2.5.1 Hidrólisis.	37
2.5.2 Etapa fermentativa o acidogénica.	38
2.5.3 Etapa acetogénica.	40
2.5.4 Etapa metanogénica	40
2.6 PRODUCTOS DEL PROCESO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.	43
2.6.1 Bioabono.	43
2.6.2 Biogás.	46
CAPITULO 3:	
DISEÑO DEL BIODIGESTOR Y SUS COMPONENTES.	48
3.1 DISEÑO DEL BIODIGESTOR.	48
3.2 DIMENSIONAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN	51
3.2.1 Fase de captación.	51
3.2.3 Fase de carga.	54
3.2.4 Fase de biodigestión.	55
3.2.4 Fase de captación de biogás	63
CAPÍTULO 4:	
PRUEBAS EXPERIMENTALES DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.	67
4.1 PROCEDIMIENTO.	67
4.2 PRUEBAS REALIZADAS	68
4.2.1 Parámetros químicos	69
4.2.2 parámetros microbiológicos	70
4.2.3 Parámetros físicos.	71
CAPITULO 5:	
RESULTADOS Y ESTADÍSTICA.	73

5.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST) ..	73
5.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO.	78
5.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO.....	83
5.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE COLIFORMES TOTALES.....	87
5.5 ANÁLISIS DE PROMEDIOS.....	93
CONCLUSIONES	95
RECOMENDACIONES.....	96
PROYECCION FUTURA.....	97
ENFOQUE DE LA INVESTIGACION:	98
BIBLIOGRAFÍA.....	99
ANEXOS.....	100
ANEXO I.....	101
ANEXO II.....	113
ANEXO III.....	118

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Criterio de calidad admisible para aguas de uso agrícola.....	25
Tabla 2: Límites máximos permisibles, por tipo de actividad para aguas residuales vertidas en cuerpos receptores.....	27
Tabla 3. Clasificación de los biodigestores.....	33
Tabla 4: Composición bioquímica del biorgánico proveniente del estiércol (BE) y de estiércol + alfalfa (BEA). /Medina, V.A. y Solari, E, G. 1990.....	44
Tabla 5: Relación Carbono – Nitrógeno de acuerdo al origen de Materia Orgánica.....	45
Tabla 6: Compuestos del biogás.....	46
Tabla 7: Porcentaje de producción de metano según la materia orgánica	47
Tabla 8: Elementos: sistema de alimentación.....	54
Tabla 9: Implementos de construcción.....	55
Tabla 10: Implementos construcción externa.....	57
Tabla 11: Elementos para el biodigestor.....	59
Tabla 12: Fórmula del volumen de la geomembrana.....	62
Tabla 13: Accesorios para la instalación del sistema.....	63
Tabla 14: Resultados de solidos suspendidos totales.....	73
Tabla 15: Resultados de la demanda bioquímica de Oxígeno.....	78
Tabla 16: Resultados de la demanda química de oxígeno.....	83
Tabla 17: Resultados de coliformes totales	87
Tabla 18: Resultados análisis de promedios.....	93

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Mapa de ubicación del cantón Paute.....	21
Ilustración 2: Interior del establo de la granja Juan Lunardi.....	23
Ilustración 3 Descripción de la contaminación del área.....	24
Ilustración 4: Procesos anaerobios.....	36
Ilustración 5: Reacciones metanogénicas.....	42
Ilustración 6: Reconocimiento del terreno antes de la construcción.....	48
Ilustración 7: Levantamiento topográfico del canal de captación.....	51
Ilustración 8: Construcción del canal de captación y replanteamiento.....	52
Ilustración 9: Tanque de carga.....	53
Ilustración 10: Canal, tubería y tanque de captación.....	53
Ilustración 11: Sistema de alimentación.....	54
Ilustración 12: Construcción del encofrado inicial.....	55
Ilustración 13: Enlucido de la base de concreto.....	56
Ilustración 14: Base de concreto concluida.....	56
Ilustración 15: Estructura metálica inicial con tubos galvanizados.....	57
Ilustración 16: Ubicación de la malla y del techo.....	58
Ilustración 17: Estructura metálica concluida.....	58
Ilustración 18: Esquema general de un digester de flujo horizontal tipo Plug Flow.....	59
Ilustración 19: Brida de presión.....	60
Ilustración 20: Sistema de descarga del biodigestor.....	61
Ilustración 21: Orificio con acople de tuberías para gas de ½”.....	61
Ilustración 22: Tanque de descarga.....	62
Ilustración 23: Biodigestor cargado.....	63
Ilustración 24: Tubería acoplada a la abertura de ½ pulgada para captar CH ₄	64
Ilustración 25: Filtros de purificación.....	64
Ilustración 26: Filtros colocados en el sistema de biogás.....	65
Ilustración 27: Almacenamiento de biogás.....	65
Ilustración 28: Quema de biogás puro.....	66
Ilustración 29: procedimiento de la prueba experimental.....	68
Ilustración 30: Montaje del sistema de filtración y bomba de vacío.....	72
Ilustración 31: Gráfica de cajas de sólidos suspendidos totales.....	75
Ilustración 32: Gráfica de residuos de solidos suspendidos totales.....	76
Ilustración 33: Gráfica de caja de la demanda bioquímica de oxígeno.....	79
Ilustración 34: Gráfica de residuos de la demanda bioquímica de oxígeno.....	80
Ilustración 35: Grafica de caja de la demanda química de Oxigeno.....	84
Ilustración 36: Gráfica de residuos de la demanda química de oxígeno.....	85
Ilustración 37: Gráfica de cajas de coliformes totales.....	89
Ilustración 38: Gráfica de residuos de coliformes totales.....	90
Ilustración 39: Gráfica de porcentaje de remoción de SST, DBO5, DQO, Y Coliformes totales, luego de los 25 días.....	93

INTRODUCCIÓN

En la provincia del Azuay se estima una población de ganado de unas 341.799,15 cabezas (MAG 2003), siendo esta una fuente de contaminantes orgánicos e inorgánicos, productos de las descargas de aguas con contenido de excretas, que llegan a las aguas superficiales y subterráneas, provocando serios problemas de contaminación por coliformes y nitratos en suelos o acuíferos, además de que estos residuos tienen un alto contenido de materia orgánica, la misma que consume oxígeno y albergan gran cantidad de organismos patógenos como la *Salmonella*, *Escherichia coli*, *Yersinia*, *Proteus*.

Los desechos orgánicos del ganado bovino producen de 3 – 8 kg de heces/cabezas/día, aproximadamente 1879 toneladas diarias en la provincia del Azuay. Esta situación, representa un problema en la degradación del medio natural que puede recibir debido a los vertidos líquidos de las excretas, que en su mayoría es directa debido a la disposición final que se les da.

En el caso de los desechos de ganado bovino, son de gran porosidad y contienen alta humedad, estos residuos muchas de las veces son irregularmente manejados, contaminando fuentes hídricas por infiltración de purines a mantos acuíferos. Además los residuos orgánicos producidos por la actividad ganadera, incluyen heces y otros materiales que pueden ser descompuestos por bacterias aeróbicas, es decir en procesos con consumo de oxígeno. Cuando este tipo de desechos se encuentran en exceso, la proliferación de bacterias agota el oxígeno.

Como consecuencia de esta actividad en un sector en plena evolución y transformación, el sector pecuario sufre así por un lado la presión del avance tecnológico, que exige soluciones a sus nuevos planteamientos para recuperar, aprovechar y reciclar materias que hasta el momento no tenían otra opción que su disposición final como vertido residual, por estas razones, el presente proyecto tiene como finalidad utilizar un proceso alternativo de depuración de las aguas

provenientes de las actividades ganaderas, utilizando un biodigestor de tipo tubular con flujo horizontal, y así, disminuir la concentración de los principales contaminantes. Una vez depuradas las aguas, se puede aprovechar energéticamente el producto final conocido como BIOABONO, el mismo que consideramos como un gran aporte para el desarrollo sostenible de los abonos orgánicos.

JUSTIFICACIÓN

Las aguas residuales provenientes de la actividad ganadera, son aquellas que han perdido su capacidad de uso debido a las actividades para las que han sido utilizadas, especialmente la limpieza de los establos. En la provincia del Azuay la producción de excretas provenientes de la actividad pecuaria es de 1879 toneladas diarias aproximadamente, considerando que una sola cabeza de ganado produce un valor medio de 5,5 kg de excretas al día y el total de la población ganadera del Azuay según (MAG2003) es de 341799,15 cabezas. Estos residuos al ser mezclados con agua se transportan con gran facilidad hacia otras fuentes, estas aguas residuales contienen un alto nivel contaminante especialmente por la presencia de coliformes fecales, que son microorganismos propios de los excretas, los mismos que pueden contaminar aquellos sistemas en donde son evacuadas si no se les ha dado un respectivo tratamiento.

Considerando el peso que tiene el sector tradicional en el manejo de aguas residuales, se debe relacionarlo con nuevas técnicas para una mejor disposición de estos residuos, tal es el caso de la utilización de biodigestor, que tienen la capacidad de depuración de agua del lavado de las granjas. Históricamente se conoce que el primer biodigestor instalado y aprovechado para la obtención de biogás se utilizó en Bombay en 1859 para dar tratamiento a las excretas humanas con el fin de mejorar la calidad de vida.

Un biodigestor, (bio: vida, presencia de microorganismo vivos) (digestor: fermentación sin oxígeno), es un sistema diseñado para solventar la problemática energética –ambiental, como realizar un manejo adecuado de los residuos tanto humano como animales. Consiste en un recipiente (geomembrana) cerrado, en donde se fermentan las excretas por acción anaeróbica. Los productos de este proceso son el biogás y el bioabono. Este sistema puede variar según las necesidades, partiendo

de modelos sencillos y económicos hasta plantas de gran capacidad depuradora y alta producción energética.

El uso de bioabonos en la agricultura no es un tema recientemente descubierto, para la edad media es decir hace unos 800 años aproximadamente, se reconoció la importancia que juega el uso de las excretas animales en la agricultura para la fertilización de cultivos. Es así que en la actualidad, en la búsqueda de una agricultura sustentable, y que minimice el consumo de productos con carga de fertilizantes químicos, se buscan métodos que ayuden a mejorar la calidad del suelo y la producción de alimentos más naturales.

A partir del uso de la biodigestión de aguas residuales, obtenemos como subproducto un bio-abono conocido como BIOABONO, que es considerado como un elemento importante que contiene nutrientes fácilmente asimilables por las plantas, además de beneficiar la fertilización del suelo pues la cantidad de nutrientes que este contiene debe estar dentro de los rangos permisibles evitando una contaminación por exceso de excretas. Esto además ayuda a lograr una independencia como consumidor de fertilizantes químicos y de energía.

Debemos tomar en cuenta también que el uso indiscriminado de cualquier fertilizante ya sea químico u orgánico puede acarrear problemas en los cultivos, ya que puede causar contaminación al sistema: planta – suelo – agua.

OBJETIVOS.

OBJETIVO GENERAL

- Proyectar e implementar un sistema de digestión anaerobia para la depuración de aguas residuales de origen ganadero.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

1. Esquematizar el proceso de construcción del biodigestor de acuerdo a las necesidades y características de la granja.
2. Realizar el montaje y puesta en marcha del sistema de digestión anaerobia para propiciar el tratamiento de la descarga orgánica.
3. Realizar ensayos experimentales en el sistema del biodigestor para obtener los parámetros de operación del proceso que maximice la eficiencia de depuración de la carga contaminante.
4. Analizar los datos experimentales obtenidos con el fin de comprobar que el tipo de digestión anaerobia cumple con los requerimientos esperados.
5. Utilizar el biogás como sustituto de combustible procedente de la digestión anaerobia para el calentamiento del galpón de pollos.

HIPÓTESIS.

H0: La carga contaminante de las aguas residuales provenientes del estiércol de ganado bovino no disminuye luego de pasar por el biodigestor.

H1: La carga contaminante de las aguas residuales provenientes del estiércol de ganado bovino disminuye luego de pasar por el biodigestor.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES.

1. 1 PRODUCCIÓN DE GANADO BOVINO DE LA GRANJA JUAN LUNARDI.

1.1.1 ÁREA DE ESTUDIO:

El proyecto de tesis se desarrolló en la Granja Juan Lunardi, propiedad de la Universidad Politécnica Salesiana, ubicada a 749457.41 m. longitud Este y 9693105.00m. latitud Norte, con 2100 msnm y una temperatura promedio de 19°C, humedad del 65% y precipitación anual de 1576 mm. correspondiente a la zona subtropical- templado característico del valle del Rio Paute.

Ilustración 1: Mapa de ubicación del cantón Paute.



Fuente: www.karta-online.com

1.1.2 DESCRIPCIÓN DE LA GRANJA.

La granja posee una extensión de 5 hectáreas, el mismo que cuenta con un sistema de riego mixto por aspersión y goteo. El espacio cuenta con:

- Criadero de animales.
- Instalación para la crianza de aves.
- Invernaderos.
- Equipos de ordeño mecánico.
- Picadora para producción, adecuación de alimento, pasto y preparación de sustratos para compostaje y lombricultura.
- Equipo de labranza.

1.1.3 CARACTERIZACIÓN DEL ESTABLO.

El área del establo es un espacio adecuado para la cría de animales mayores, ocupado con 9 cabezas de ganado vacuno, la producción mínima diaria de estiércol de cada animal es 5.5 kg., proporcionando un promedio diario de 49,5 kg de estiércol.

El ganado permanece estabulado en el establo, por lo que el peso total de estiércol que se recoge es el 100% de la excreta generada, el mismo que se encuentra combinado con purines y desperdicios del alimento del ganado.

El proceso de recogida y limpieza del establo se lo realiza todas las mañanas, para las cuales se realiza las siguientes actividades:

- **Raspado manual:** Utilización de rastrillos para recoger el estiércol grueso.
- **Sistema de agua a chorro:** Para el lavado del área de las camas se utiliza un chorro de agua mediante una manguera, la misma que barre y diluye el estiércol

que queda impregnado en el suelo, estos son descargados por gravedad hacia el canal de drenaje.

- ***Drenaje por gravedad:*** El propio peso del efluente permite que se descargue el agua del lavado hacia una canal de desagüe exterior.

Ilustración 2: Interior del establo de la granja Juan Lunardi.



Fuente: Los autores.

1.1.4 CONTAMINACIÓN PRODUCIDA POR LOS DESECHOS DE GANADO BOVINO.

Los desechos de ganado bovino, dada la dimensión del problema que representan no sólo por el aumento de volúmenes producidos sino por el uso inapropiado, puede crear problemas medioambientales por contaminación difusa, tanto en el cuerpo de agua como en el suelo, generando a partir de la degradación de la materia orgánica incrementos de nitrógeno, fósforo, potasio y metales pesados, particularmente cobre y aumentos de la flora microbiana que inciden negativamente en la salud humana y animal, constituyendo un riesgo de bacterias, virus y hongos.

La materia orgánica de los desechos de ganado está compuesta principalmente por nitrógeno, siendo este el más abundante debido a la presencia de amoníaco, producto de

la descomposición de la urea y responsable de la contaminación del aire debido a que este emana malos olores además que su transformación en nitratos da lugar a posibles problemas de contaminación de aguas superficiales y subterráneas.

El fósforo aunque es el nutriente menos abundante en el estiércol, conjuntamente con el nitrógeno, puede dar origen a los conocidos problemas de eutrofización de las aguas.

La presencia de potasio en suelos pobres, puede provocar desequilibrios en las plantas al momento de absorber otros elementos, como por ejemplo el magnesio, que compite con el potasio, produciéndose una notable deficiencia en las plantas y posibles enfermedades en el ganado.

La elevada carga orgánica del estiércol presenta elevadas concentraciones de DBO y DQO dando lugar a posibles episodios anóxicos en las aguas, así mismo, la contaminación orgánica que generan los purines, pueden representar un peligro de toxicidad para los animales. También es importante señalar la difusión de patógenos a partir del estiércol, por ejemplo los del género *Salmonella* las *Brucella* y el *Mycobacterium tuberculosis*.

Ilustración 3 Descripción de la contaminación del área.¹



Fuente: Los autores

¹ a1) - a2) acumulación de estiércol en el agua b) aglomeración de estiércol en el suelo.

1.2 NORMATIVA DE DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES DE LA PRODUCCIÓN PECUARIA.

Las aguas residuales son aquellas que siendo utilizadas en alguna actividad, al momento de ser evacuadas, presentan una composición variada en sus características físicas, químicas y biológicas, tal es el caso de la actividad de la granja en donde el agua se utiliza principalmente en la limpieza del establo. De tal forma, se debe considerar los niveles máximos permitidos en las descargas de agua residual de uso ganadero de acuerdo a la normativa que rige en cada país. En el caso del Ecuador, se aplica las normativas del Texto Unificado de Legislación Ambiental, en donde se hace referencia a la cantidad de coliformes totales permitidos en la descarga de aguas residuales. Para el caso del DBO₅ y del DQO se ha comparado con la normativa de Costa Rica la misma que se encuentra vigente y aprobada.

1.2.1 NORMATIVA ECUATORIANA.

En el libro VI, Anexo 1, la norma de calidad ambiental y de usos de efluentes indica que:

Se entiende por agua de uso agrícola aquella empleada para la irrigación de cultivos y otras actividades conexas o complementarias que establezcan los organismos competentes.

Se prohíbe el uso de aguas servidas para riego, exceptuándose las aguas servidas tratadas y que cumplan con los niveles de calidad establecidos en esta Norma.

Tabla 1: Criterio de calidad admisible para aguas de uso agrícola.

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Aluminio	Al	mg/l	5.0
Arsénico (total)	As	mg/l	0.1
Bario	Ba	mg/l	1.0
Berilio	Be	mg/l	0.1
Boro (total)	B	mg/l	1.0

Cadmio	Cd	mg/l	0.01
Carbamatos Totales	Concentración total de carbamatos	mg/l	0.1
Cianuro (total)	CN ⁻	mg/l	0.2
Cobalto	Co	mg/l	0.05
Cobre	Cu	mg/l	2.0
Cromo hexavalente	Cr ⁺⁶	mg/l	0.1
Flúor	F	mg/l	1.0
Hierro	Fe	mg/l	5.0
Litio	Li	mg/l	2.5
Materia flotante	Visible	-	Ausencia
Manganeso	Mn	mg/l	0.2
Molibdeno	Mo	mg/l	0.01
Mercurio (total)	Hg	mg/l	0.001
Niquel	Ni	mg/l	0.2
Organosfosforados (totales)	Concentración de organosfosforados totales	mg/l	0.1
Organoclorados (totales)	Concentración de organoclorados totales	mg/l	0.2
Plata	Ag	mg/l	0.05
Potencial de hidrógeno	pH		6 - 9
Plomo	Pb	mg/l	0.05
Selenio	Se	mg/l	0.02
Sólidos disueltos totales		mg/l	3000.0
Transparencia de las aguas medidas con el disco secchi			mínimo 2.0 m
Vanadio	Visible	mg/l	0.1
Aceite y grasa	Sustancias solubles en hexano	mg/l	0.3
Coliformes Totales	nmp/100 ml		1000
Huevos de parásitos		Huevos por litro	cero
Zinc	Zn	mg/l	2

Fuente: libro 6_Anexo1_TULAS.

1.2.2 NORMATIVA DE COSTA RICA.

La Norma oficial de Costa Rica del Decreto N°33601-MINAE-S – 2007, reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales por el Poder Ejecutivo de la Presidencia de la Republica y el Ministerio de Ambiente y Energía y la Ministra de Salud.

Para efecto de esta norma oficial de Costa Rica se rinde los límites máximos permisibles para tres parámetros seleccionados, por tipo de actividad para aguas residuales vertidas en cuerpos receptores.

Tabla 2: Límites máximos permisibles, por tipo de actividad para aguas residuales vertidas en cuerpos receptores.

CIU	Actividad	Límite máximo permisible (mg/L)		
		DBO	DQO	SST
1210	Ganadería de vacas, ovejas, cabras, caballos, asnos, mulos, etc, ganadería lechera.	200	500	200

Fuente: “Norma oficial de Costa Rica N°33601-MINAE-S _2007. Reglamento de vertido y reúso de Aguas Residuales”.

CAPÍTULO 2:

SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA LA DEPURACIÓN DE DESECHOS ORGÁNICOS.

2.1 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL DE ORIGEN GANADERO.

El agua residual de origen ganadero es aquella en la que en su composición se encuentra materia orgánica como: estiércol, purines, paja y alimento del ganado confinado en establos. Además se encuentran presentes agentes patógenos (coliformes fecales), los mismos que han sido excretados en las heces y orina.

Para la caracterización del agua del establo en estudio se han tomado en cuenta aspectos físicos y biológicos, se debe recordar que cada agua residual es única en sus características, por lo que los parámetros deben evaluarse para cada agua residual específica. A continuación se expone un resumen de los valores obtenidos de las características principales del agua residual de origen ganadero.

2.1.1 ASPECTOS FÍSICOS:

Olor: Estas aguas residuales tienen un olor característico, generados por los gases volátiles que generan (CH_4) y por lo procesos de degradación de la materia orgánica, despidiendo un olor fecal y nauseabundo.

Sólidos en Suspensión: Las aguas residuales provenientes del lavado de establos presentan material orgánico en suspensión. De acuerdo a la densidad de estos sólidos y a

las características del medio receptor, esta materia se acumula o asienta en distintos sectores por donde el efluente pase, produciéndose así una contaminación mecánica.

Turbidez: La turbidez de un agua residual de origen ganadero se caracteriza por poseer materia orgánica suspendida finamente dividida por lo que el grado de turbidez de estas aguas se mide por la abundancia de dicho material suspendido.

Temperatura.- Influye directamente en el pH del agua y en la solubilidad de los gases, representa un parámetro de gran utilidad al momento de determinar los intercambios de temperatura de este y el medio externo.

pH.- Este parámetro mide la concentración de iones de hidrógeno presentes en el agua, El valor pH de un agua residual de origen ganadero medido antes de algún tratamiento dan como resultados un pH neutro.

2.1.2 ASPECTOS QUÍMICOS:

Demanda química de oxígeno (DQO): El parámetro de la DQO se utiliza para medir la cantidad de sustancias que pueden ser oxidadas por métodos químicos, estas sustancias se encuentran disueltas o en suspensión en el agua de la muestra. La DQO en un agua residual de origen ganadero tiende a mostrar un valor de 500 mg/l indicado en la normativa de Costa Rica. (Tabla 2)

Demanda biológica de oxígeno (DBO5): El parámetro de la DBO5 se utiliza para medir la cantidad de materia que puede ser consumida u oxidada por los medios biológicos que se encuentren presentes o disueltos en una cantidad de agua. La DBO es el parámetro más usado para medir la calidad de aguas residuales, para determinar la cantidad de oxígeno requerido para estabilizar biológicamente la materia orgánica del agua. En el

caso de un agua residual de origen ganadero la DBO tiende a mostrar valores de 200 mg/l valor indicado en la normativa de Costa Rica. (Tabla 2)

2.1.3 ASPECTO BIOLÓGICO:

Coliformes Totales: Las aguas residuales se encuentran compuestas por bacterias difíciles de identificar. Es así que en el caso del agua residual proveniente del establo se ha tomado como indicador de contaminación a los coliformes totales, o *como indicador de la existencia de organismos productores de enfermedad.*²

Se ha aislado colonias de coliformes totales (C.T) mediante cultivos realizados en placas petrifilm para conteo de C.T. durante un período de incubación de 48 horas a una temperatura de 37°C con lo que se puede monitorear la disminución de carga contaminante y la producción de gas metano, el mismo que se forma por acción de *E. Coli.*

2.2 PRINCIPIO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO ANAEROBIO.

La oxidación anaeróbica se define como aquella en que la descomposición se ejecuta en ausencia de oxígeno disuelto y se usa el oxígeno de compuestos orgánicos, nitratos y nitritos, los sulfatos y el CO₂.

2.2.1 SELECCIÓN DEL TRATAMIENTO.

Las aguas de lavado del establo no presentan tóxico alguno por lo que la producción de las bacterias presentes no corren peligro de sufrir una muerte prematura, lo que significaría un problema al momento de la obtención de biogás pues no habría presencia de coliformes.

² Romero J. 2008

Basándonos en el principio de transformación de la materia, en un biodigestor donde el tratamiento de las aguas residuales es anaerobio, la DQO, que es una medida indirecta de la concentración de materia orgánica del agua a tratar, se convierte en gas. Es así que, según (Flotats, 1997) la cantidad máxima de metano producible es de $0,35\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{KG}$ de DQO eliminada, en condiciones normales de presión y temperatura, y en unidades de energía primaria el mismo valor sería $3,5 \text{KW.h/kg}$ de DQO eliminada.

Así, se deduce que un sistema anaerobio es mucho más eficiente en la producción de energía en comparación a un sistema aerobio para los cuales el consumo de energía para transferir oxígeno se encuentra alrededor de 1KW.h/Kg de O_2 . El pH en el tratamiento de aguas residuales ganaderas al ser alcalino permite que estas se autorregulen sin necesidad de agregar CaCO_3 en el agua de tratamiento.

Los sistemas anaerobios son procesos fermentativos que liberan productos finales estables y una producción celular muy baja. Van Haandel y Lettinga (1994) argumentan que sólo el 3% de la materia orgánica presente en el agua residual es convertida en masa celular. El 97% remanente es convertido vía catabolismo en CH_4 y CO_2 como productos finales estables.

2.3 CARACTERÍSTICAS DE UN BIODIGESTOR ANAEROBIO.

Concepto.- Un biodigestor anaerobio es un sistema que consta principalmente de un depósito cerrado herméticamente en donde se recogen materia orgánica o aguas residuales.

Es un sistema ecológico que disminuye mediante un sistema anaerobio la presencia de bacterias y otros agentes patógenos que pueden transmitir enfermedades, a más de aprovechar el proceso anaerobio de las mismas bacterias para obtener biogás y bioabono como una forma de solventar la problemática energética-ambiental así como realizar un adecuado manejo de residuos.

2.3.1 CONDICIONES PARA LA BIODIGESTIÓN ANAEROBIA.

Las condiciones generales en un biodigestor anaerobio son las siguientes:

1. Temperatura entre los 20°C y 60°C
2. pH (nivel de acidez/ alcalinidad) alrededor de siete.
3. Ausencia de oxígeno.
4. Gran nivel de humedad.
5. Materia orgánica.

2.3.2 ESTRUCTURA GENERAL DE UN BIODIGESTOR.

Zona de recepción de la carga orgánica: Lugar por donde ingresa hacia el reactor la materia orgánica que va a ser tratada.

Tanque de digestión o reactor: En este tanque la materia orgánica de acuerdo al tiempo de retención necesario será degradada hasta producir bioabono y biogás.

Zona de salida de bioabono: Lugar en el que se recoge el producto final de la digestión anteriormente retenido en el reactor.

Válvula de salida de gas: Se encuentra en la parte superior del tanque de digestión y se encarga de guiar la salida de metano (CH₄), producido por la degradación de la materia orgánica y la actividad metanogénica de las bacterias.

2.3.3 CLASIFICACIÓN DE LOS BIODIGESTORES ANAEROBIOS.

Los biodigestores se clasifican de acuerdo a dos aspectos:

- * Régimen de carga.
- * Dirección del flujo en el interior del reactor.

Los sistemas de digestión anaerobio se dividen según sus clasificaciones, a continuación ver la tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de los biodigestores.

ELEMENTOS	CLASIFICACIÓN	TIPOS	CARACTERÍSTICAS
Régimen de carga	<i>Flujo continuo</i>	Biodigestor de dos etapas	Son los que reciben su carga por medio de una bomba, el cual se lo realiza de manera continua.
		Biodigestor para digestión anaeróbica seca	
	<i>Flujo semi-continuo</i>	Tipo Hindú (domo móvil)	Son los que reciben una carga fija de materia prima cada día siendo su efluente, la misma cantidad que el de la carga de entrada.
		Tipo Chino (domo fijo)	
Biodigestor Horizontal			
<i>Flujo discontinuo o estacionario</i>		Son los que se cargan una sola vez y de acuerdo al tiempo de retención estimado, se vacían completamente.	
Dirección del flujo en el interior del reactor	<i>Flujo Horizontal</i>	Plug Flow	Consisten en una bolsa sellada herméticamente, este opera como un digestor de domo fijo, por lo cual el costo de construcción es bajo, aunque la presión es muy baja.
	<i>Flujo ascendente</i>	Tipo lote	El proceso de carga se lo realiza desde el fondo del recipiente principal por medio de canales y fluye hacia la parte superior por efecto de la densidad de los sólidos del sustrato.
	<i>Biodigestores completamente mezclados</i>		Aquí el sustrato es mezclado completamente por medio de unas paletas internas. Su tiempo de retención oscila entre 10 a 30 días y son aplicables para residuos de alto contenido de sólidos totales.

Fuente: Los autores.

2.4 PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.

En la actualidad la contaminación de aguas residuales como la quema de combustibles fósiles ha provocado el deterioro del medio ambiente, por lo que en muchos países del mundo se han puesto en marcha políticas para mitigar las afecciones ambientales, uno de los métodos utilizados es la aplicación de la digestión anaerobia con lo que se mejora la disposición de desechos, se depura las aguas residuales y se aprovecha la energía producto de la degradación de la materia orgánica, a más de eso, el proceso de digestión anaerobia tiene algunas resultantes como el bioabono y el biogás.

El proceso de digestión anaerobio no es un proceso nuevo, pues ha sido usado para el beneficio del hombre durante siglos, para la obtención de metanol, ácido láctico, el curtido del cuero, etc.

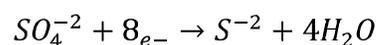
2.4.1 RESPIRACIÓN ANAEROBIA.

Durante el proceso de respiración anaerobia los microorganismos no utilizan el oxígeno como sustancia oxidante, es decir que el receptor final de electrones no es el oxígeno por lo que usan un sulfato o un nitrato, entonces, las moléculas que se consumen para realizar este tipo de respiración son la glucosa, los aminoácidos, y ácidos grasos.

2.4.1.1 Sulfato como receptor de electrones.

La habilidad de utilizar el sulfato como receptor de electrones es muy raro, sólo un determinado grupo de microorganismos lo usa, entre los que están el *Clostridium* y el género de *Desulfovivrio*.

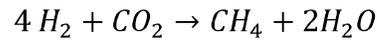
Todas estas bacterias al ser anaerobias reducen el nitrato por lo que no está en su metabolismo reducir el sulfato.



2.4.1.2 Dióxido de carbono como receptor de electrones.

Un pequeño grupo usa el dióxido de carbono como receptor de electrones, en especial las bacterias *arqueas* que son productoras de metano.

En este caso la producción de energía se da por una simple oxidación de hidrógeno molecular.



2.4.1.3 Características de dos organismos anaerobios.

Existen dos tipos de organismos anaerobios, los facultativos y los estrictos, estos últimos mueren inmediatamente cuando tienen contacto con el oxígeno y se encuentran en lugares donde no es accesible el O₂ por ejemplo, en las profundidades del mar y la tierra, y en especial en el intestino de algunos animales rumiantes y de los seres humanos.

Los anaerobios facultativos son los que no mueren si se encuentran en presencia de oxígeno, es decir, realizan una respiración aerobia. La mayoría de estos organismos son usados para los distintos procesos de fermentación, como en la producción de vino, quesos, yogurt, cerveza, etc.

2.5 PROCESO MICROBIOLÓGICO Y BIOQUÍMICO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.

En la digestión anaerobia ocurre un proceso complejo de reacciones bioquímicas que se dan por la presencia de los diferentes microorganismos que se encuentran presentes.

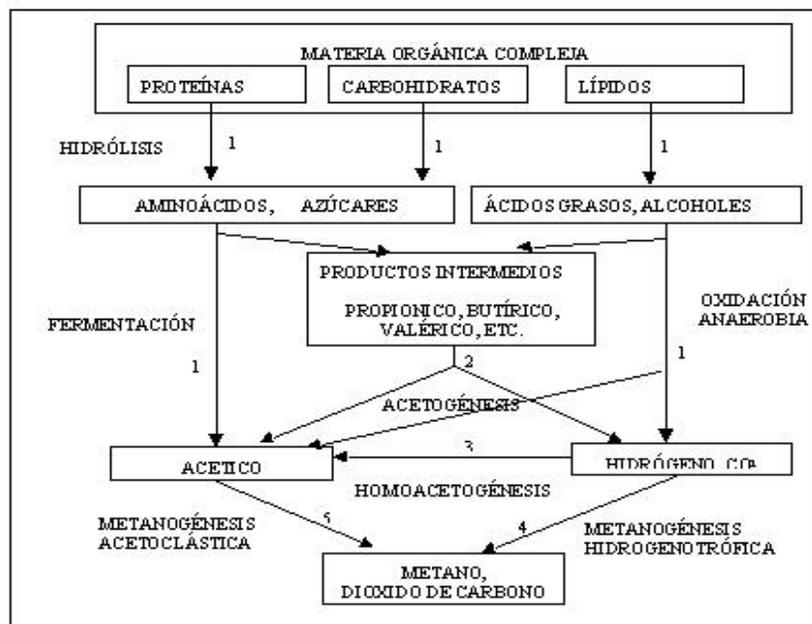
Como se dijo anteriormente el uso del proceso de digestión anaerobia no es nuevo, por lo que existen muchos estudios del proceso microbiológico y bioquímico de la digestión anaerobia de la materia orgánica, de tal manera que se han dividido en cuatro fases, dependiendo del proceso de mineralización de la materia orgánica que se lleva a cabo por las diferentes bacterias presentes y que se relacionan entre ellas.

Las 4 fases o procesos son:

- 1) Hidrólisis
- 2) Etapa fermentativa o acidogénica
- 3) Etapa acetogénica
- 4) Etapa metanogénica

En la siguiente figura se presentan los diferentes procesos o etapas de las que está compuesta la digestión anaerobia, así como sus productos intermedios y los microorganismos relacionados.

Ilustración 4: Procesos anaerobios.



Fuente: Phosphourus Precipitation in Anaerobic Digestion Process, Nuria Martí Ortega.

En el esquema de las reacciones de la digestión anaerobia de materiales polímeros.

Los números indican la población de bacteria responsable del proceso: 1; bacterias fermentativas, 2; bacterias acetogénicas que producen hidrógeno, 3; bacterias

homoacetogénicas, 4; bacterias metanogénicas hidrogenotróficas, 5; bacterias metanogénicas acetoclásticas.

2.5.1 HIDRÓLISIS.

El primer paso para la digestión anaerobia es la hidrólisis, tomando en cuenta que los microorganismos se alimentan a través de la pared celular, estos no pueden utilizar la materia orgánica polimérica sin que antes se hidrolicen, es decir que se conviertan en compuestos solubles o monómeros, y así poder atravesar la pared celular.

El proceso de la hidrólisis en donde se obtiene los sustratos orgánicos para la digestión anaerobia, este proceso de la transformación de las moléculas complejas a monómeros es realizado por enzimas extracelulares, producidas por ciertos microorganismos hidrolíticos, en especial las bacterias fermentativas.

“La etapa hidrolítica puede ser la etapa limitante de la velocidad del proceso global, sobre todo tratando residuos con alto contenido en sólidos. Incluso en casos donde las fases acidogénicas o metanogénicas son consideradas como pasos limitantes, la hidrólisis puede afectar el conjunto del proceso” (Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991).³

El nivel de la hidrólisis y la velocidad con la que se da este proceso depende de varios factores, como son: la temperatura, el pH, la concentración de biomasa hidrolítica, el tiempo de retención, del tamaño de las partículas y de la concentración del sustrato.

Existen tres tipos de macromoléculas de las cuales está compuesto todo sustrato y son: hidratos de carbono, lípidos y proteínas. La hidrólisis de cada uno de estos compuestos las realiza diferentes grupos enzimáticos.

³ Fuente. Phosphorous Precipitation in Anaerobic Digestion Process, Nuria Martí Ortega.

Los aminoácidos derivados de la hidrólisis de las proteínas tienen un gran valor nutricional en la digestión anaerobia ya que son fuente de carbono y energía.

2.5.1.1 Las proteínas.

Son hidrolizadas en péptidos y aminoácidos por las enzimas llamadas proteasas, sólo parte de estos aminoácidos son usados por los microorganismos, el resto son eliminados en etapas posteriores del proceso en forma de ácidos grasos volátiles, dióxido de carbono, hidrógeno, amoníaco y sulfato.

En los ambientes anaerobios la degradación de los lípidos inicia con la acción de unas enzimas hidrolíticas llamadas lipasas, que rompen las grasas produciendo ácidos grasos de cadena larga y moléculas de glicerol.

El proceso de hidrólisis puede tener una etapa limitante debido a la lenta degradación de los materiales lignocelulósicos, los cuales están compuestos principalmente por lignina, hemicelulosa y celulosa. Esto se debe a que la lignina es resistente a la degradación por parte de los microorganismos anaerobios lo cual afecta a la degradación de la celulosa, la hemicelulosa y de algunos otros hidratos de carbono.

De la celulosa se obtienen productos como la celobiasa y la glucosa, en cambio de la hemicelulosa se producen pentosas, hexosas y ácidos urónicos.

La hidrólisis se puede ver alterada debido a la presencia de algún compuesto que pueda ser tóxico o inhibidor de la población bacteriana responsable de la producción de enzimas extracelulares.

2.5.2 ETAPA FERMENTATIVA O ACIDOGÉNICA.

Las bacterias metanogénicas no pueden utilizar directamente las moléculas orgánicas solubles, por lo cual estas moléculas pasan por un proceso fermentativo por la acción de varios organismos, dando como resultado ácido acético, ácido fórmico, H₂ y muchos compuestos orgánicos más reducidos como el ácido propiónico, ácido butírico, ácido calérico, ácido láctico y principalmente etanol, que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas a sustratos que puedan utilizar las metanogénicas.

Dependiendo del consumo de H₂ por parte de las bacterias que lo utilizan, varía las proporciones de los productos de la fermentación.

2.5.2.1 Fermentación de carbohidratos solubles.

En los sistemas anaerobios los principales productos que proporciona la ruta de degradación de la glucosa son los ácidos grasos volátiles, H₂ y CO₂.

Las condiciones y la duración de la fermentación están relacionadas con la proporción de los diversos productos, siendo los mayoritarios el ácido butírico y el acético, si es que el pH se mantiene alcalino.

2.5.2.2 Fermentación de aminoácidos.

En la fermentación de aminoácidos y de otras moléculas hidrogenadas se obtiene como principal producto ácidos grasos de cadena corta. En general la fermentación de los aminoácidos se considera un proceso rápido que no limita la velocidad de degradación de los compuestos proteínicos.

Los aminoácidos pueden generalmente ser fermentados por microorganismos del género clostridium, de lo cual se obtiene como resultado de la oxidación NH₃, CO₂, y ácido carboxílico con un átomo de carbono menos que el aminoácido oxidado.

2.5.2.3 Oxidación anaerobia de ácidos grasos de cadena larga.

Mediante el mecanismo de β -oxidación los ácidos grasos de cadena larga son oxidados a ácidos grasos de cadena corta y a través de la pared celular los ácidos grasos libres son introducidos para ser transformados en el correspondiente tio-éster-CoA.

La β -oxidación es un ciclo espiral que va liberando un acetil-CoA en cada bucle, produciendo principalmente ácido acético.

Este mecanismo es muy desfavorable termodinámicamente, y muy dependiente a las presión parcial del hidrógeno en condiciones anaerobias, por lo que es de gran importancia la acción simbiótica de los microorganismos consumidores de hidrógeno.

2.5.3 ETAPA ACETOGÉNICA.

Una vez realizada la fermentación algunos productos pueden ser metabolizados directamente por los microorganismos metanogénicos (H_2 y Acético), otros en cambio como el etanol, ácidos grasos volátiles como el valeriato, butirato, propionato, etc. y algunos aromáticos deben ser transformados en productos más sencillos, mediante la función de las bacterias acetogénicas.

2.5.4 ETAPA METANOGÉNICA

Esta es la última etapa del proceso de digestión anaerobia y se puede considerar que es la más importante, ya que los microorganismos metanogénicos son los responsables de la formación del metano y eliminan del medio los productos de los grupos anteriores.

Las bacterias metanogénicas forman el metano a partir de sustratos mono-carbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente, como son : el acetato, H_2 , CO_2 , formiato, metanol, y algunas metil-aminas.

Los organismos metanogénicos se clasifican dentro del dominio de Archaea, y tienen características comunes como que poseen varias enzimas especiales, que hacen que se diferencien del resto de procariotas.

La coenzima M, es la que participa en el paso final de la formación de metano.

En función al sustrato principal se pueden establecer dos grandes grupos de microorganismos:

- Los hidrogenotróficos: Consumen el hidrógeno y el ácido fórmico.
- Los metilotróficos o acetoclásticos: Consumen metilos del acetato, metanol y algunas aminas.

Ilustración 5: Reacciones metanogénicas.

<i>Reacciones hidrogenotróficas</i>	ΔG^0 (KJ)
$4H_2 + H^+ + 2HCO_3^- \rightarrow \text{Acetato} + 4H_2O$	-104.6
$4H_2 + 4S^0 \rightarrow 4HS^- + 4H^+$	-112
$4H_2 + 2HCO_3^- + H^+ \rightarrow CH_4 + 3H_2O$	-135.6
$4H_2 + 4SO_4^{2-} + H^+ \rightarrow HS^- + 4H_2O$	-151.9
$4H_2 + 4\text{fumarato} \rightarrow 4\text{succinato}$	-344.6
$4H_2 + NO_3^- + 2H^+ \rightarrow NH_4^+ + 3H_2O$	-599.6
<i>Interconversión formato-hidrógeno</i>	
$H_2 + HCO_3^- \rightarrow \text{formato} + H_2O$	-1.3
<i>Metanogénesis acetoclástica</i>	
$\text{Acetato} + H_2O \rightarrow HCO_3^- + CH_4$	-31.0
<i>Metanogénesis a partir de otros sustratos</i>	
<i>Formico</i>	
$4HCOOH \rightarrow CH_4 + 3CO_2 + 2H_2O$	
<i>Metanol</i>	
$4CH_3OH \rightarrow 3CH_4 + CO_2 + 2H_2O$	
<i>Trietil-amoniaco</i>	
$4(CH_3)_3N + 6H_2O \rightarrow 9CH_4 + 3CO_2 + 4NH_3$	
<i>Di-etil-amoniaco</i>	
$2(CH_3)_2NH + 2H_2O \rightarrow 3CH_4 + CO_2 + 2NH_3$	
<i>Monometil-amoniaco</i>	
$4(CH_3)NH_2 + 2H_2O \rightarrow 3CH_4 + CO_2 + 4NH_3$	

Fuente: Principales reacciones metanogénicas y otras consumidoras de hidrógeno, (adaptada de Stams, 1994 y Fergusson et al., 1987).

Aproximadamente el 70% del metano que se produce en los reactores anaeróbicos se forma a partir del acetato.

2.6 PRODUCTOS DEL PROCESO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.

2.6.1 BIOABONO.

El Bioabono es uno de los resultandos o productos de la digestión anaerobia de la materia orgánica.

Durante la fermentación del agua residual depositada en el biodigestor a partir de las bacterias metanogénicas, se obtiene como un residuo líquido lo que es denominado como BIOABONO.

El BIOABONO es un producto que está constituido por sólidos disueltos y agua, conservando un 0,5 a 1,5% de sólidos en suspensión.

En Ecuador se ha promovido mucho la producción de bioabono como fertilizante orgánico para uso agrícola, existiendo diferentes métodos para su elaboración, dependiendo la materia orgánica, la zona donde se encuentra (sierra o costa), etc.

El Biorgánico es considerado un excelente abono orgánico, debido a que es una fuente de fitorreguladores. Por lo que es capaz de promover y estimular el desarrollo de la plantas, y se lo utiliza para diferentes procesos agronómicos, como son:

- Enraizamiento, es el aumento y el fortalecimiento de la base radicular.
- Acción sobre el follaje, amplía la base follar.
- Mejora la floración y activa el vigor y el poder germinativo de las semillas, lo que da como resultado un aumento en las cosechas.

2.6.1.1 Composición

En este proyecto como se explica con anterioridad se toma el agua del lavado del establo para realizar la puesta en marcha del biodigestor, por lo que no se puede saber un valor exacto entre la relación de desechos orgánicos y agua, por lo que a continuación se muestra una tabla en la que expresa la composición química de un biorgánico promedio.

Tabla 4: Composición bioquímica del biorgánico proveniente del estiércol (BE) y de estiércol + alfalfa (BEA). /Medina, V.A. y Solari, E, G. 1990.

<i>COMPONENTE</i>	<i>u</i>	<i>BE</i>	<i>BEA</i>
Sólidos totales	%	5,6	9,9
Materia orgánica	%	38,0	41,1
Fibra	%	20,0	26,2
Nitrógeno	%	1,6	2,7
Fosforo	%	0,2	0,3
Potasio	%	1,5	2,1
Calcio	%	0,2	0,4
Azufre	%	0,2	0,2
Ácido Indol Acético	ng/g	12,0	67,1
Giberelinas	ng/g	9,7	20,5
Purinas	ng/g	9,3	24,4
Tiamina (B1)	ng/g	187,5	302,6
Riboflavina(B2)	ng/g	83,3	210,1
Piridoxina(B6)	ng/g	33,1	110,7
Ácido Nicotínico	ng/g	10,8	35,8
Ácido Fólico	ng/g	14,2	45,6
Cisteina	ng/g	9,2	27,4
Triptofano	ng/g	56,6	127,1

Fuente: Agricultura Orgánica. Manuel Suquilanda.

2.6.1.2 Relación carbono - nitrógeno

Para el desarrollo de los microorganismos que se encargan de la descomposición de la materia orgánica, se requiere ciertas cantidades de carbono que lo utilizan como fuente de energía y de nitrógeno que lo utilizan en su propia estructura celular.

Los microorganismos que son los encargados de la degradación orgánica, utilizan una relación de C/N de entre 20:1 a 30:1 respectivamente.

En la tabla a continuación se puede observar la relación carbono/nitrógeno dependiendo del origen de la materia orgánica, ya sea de origen vegetal o animal, que se utilizan para la obtención de biogás y biorgánico.

Tabla 5: Relación carbono – nitrógeno de acuerdo al origen de materia orgánica.

MATERIALES	CARBONO % de peso total	NITRÓGENO % de peso total	RELACIÓN C/N
Panca de Arroz	42	0,63	67:1
Caña de maíz	40	0,75	53:1
Tallos de soya	41	1,3	32:1
<i>Estiércol de bovino fresco</i>	7,3	0,29	25:1
Estiércol de ovino fresco	16	0,55	29:1
Estiércol de equino fresco	10	0,42	24:1
Estiércol de porcino fresco	7,3	0,6	13:1
Alfalfa	35	2,9	12:1

Fuente: Agricultura Orgánica, Manuel Sunquilanda.

2.6.2 BIOGÁS

Al igual que el bioabono el biogás es un producto de la digestión anaerobia de la materia orgánica, el biogás es un producto de la acción de ciertas bacterias, en especial las bacterias *metanogénicas*.

El biogás es llamado también gas de los pantanos, ya que en los pantanos existe una degradación de materia orgánica natural, además es una gran alternativa como biocombustible, y se lo considera como una energía renovable que está siendo utilizado para diferentes procesos productivos en especial en granjas integrales.

2.6.2.1 Composición.

El biogás está compuesto por diferentes gases, entre los principales se destacan el metano (CH₄) y el dióxido de carbono (CO₂), claro que esto varía dependiendo la biomasa que se utiliza. El metano es el gas predominante.

Los compuestos más destacados son:

Tabla 6: Compuestos del biogás

COMPUESTO	%	FORMULA
Metano	40-70	CH ₄
Dioxido de carbono	30-60	CO ₂
Sulfuro de hidrogeno	0-3	H ₂ S
Hidrogeno	0-1	H

Fuente: Manual para la producción de biogás de Ing. A. M. Sc. Jorge A. Hilbert.

A continuación se expone un cuadro que determina el porcentaje de metano que se produce dependiendo el origen del estiércol que se utiliza. (Tabla 7).

Tabla 7: Porcentaje de producción de metano según la materia orgánica.

ESPECIE	PESO VIVO	kg ESTIERCOL /DIA	% METANO
Cerdos	50	4,5-6	65-70
Vacunos	400	25-40	65
Equinos	450	13-16	65
Ovinos	45	2,5	63
Aves	1,5	0,06	60
Caprinos	40	1,5	--

Fuente: Manual para la producción de biogás, Ing. A. M. Sc. Jorge A. Hilbert.

2.6.2.2 Sistema de depuración de biogás.

El biogás obtenido se utiliza como combustible, de esta manera se realiza un tratamiento de purificación del mismo; se purifica el biogás a través de los filtro encargado de disminuir la concentración de ácido sulfhídrico y de dióxido de carbono.

Purificación de ácido sulfhídrico: se filtra a través de limadura o viruta metálica.

Purificación de dióxido de carbono: por el método de burbujeo se disminuye su concentración utilizando una solución de hidróxido de sodio (*NaOH*).

CAPITULO 3:

DISEÑO DEL BIODIGESTOR Y SUS COMPONENTES.

3.1 DISEÑO DEL BIODIGESTOR.

En función del tipo de aguas residuales que genera la granja y del clima de la zona, se ha seleccionado la implementación de un biodigestor de flujo discontinuo, con la finalidad de disminuir la carga contaminante del efluente del establo para lo cual se ha considerado los siguientes criterios de diseño.

3.1.1 Topografía del área de construcción.

Se realizó un levantamiento topográfico del área de estudio, proceso que se lleva a cabo utilizando una estación total, reflector y GPS, para obtener las respectivas mediciones, y las nivelaciones geométricas de los perfiles longitudinales, con lo cual se determina una ganancia de pendiente del 4.32% en el terreno para la construcción de las distintas fases de la estructura del biodigestor, de esta manera se hizo el diseño respectivo⁴.

Ilustración 6: Reconocimiento del terreno antes de la construcción.



Fuente: Los autores.

⁴ Ver anexo III, previos diseños se muestran en los respectivos planos.

3.1.2 Tipo de geomembrana:

Las geomembranas se definen como un recubrimiento o barrera de muy baja permeabilidad usada con cualquier tipo de material relacionado y aplicado para controlar la migración de fluidos. En este caso la geomembrana se encuentra sellada térmicamente en forma de un tubo la cual se utiliza para evitar la pérdida de las aguas residuales a tratarse.

Características:

- Alta impermeabilización: lámina de PVC
- Larga vida útil
- Durabilidad y resistencia, al ser fabricada para contrarrestar los rayos ultravioletas
- El gas metano no se fuga del sistema de sellado
- Alta fuerza de tensión y resistencia química.
- Excelente rigidez

Dimensiones:

- Espesor: 0,750 mm
- Largo: 1,50 m
- Diámetro: 0,80 m
- Volumen: 750 cm³

3.1.3 Volumen de carga necesaria para la biodigestión.

El modelo de la geomembrana sellada térmicamente es cilíndrico, por lo tanto su funcionamiento se caracteriza por ser un biodigestor de Flujo Horizontal, o Plug Flow.

La carga según este modelo de biodigestor, indica que un 75% del volumen debe ser ocupado por las aguas residuales a tratar y el 25% restante será el espacio necesario para que sea ocupado por el metano, producto de la acción metanogénica.

3.1.4 Caudal del efluente y sedimentación de sólidos suspendidos.

El efluente es la cantidad del fluido de descarga que se genera luego del lavado del establo, en función del tiempo. El caudal medido antes de recoger el agua residual para llenar la geomembrana es de 0,76 litros/segundo.

En cuanto a la sedimentación, se determinó por filtración la cantidad de materia orgánica presente en el agua, el total es de 9500 gramos en 500 litros de agua del lavado del establo.

Conocidos estos dos parámetros, se considera utilizar un tubo de PVC de sección circular de 4 pulgadas de diámetro, así se evita la sedimentación de la materia orgánica sin tener pérdidas o posibles filtraciones del agua residual.

3.1.5 Tiempo de retención.

La temperatura ambiente es la que indica el tiempo de retención necesaria para que el proceso de degradación de la materia orgánica retenida dentro de la geomembrana, sea la necesaria. Para este sistema se ha considerado un tiempo de retención de 30 días, por carga; debido a que la temperatura promedio del sector es de 18°C alcanzando picos de hasta 25°C durante el día.

3.2 DIMENSIONAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN

El proceso de construcción se realizará en 4 fases:

3.2.1 FASE DE CAPTACIÓN.

a) Levantamiento topográfico y construcción del canal de captación

En esta fase se tiene como finalidad dirigir el efluente del establo hacia el tanque de carga, para lo cual se construye un nuevo canal, dirigido hacia el tanque de carga de acuerdo a la pendiente del canal principal del establo.

Ilustración 7: Levantamiento topográfico del canal de captación



Fuente: Los autores.

Una vez hecho el levantamiento topográfico, se procede a la construcción del nuevo canal, construyendo un replantillo de concreto donde se asentará el tanque de carga.

Ilustración 8: Construcción del canal de captación y replanteamiento.



Fuente: Los autores.

b) Tanque de carga:

El tanque de carga permite almacenar el sustrato antes del tratamiento anaerobio que se da en el biodigestor, cuyo propósito es tener la suficiente capacidad de almacenamiento en caso de presentarse cualquier inconveniente con el digestor u otro componente del sistema.

Para ello hemos colocado un tanque rectangular de polietileno de fabricación PLASTIGAMA; la misma tiene una capacidad total de 555 lt.

Sus dimensiones son: 1090 mm de ancho, 1250 mm de largo y 620 mm de altura, esta última, favorece al grado de pendiente de cada etapa de construcción, para una mejor captación de las aguas residuales.

Ilustración 9: Tanque de carga.



Fuente: Los autores

c) Sistema de tubería para captación

Con el nuevo canal abierto, se acopla un tubo de PVC de 4" que evita la sedimentación de sólidos y que conecta al canal principal del establo con el tanque de carga.

Ilustración 10: Canal, tubería y tanque de captación



Fuente: Los autores

3.2.3 FASE DE CARGA.

a) Sistema de alimentación.

El sistema de carga es aquel encargado de alimentar el biodigestor con el agua residual almacenada en el tanque de captación. Los implementos necesarios son los siguientes:

Tabla 8: Elementos: sistema de alimentación.

ítem	Accesorios	Cantidad	Descripción
1	Válvula compuerta de 4 "	1	Cierra el paso de agua hasta almacenar el volumen requerido en el tanque de captación.
2	Tubo PVC de 4" x 6,42 m. de largo	1	Alimenta al biodigestor una vez abierta la válvula de paso.
3	Neplo de 4 "	1	Se acopla entre el tanque y la válvula compuerta.
4	Adaptador macho de 4"	2	Se acopla en la válvula de paso y asegura la fuga de agua.
5	Solución pega tubo	1	Pegamento especial para unir el neplo con el tanque de captación

Fuente: Los autores.

Ilustración 11: Sistema de alimentación.



Fuente: Los autores.

3.2.4 FASE DE BIODIGESTIÓN.

a) Construcción de la base de concreto en media luna.

La construcción de la base de concreto en media luna, se la realiza levantando las mediciones topográficas de acuerdo a la línea de alimentación que tiene la fase 2 y a las dimensiones de la geomembrana sellada cilíndricamente. Las funciones de esta construcción es la de servir de soporte al biodigestor una vez cargado de agua residual, además de servir de protección para alejar a la geomembrana de cualquier objeto punzante y facilitar el acoplamiento de los sistemas restantes. Para esta etapa se utilizó los siguientes implementos de construcción:

Tabla 9: Implementos de construcción.

MATERIALES
Arena Fina
Arena Gruesa
Piedra
Bloques
Cemento
Tablas

Fuente: Los autores.

Ilustración 12: Construcción del encofrado inicial.



Fuente: Los autores.

Ilustración 13: Enlucido de la base de concreto.



Fuente: Los autores.

Ilustración 14: Base de concreto concluida.



Fuente: Los autores.

b) Construcción de la estructura externa.

Se procedió a realizar la construcción de esta estructura para evitar que las inclemencias del clima malogren el estado de la base de hormigón, además de que al tratarse de una

estructura metálica que requería el uso de suelda con electrodos debía ser construido antes de colocar la geomembrana pues las chispas al momento de soldar podrían perforarla. Los implementos que se utilizaron fueron:

Tabla 10: Implementos construcción externa.

Cemento: para fundir las bases de la estructura
Arena: para fundir las bases de la estructura
Piedra: para fundir las bases de la estructura
Tubos galvanizados de 2 pulgadas
Planchas de zinc para el techo
Bisagras para la puerta de ingreso
Electrodos para soldar la estructura
Ganchos para sujetar las planchas de zinc
Malla para cerramiento electro-soldada corrugada

Fuente: Los autores.

Ilustración 15: Estructura metálica inicial con tubos galvanizados.



Fuente: Los autores.

Ilustración 16: Ubicación de la malla y del techo.



Fuente: Los autores.

Ilustración 17: Estructura metálica concluida.



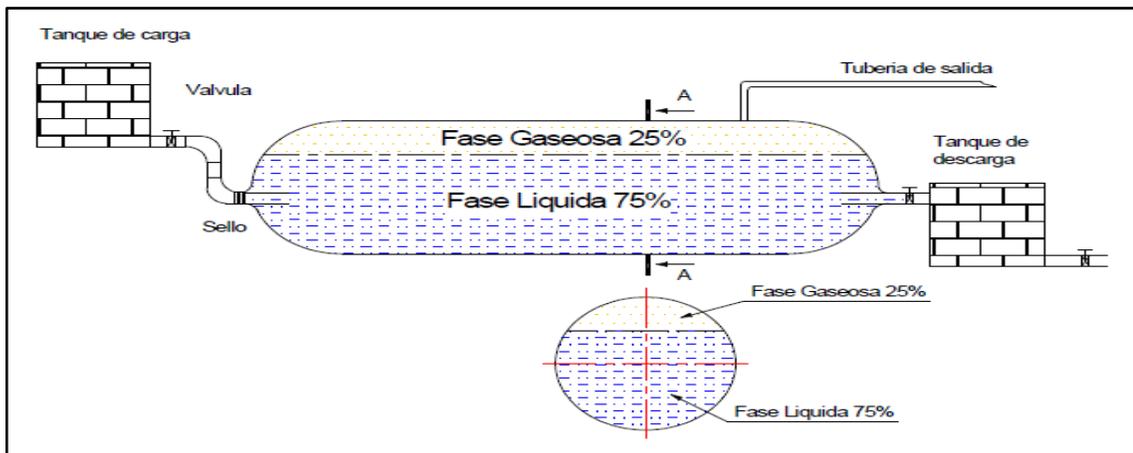
Fuente: Los autores.

c) Emplazamiento del biodigestor.

Una vez terminadas las estructuras principales se procede a emplazar la geomembrana. El volumen del biodigestor es de 750 litros, considerando que sus características son de

un digestor tipo Plug Flow, se indica que el 75% del volumen de la geomembrana que actúa como reactor debe estar ocupada por el componente líquido a degradar, y el 25% del volumen restante servirá como campana o gasómetro que será ocupado por el metano que se produzca durante la degradación.

Ilustración 18: Esquema general de un digestor de flujo horizontal tipo Plug Flow.



Fuente: Chungandro, Kleber; 2010.⁵

Así tenemos los elementos básicos a utilizar en esta etapa:

Tabla 11: Elementos para el biodigestor.

Geomembrana de PVC	Trabaja como Biodigestor
1 codo de 4"	Se acopla con la abertura de alimentación
2 bridas de alta presión de 4"	Soportes para la entrada y salida del biodigestor
Adaptadores Plásticos para tubería de 4"	Acopla la llave de paso con la brida
Llave de Paso de 4" de Bronce	Sirve como desfogue del Bioabono

Fuente: Los autores

⁵ Diseño y construcción de un biodigestor para pequeñas y medianas granjas; CHUNGANDRO, Kleber.

Entonces, la geomembrana debe tener tres aberturas para que se acople al sistema, así:

* **Abertura de alimentación:** Lugar por donde ingresan las aguas residuales hacia el biodigestor, este cuenta con una brida de 4 pulgadas, fabricado en material altamente resistente a la presión y adaptado al tubo de alimentación de PVC. Las bridas brindan un soporte de ayuda a la geomembrana para evitar que el peso de 500 litros de agua maltrate al biodigestor.

Ilustración 19: Brida de presión.



Fuente: Los autores.

* **Abertura de descarga:** Consta de una brida y un adaptador de 4” para que se acople a una llave de paso de bronce de 4”. Este sirve como conducto de descarga del bioabono que se obtiene luego del proceso de digestión anaerobia.

Ilustración 20: Sistema de descarga del biodigestor.



Fuente: Los autores.

* *Abertura superior*: Es el más pequeño, sirve como vía de escape del metano hacia el sistema de purificación de gas.

Ilustración 21: Orificio con acople de tuberías para gas de ½”.



Fuente: Los autores.

d) Zona de descarga.

Se hace referencia a la zona donde se receipta el producto de la digestión anaerobia, el mismo que va empotrado en el suelo para la posterior ubicación del tanque de PVC.

Ilustración 22: Tanque de descarga



Fuente: Los autores.

e) Carga del biodigestor con agua de lavado del establo.

El cálculo del volumen de la geomembrana se lo realiza tomando en cuenta las dimensiones de ésta, así, el diámetro es de 0,80 m. y 1.50 m. de largo, para lo cual aplicamos la fórmula del volumen de un cilindro, así:

Tabla 12: Fórmula del volumen de la geomembrana.

Fórmula	Nomenclatura
$V_D = \pi r^2 h$	$V_D =$ Volumen de la Geomembrana
$V_D = \pi 0.40^2 1.50$	$r^2 =$ Radio del Digestor
$V_D = 0.753 \text{ m}^3$	$h =$ Largo del Digestor

Fuente: Los autores.

Ahora, con un volumen de 753 m^3 , calculamos la cantidad de agua residual que debe ser cargada en la geomembrana. Los parámetros de diseño indican que debe ser del 75% entonces:

$$\begin{aligned} \text{el } 75\% \text{ de } 753 \text{ m}^3 \text{ es } &= 0,75 \times 753 = 564,75 \text{ m}^3, \\ \text{el } 25\% \text{ restante debe encontrarse libre de agua} \end{aligned}$$

Ilustración 23: Biodigestor cargado.



Fuente: Los autores.

3.2.4 FASE DE CAPTACIÓN DE BIOGÁS

a) Instalación de la tubería

Sistema por el cual se capta el metano producido durante la degradación de la materia orgánica y la actividad metanogénica de las bacterias.

Tabla 13: Accesorios para la instalación del sistema.

Tubería plástica de ½ pulgada	Sección por donde se transporta el gas
Acoples y codos de ½ pulgada	Facilita la unión de las tuberías
Válvulas de corte	Permiten el control de salida del gas hasta que la producción sea la óptima para extraerlo.
Bushing de ¼ de pulgada	Permite controlar el exceso de metano en el biodigestor
Manguera de ¼ de pulgada para gas	Facilita la conexión a dispositivos de almacenamiento de gas.

Fuente: Los autores.

Ilustración 24: Tubería acoplada a la abertura de 1/2 pulgada para captar CH₄



Fuente: Los autores.

b) Purificación de biogás.

El metano es un gas que en su composición tiene CO₂ y H₂S contaminantes que afectan al medio ambiente, de tal forma que se acoplan dos filtros al sistema de tuberías de gas. En estos filtros, cada uno está cargado con una dosificación de Sosa Cáustica con una dilución al 5% y el segundo filtro contiene limadura de hierro para eliminar el CO₂ y el H₂S respectivamente.

Ilustración 25: Filtros de purificación.



Fuente: Los autores.

Ilustración 26: Filtros colocados en el sistema de biogás.



Fuente: Los autores

c) Almacenamiento y quema de biogás.

Una vez que ha pasado a través de los filtros el metano puede ser almacenado tanto en cilindros de gas como en neumáticos y posteriormente utilizar el gas en lo que se considere necesario.

En este caso se ha considerado almacenar en un neumático, el mismo que se lo puede trasladar con facilidad una vez que esté cargado de biogás.

Ilustración 27: Almacenamiento de biogás.



Fuente: Los autores.

Ilustración 28: Quema de biogás puro.



Fuente: Los autores.

CAPÍTULO 4:

PRUEBAS EXPERIMENTALES DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

Las pruebas experimentales se realizaron con el fin de ejecutar el montaje y puesta en marcha del sistema de digestión anaerobia para propiciar el tratamiento de la descarga orgánica del sistema de tratamiento propuesto y así verificar las condiciones de operación del biodigestor de flujo discontinuo.

El proceso metodológico para la experimentación que se realizó, fue de tres tratamiento para lo cual, siguiendo el proceso de degradación anaerobia será considerado un tiempo de retención de 25 días, tomando en cuenta al día “0” como testigo; por cada período de toma de la muestra, es decir, cada cinco días se miden los parámetros principales: DBO5, DQO y Coliformes Totales; y los parámetros de monitoreo: pH, T° y ST.

4.1 PROCEDIMIENTO

Para ejecutar los análisis, se utilizó un termómetro de bulbo de mercurio y cintas de pH para observar si el agua se mantenía neutra.

El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Captación y almacenamiento del agua del lavado del establo
- Recolección de la muestra de agua para el día cero.
- Alimentación del Biodigestor; el proceso de digestión anaerobia arranca desde el día cero.
- Toma de muestras y verificación del pH y T° cada cinco días.

Ilustración 2929: procedimiento de la prueba experimental



Fuente: Los autores

4.2 PRUEBAS REALIZADAS

Las muestras de agua fueron tomadas a la salida del biodigestor las cuales fueron trasladadas inmediatamente al laboratorio.

Los análisis que se realizaron fueron para identificar la presencia de coliformes totales como indicador principal de presencia de carga contaminante en el agua. Otros parámetros que nos indican la calidad del agua es DQO, DBO5 por lo que también fueron analizados como parámetros de comparación para el comportamiento bacteriológico en el biodigestor.

4.2.1 PARÁMETROS QUÍMICOS

4.2.1.1 Demanda química de oxígeno (DQO):

La demanda química de oxígeno, corresponde a la materia orgánica susceptible a ser oxidada por un agente químico.

- Para dicho análisis, se toman alícuotas de 2,5 ml de muestras de agua residual que se disponen en tubos de ensayo con tapa.
- A estos tubos se les añade 1,5 ml de solución digestora (solución de dicromato de potasio), más 3,5 ml de solución catalítica (iones de plata en medio ácido).
- Se consideran blancos a aquellos que contienen 2,5 ml de agua destilada más los reactivos de solución digestora y catalítica.
- Los tubos se deben colocar en un equipo digestor a 150°C por dos horas. Una vez frías, se cuantifica la concentración de las muestras por espectrofotometría.

4.2.1.2 Demanda biológica de oxígeno (DBO₅)

La determinación de la demanda bioquímica de oxígeno es un test empírico que consiste en determinar el oxígeno consumido por los microorganismos, cuando se incuba una muestra en la oscuridad a 20° C, durante 5 días, determinándose el consumo de oxígeno con el método Winckler. El cálculo de la DBO₅ se realiza a través de la siguiente ecuación:

$$DBO_5, \text{ mg/L} = ((V_{NaSO30} - V_{NaSO35}) \times N_{NaSO3} \times P_{eq} O_2 \times V_b) / V_t \times V_m$$

Siendo:

V_{NaSO30} =volumen de tiosulfato de sodio ocupado en la titulación a tiempo cero;

V_{NaSO35} = volumen de tiosulfato de sodio gastado el día 5;

N_{NaSO3} = normalidad tiosulfato;

$P_{eq} O_2$ =peso equivalente de oxígeno en meq;

V_b =volumen de botella;

V_t =volumen de muestra titulado;

V_m = volumen de muestra agregada a botella.

4.2.2 PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS

4.2.2.1 Recuento de Coliformes Totales

Se utilizan placas petrifilm para conteo de coliformes totales, el procedimiento es el que sigue:

- Esterilizar el área donde se va a trabajar con las placas
- Se prepara 7.5g de agua peptonada diluyendo en 500 ml de agua destilada.
- Se añade 9 ml del agua peptonada diluida en tubos de ensayo estériles
- Se llevan los tubos de ensayo semi tapados a un autoclave durante 20 minutos desde que hierva.
- Se enfrían los tubos y se procede a realizar las diluciones respectivas del agua residual
- Se toma con una micro-pipeta una muestra de la última dilución.
- Se inocula 1 ml en el centro de cada placa petrifilm levantando la película de protección que esta posee.
- Utilizar el difusor para sellar los bordes del cultivo
- Se incuban las placas Petrifilm a 35 °C por 24 horas
- Todas las colonias que presenten un precipitado azul, asociadas o no a una burbuja de gas son colonias de *E. coli*, otras colonias con precipitado rojo asociadas a gas, son coliformes fecales.

4.2.2.2 Interpretación de los resultados:

Determinación de Coliformes totales:

- Se cuentan las colonias con precipitado rojo asociadas a gas y no asociadas a gas.

- Si existen más de 10 colonias en un cm, se cuentan únicamente en 4 cuadros de la placa.
- Si existen menos de 10 colonias en un cm, se cuentan en 10 cuadros de la placa.
- Los resultados se reportan en Unidades Formadoras de Colonias por un milímetro del sustrato. (UFC/m⁻¹).

4.2.3 PARÁMETROS FÍSICOS

4.2.3.1 pH

El test de pH consiste en determinar el número de iones libres de hidrógeno (H*) en una sustancia, en este caso el agua residual. El pH de las muestras fue medido con cintas de colorimetría, siendo generalmente valores cercanos a 7 debido a que las aguas con carga de estiércol de ganado tienden a la neutralidad.

4.2.3.2 Sólidos suspendidos totales

Los sólidos suspendidos totales o residuos no filtrables de una muestra de agua residual, se definen como la porción de sólidos retenidos por un filtro.

El procedimiento consistió en:

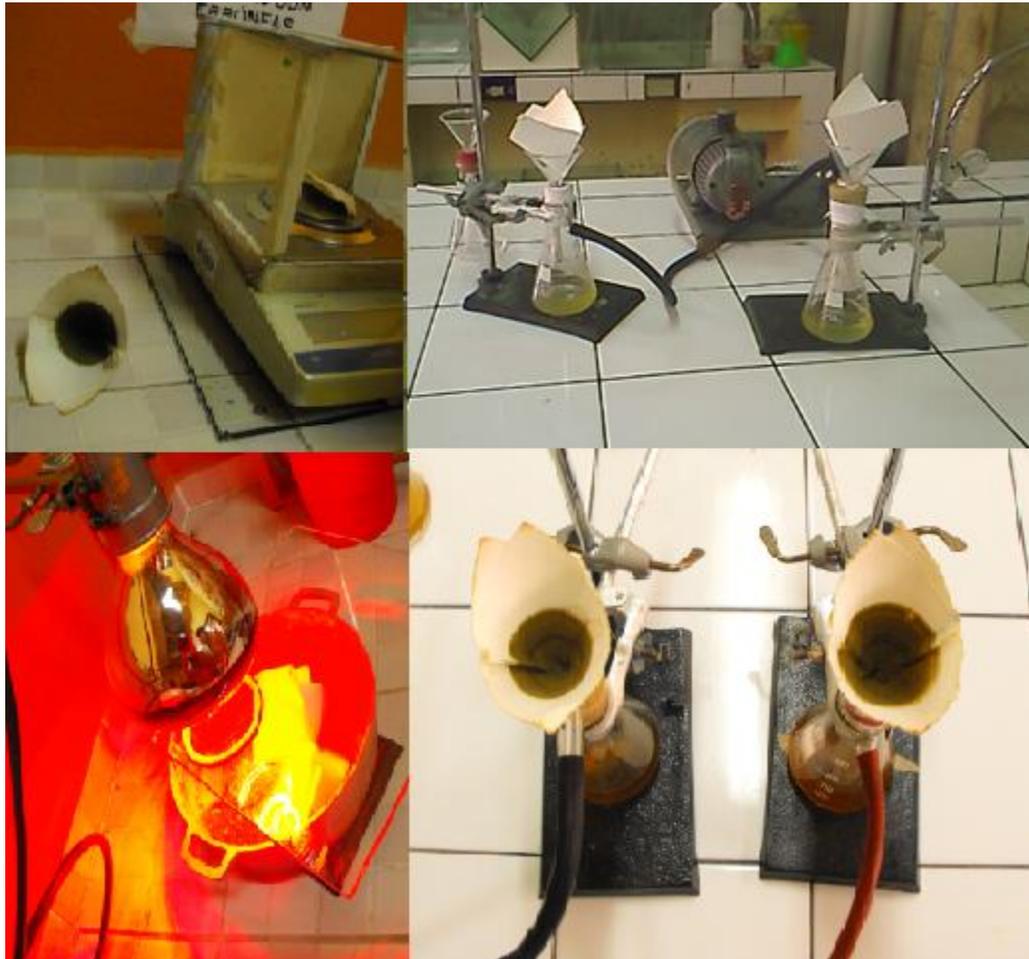
- Se toma 200 ml de agua residual
- Se divide en dos partes, es decir 100 ml para filtrarlas por separado
- Se realiza el montaje del sistema de filtración: matraces, embudos, tubos de vidrio y papel filtro, todo conectado a una bomba de vacío.
- Una vez filtrada la muestra se procede a secar con la ayuda de una lámpara infrarroja.
- Luego del secado se procede a pasar en la balanza de precisión.
- Los resultados se interpreta con la siguiente formula.

$$ST (g/l) = (B - A) / V$$

Dónde:

- ST= sólidos suspendidos totales en gramos por litro
- B= peso del papel filtro con el sedimento
- A= peso del sedimento
- V= volumen del agua filtrada

Ilustración 30: Montaje del sistema de filtración y bomba de vacío



Fuente: Los autores

CAPITULO 5: RESULTADOS Y ESTADÍSTICA

El presente trabajo investigativo tiene como finalidad la implementación de un biodigestor para reducir la carga contaminante de las aguas provenientes de los lavados del establo de la granja Juan Lunardi, por lo cual, para determinar si existe o no esta reducción de la carga contaminante, se analizó 4 parámetros que son indicadores de contaminación, y estos son:

- Sólidos suspendidos totales (SST)
- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- Demanda química de oxígeno (DQO)
- Coliformes totales

Para realizar el análisis estadístico se utiliza el software Minitab® 15.1.30.0., 2007, versión español.

Para todos los parámetros que se analizaron se aplica el método estadístico ANOVA, a fin de determinar el comportamiento de los parámetros mencionados durante los diferentes días que se encuentra el agua dentro del biodigestor. Por lo cual se tomaron muestras cada 5 días, teniendo como testigo al DIA 0.

5.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)

Tabla 14: Resultados de solidos suspendidos totales

ANALISIS DE SST							
DIAS	TESTIGO DIA 0	DIA 5	DIA 10	DIA 15	DIA 20	DIA 25	UNIDADES
PRUEBA A	19.03	10.47	6.36	2.53	1.80	0.21	g/L
PRUEBA B	17.09	8.28	6.23	3.97	1.26	0.23	g/L
PRUEBA C	18.20	9.64	7.89	2.72	1.45	0.22	g/L
PROMEDIO	18.11	9.46	6.83	3.07	1.50	0.22	g/L

Fuente: Los autores

El objetivo de este análisis es determinar la concentración de Sólidos Suspendidos Totales durante los 25 días que permanece el agua residual dentro del biodigestor, para lo cual nos planteamos la siguiente hipótesis:

H0: La carga de Sólidos Suspendidos Totales no disminuye luego de los 25 días.

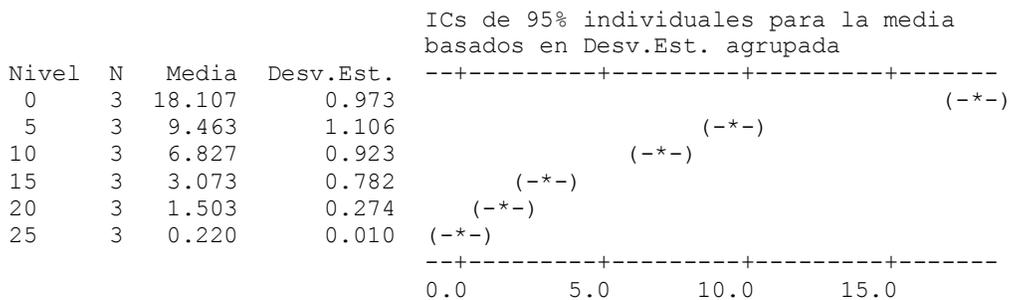
H1: La carga de Sólidos Suspendidos Totales disminuye luego de los 25 días.

Como resultado del análisis estadístico ANOVA para determinar si existe o no una diferencia significativa tenemos:

- **ANOVA unidireccional: SST vs. DIAS**

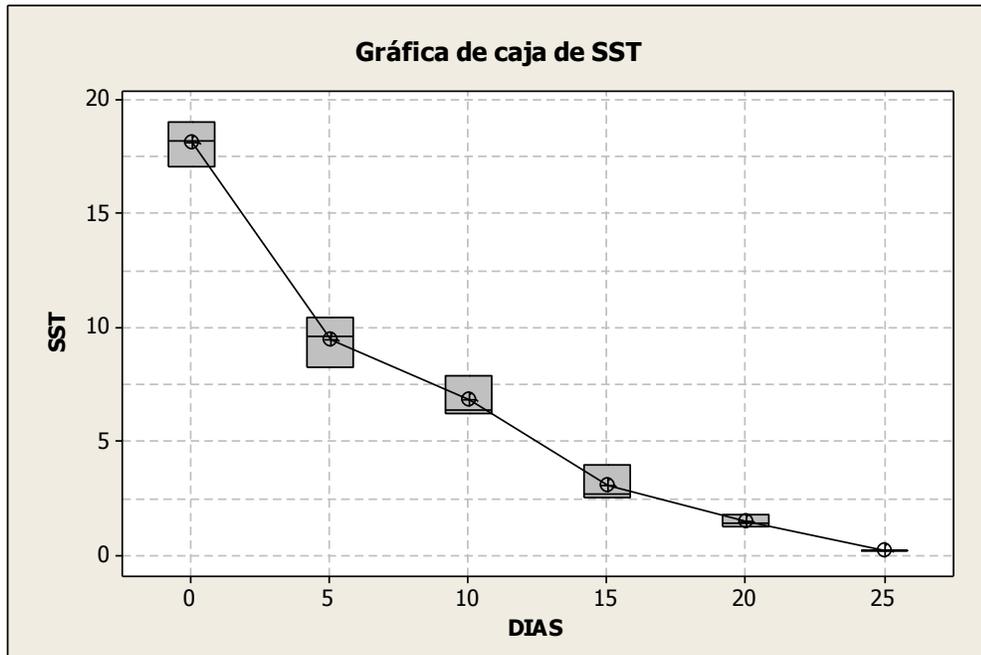
Fuente	GL	SC	MC	F	P
DIAS	5	659.231	131.846	213.27	0.000
Error	12	7.419	0.618		
Total	17	666.650			

S = 0.7863 R-cuad. = 98.89% R-cuad. (Ajustado) = 98.42%



Desv.Est. agrupada = 0.786

Ilustración 31: Gráfica de cajas de sólidos suspendidos totales.



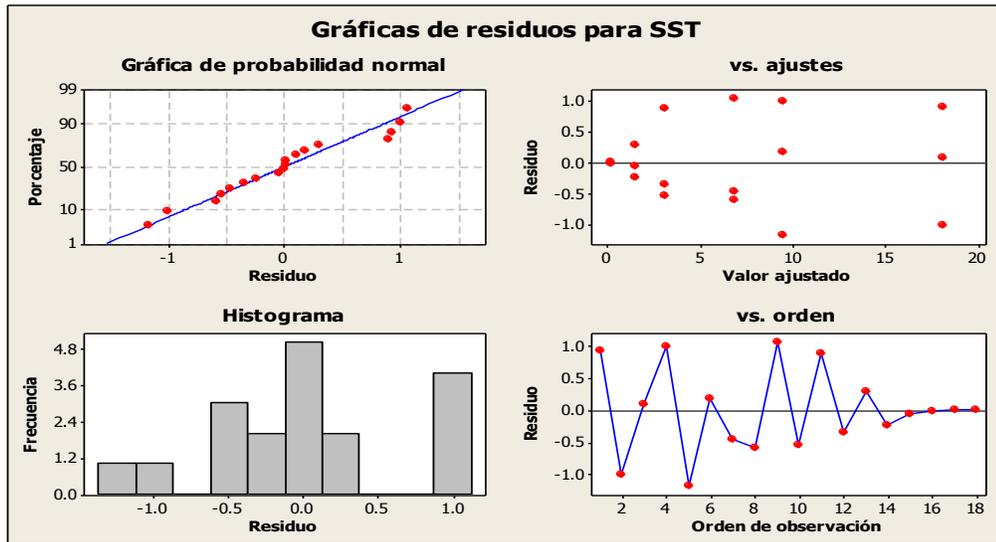
Fuente: Los autores.

Luego de realizar el método ANOVA se puede observar que el valor de P indicado en la tabla del ANOVA unidireccional: SST vs DIAS, es de 0.000 siendo menor al error tomado para realizar este análisis estadístico que es de 0.05, lo que nos indica que es significativa la diferencia entre los resultados.

Del mismo análisis realizado tenemos el valor de R-cuad. Igual a 98.89 %, lo que indica que el modelo realizado es altamente confiable.

En el análisis de comparación de las medias se observa que la mayor diferencia presentada es del día cero al día 5, lo que quiere decir que existe una disminución mayor de SST durante los primeros 5 días, también se determina que del día 15 al día 25 existe una disminución más lenta de SST, pero aun así la diferencia es muy significativa.

Ilustración 32: Gráfica de residuos de solidos suspendidos totales.



Fuente: Los autores.

En la gráfica de residuos de SST se tienen 4 graficas en 1, por lo que se analizara por separado:

- En la gráfica de normalidad se puede observar que el comportamiento de los SST es normal ya que los datos se encuentran cercanos de la línea de tendencia.
- En el histograma podemos notar que existe una distribución sesgada con una conglomeración al centro y que los datos son dispersos con una asimetría positiva, teniendo valores atípicos debido a que la diferencia entre los valores es muy significativa.
- En la gráfica de Residuos vs Valores ajustados se observa un patrón aleatorio lo que nos indica que si existe una varianza constante entre los datos de SST.
- En la gráfica de Residuo vs Orden se observa que si hay una agrupación cerca de la línea cero pero no tienen una tendencia marcada lo que nos comprueba que los datos no se correlacionan entre sí.

✓ Comparaciones con el método de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey

DIAS	N	Media	Agrupación
0	3	18.107	A
5	3	9.463	B
10	3	6.827	C
15	3	3.073	D
20	3	1.503	D E
25	3	0.220	E

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
 Todas las comparaciones de dos a dos entre los niveles de DIAS

Nivel de confianza individual = 99.43%

DIAS = 0 restado de:

DIAS	Inferior	Centro	Superior	
5	-10.800	-8.643	-6.487	(-*)
10	-13.436	-11.280	-9.124	(--*)
15	-17.190	-15.033	-12.877	(-*)
20	-18.760	-16.603	-14.447	(-*)
25	-20.043	-17.887	-15.730	(--*)

-16.0 -8.0 0.0 8.0

DIAS = 5 restado de:

DIAS	Inferior	Centro	Superior	
10	-4.793	-2.637	-0.480	(--*)
15	-8.546	-6.390	-4.234	(--*)
20	-10.116	-7.960	-5.804	(--*)
25	-11.400	-9.243	-7.087	(-*)

-16.0 -8.0 0.0 8.0

DIAS = 10 restado de:

DIAS	Inferior	Centro	Superior	
15	-5.910	-3.753	-1.597	(-*)
20	-7.480	-5.323	-3.167	(-*)
25	-8.763	-6.607	-4.450	(--*)

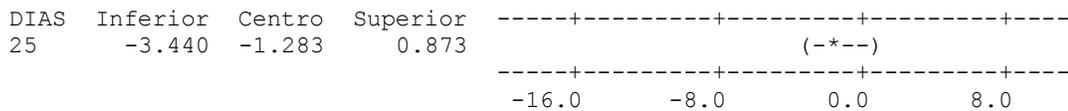
-16.0 -8.0 0.0 8.0

DIAS = 15 restado de:

DIAS	Inferior	Centro	Superior	
20	-3.726	-1.570	0.586	(--*)
25	-5.010	-2.853	-0.697	(-*)

-16.0 -8.0 0.0 8.0

DIAS = 20 restado de:



Para determinar cuál es el día en que más disminuye los SST se utiliza el método de comparaciones de Tukey, y se tiene como resultado que el día 25 es cuando más disminuye la cantidad de SST.

Después de realizar los análisis correspondientes del Método Estadístico ANOVA, de las gráficas y del método de comparaciones múltiples con el mejor, se acepta la hipótesis H1 que se planteó con anterioridad, es decir, los SST si disminuyen luego de los 25 días.

5.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO.

Tabla 15: Resultados de la demanda bioquímica de Oxígeno.

ANÁLISIS DE DBO ₅							
DIAS	TESTIGO DIA 0	DIA 5	DIA 10	DIA 15	DIA 20	DIA 25	UNIDADES
PRUEBA A	235.00	258.00	486.00	426.00	439.00	533.00	mg/l
PRUEBA B	210.00	268.00	384.00	453.00	489.00	572.00	mg/l
PRUEBA C	243.00	256.00	417.00	438.00	502.00	554.00	mg/l
PROMEDIO	229.33	260.67	429.00	439.00	476.67	553.00	mg/l

Fuente: Los autores

El objetivo de este análisis es determinar la Demanda Bioquímica de Oxígeno durante los 25 días que permanece el agua residual dentro del biodigestor, para lo cual nos planteamos la siguiente hipótesis:

H0: La demanda bioquímica de oxígeno no disminuye luego de los 25 días.

H1: La demanda bioquímica de oxígeno disminuye luego de los 25 días.

Como resultado del análisis estadístico ANOVA para determinar si existe o no una diferencia significativa tenemos:

- **ANOVA unidireccional: DBO5 vs. DIAS**

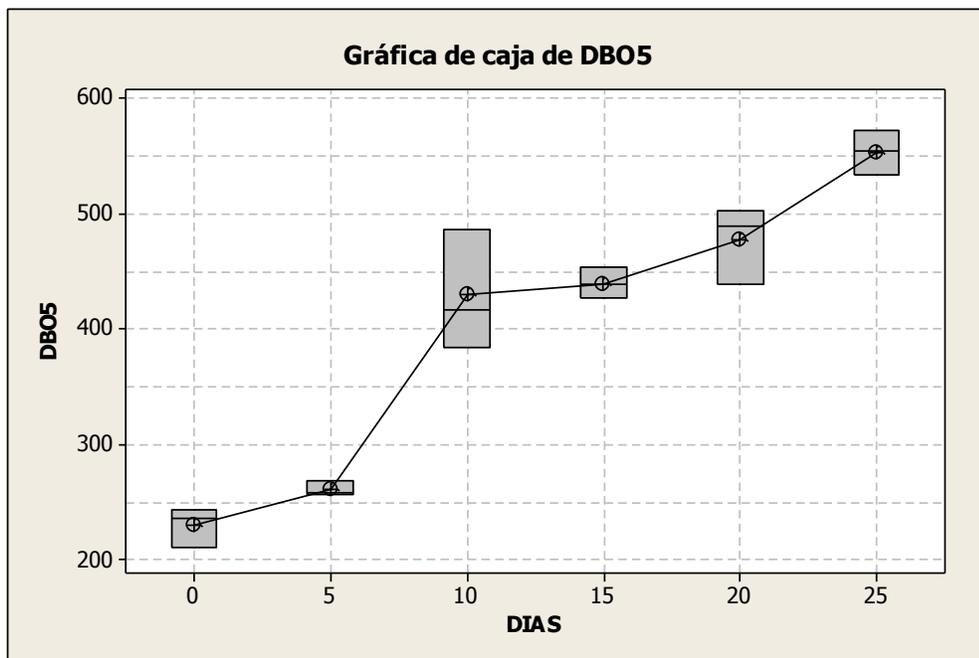
Fuente	GL	SC	MC	F	P
DIAS	5	240493	48099	61.18	0.000
Error	12	9434	786		
Total	17	249927			

S = 28.04 R-cuad. = 96.23% R-cuad.(ajustado) = 94.65%

Nivel	N	Media	Desv.Est.	ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada
0	3	229.33	17.21	(---*---)
5	3	260.67	6.43	(--*---)
10	3	429.00	52.05	(---*---)
15	3	439.00	13.53	(---*---)
20	3	476.67	33.26	(---*---)
25	3	553.00	19.52	(---*---)

Desv.Est. agrupada = 28.04

Ilustración 33: Gráfica de caja de la demanda bioquímica de oxígeno.



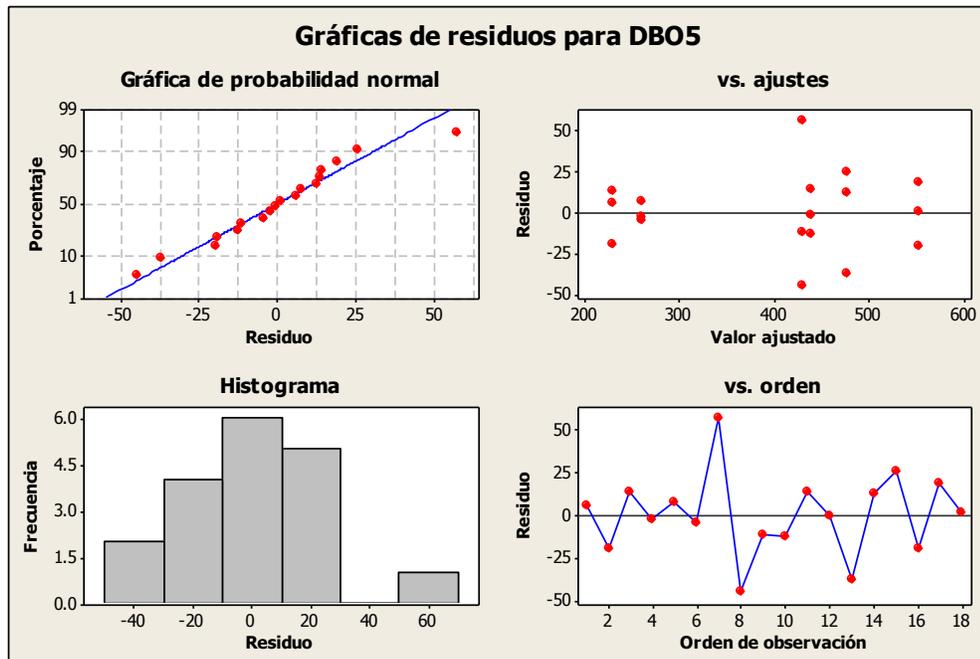
Fuente: Los autores

Luego de realizar el método ANOVA se puede observar que el valor de P indicado en la tabla del ANOVA unidireccional: DBO5 vs DIAS, es de 0.000 siendo menor al error tomado para realizar este análisis estadístico que es de 0.05, lo que nos indica que es significativa la diferencia entre los resultados.

Del mismo análisis realizado tenemos el valor de R-cuad. Igual 96.23%, lo que indica que el modelo realizado es altamente confiable.

En el análisis de comparación de las medias se observa que la mayor diferencia presentada es del día 5 al día 10, lo que quiere decir que existe un aumento muy acelerado de la población de microorganismos que demanda bioquímica de oxígeno durante los días ya mencionados, también se determina que del día 10 al día 20 existe un aumento de DBO5 más lenta, a pesar de esto la diferencia es significativa.

Ilustración 34: Gráfica de residuos de la demanda bioquímica de oxígeno.



Fuente: Los autores

En la gráfica de residuos de DBO5 se tienen 4 graficas en 1, por lo que se analizara por separado:

- En la gráfica de normalidad se puede observar que el comportamiento del DBO5 es normal ya que los datos se encuentran cercanos de la línea de tendencia.
- En el histograma podemos notar que existe una distribución sesgada y que los datos son dispersos con una asimetría negativa, teniendo valores atípicos debido a que la diferencia entre los valores es muy significativa.
- En la gráfica de Residuos vs Valores ajustados se observa un patrón aleatorio lo que nos indica que si existe una varianza constante entre los datos de SST.
- En la gráfica de Residuo vs Orden se observa que si hay una agrupación cerca de la línea cero pero no tienen una tendencia marcada lo que nos comprueba que los datos no se correlacionan entre sí.

✓ **Comparaciones con el método de Tukey**

Agrupar información utilizando el método de Tukey

DIAS	N	Media	Agrupación
25	3	553.00	A
20	3	476.67	A B
15	3	439.00	B
10	3	429.00	B
5	3	260.67	C
0	3	229.33	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
 Todas las comparaciones de dos a dos entre los niveles de DIAS

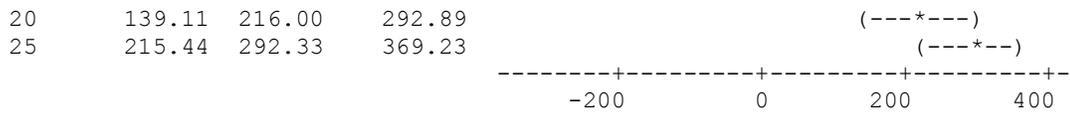
Nivel de confianza individual = 99.43%

DIAS = 0 restado de:

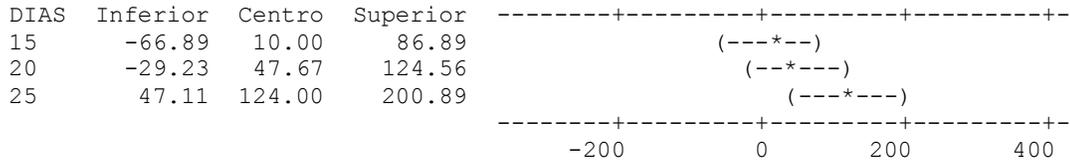
DIAS	Inferior	Centro	Superior	
5	-45.56	31.33	108.23	(---*---)
10	122.77	199.67	276.56	(---*---)
15	132.77	209.67	286.56	(---*---)
20	170.44	247.33	324.23	(---*---)
25	246.77	323.67	400.56	(---*---)

DIAS = 5 restado de:

DIAS	Inferior	Centro	Superior	
10	91.44	168.33	245.23	(---*---)
15	101.44	178.33	255.23	(---*---)



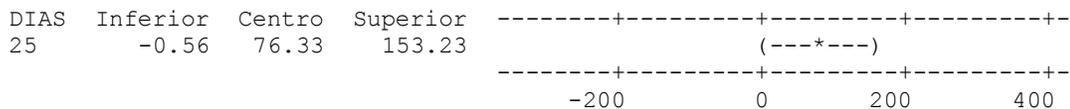
DIAS = 10 restado de:



DIAS = 15 restado de:



DIAS = 20 restado de:



Para determinar cuál es el día en que el valor de DBO5 es menor se utiliza el método de comparaciones de Tukey, y se tiene como resultado que el día 0 es cuando se obtiene el valor menor de DBO5.

Después de realizar los análisis correspondientes del Método Estadístico ANOVA, de las gráficas y del método de comparaciones múltiples con el mejor, se acepta la hipótesis H0 que se planteó con anterioridad, es decir, el DBO5 aumenta. Esto es debido a que el tiempo de retención del agua residual dentro del Biodigestor es muy cortó y los valores de DBO5 aumentan conforme aumenta las poblaciones de microorganismos presentes en el biodigestor.

5.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO.

Tabla 16: Resultados de la demanda química de oxígeno.

ANÁLISIS DE DQO							
DIAS	TESTIGO DIA 0	DIA 5	DIA 10	DIA 15	DIA 20	DIA 25	UNIDADES
PRUEBA A	6799	5294	2125	2016	1560	1388	mg/l
PRUEBA B	7432	6245	3410	2987	2231	1578	mg/l
PRUEBA C	7244	5967	2619	2199	1742	1422	mg/l
PROMEDIO	7158.33	5835.33	2718.00	2400.67	1844.33	1462.67	mg/l

Fuente: Los autores.

El objetivo de este análisis es determinar la Demanda Química de Oxígeno durante los 25 días que permanece el agua residual dentro del biodigestor, para lo cual nos planteamos la siguiente hipótesis:

H0: La demanda química de oxígeno no disminuye luego de los 25 días.

H1: La demanda química de oxígeno disminuye luego de los 25 días.

Como resultado del análisis estadístico ANOVA para determinar si existe o no una diferencia significativa tenemos:

- ANOVA unidireccional: DQO vs. DÍAS**

Fuente	GL	SC	MC	F	P
DIAS	5	82559684	16511937	85.27	0.000
Error	12	2323655	193638		
Total	17	84883340			

S = 440.0 R-cuad. = 97.26% R-cuad.(ajustado) = 96.12%

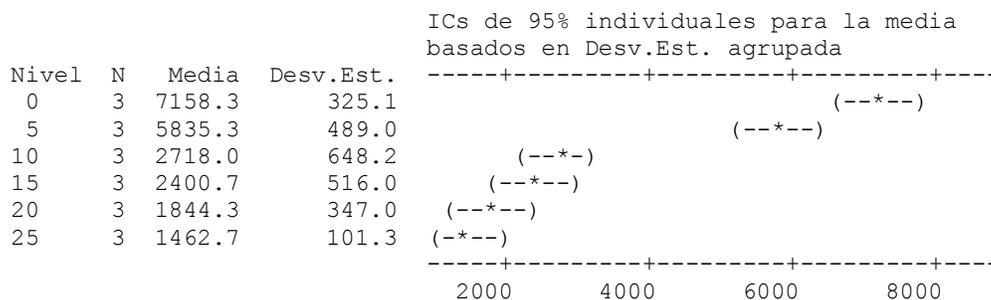
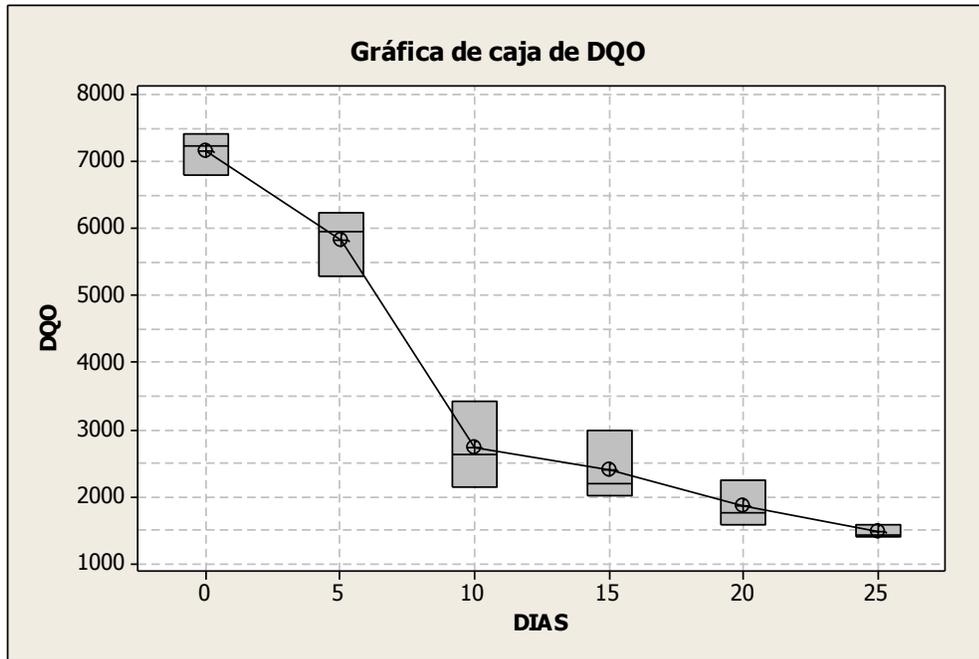


Ilustración 35: Grafica de caja de la demanda química de Oxigeno.



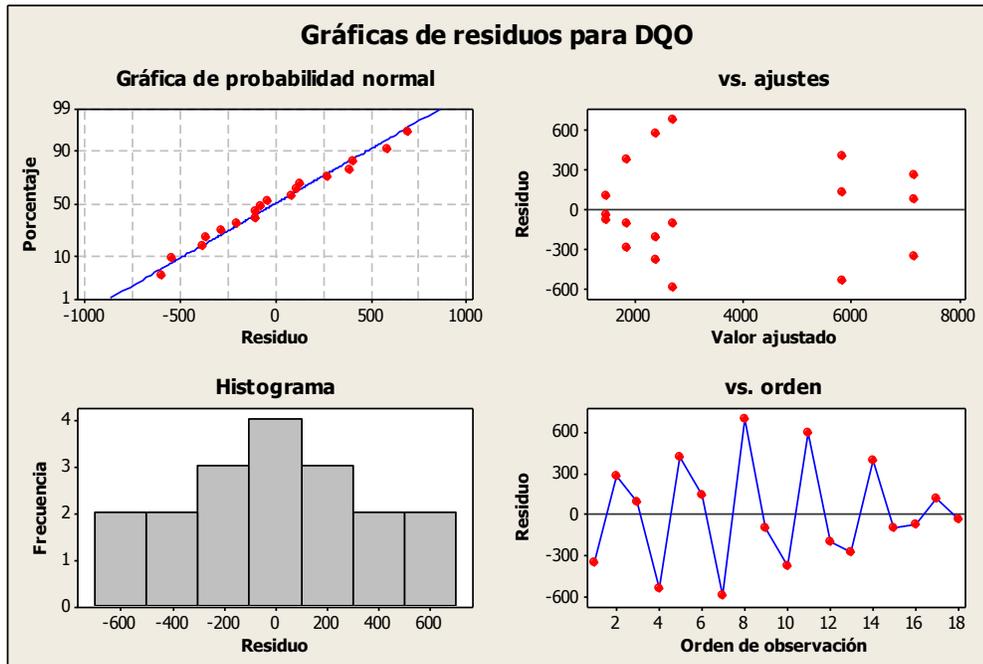
Fuente: Los autores.

Luego de realizar el método ANOVA se puede observar que el valor de P indicado en la tabla del ANOVA unidireccional: DQO vs DIAS, es de 0.000 siendo menor al error tomado para realizar este análisis estadístico que es de 0.05, lo que nos indica que es significativa la diferencia entre los resultados.

Del mismo análisis realizado tenemos el valor de R-cuad. Igual 97.26%, lo que indica que el modelo realizado es altamente confiable.

En el análisis de comparación de las medias se observa que la mayor diferencia presentada es del día 5 al día 10, lo que quiere decir que existe una disminución muy notable de la demanda química de oxígeno durante los días ya mencionados, también se determina que del día 10 al día 20 existe una disminución de DQO más lenta, a pesar de esto la diferencia es significativa.

Ilustración 36: Gráfica de residuos de la demanda química de oxígeno.



Fuente: Los autores

En la gráfica de residuos de DQO se tienen 4 graficas en 1, por lo que se analizara por separado:

- En la gráfica de normalidad se puede observar que el comportamiento del DQO es normal ya que los datos se encuentran muy cercanos de la línea de tendencia.
- En el histograma podemos notar que existe una distribución sesgada y los datos tienen una distribución normal.
- En la gráfica de Residuos vs Valores ajustados se observa un patrón aleatorio lo que nos indica que si existe una varianza constante entre los datos de DQO.
- En la gráfica de Residuo vs Orden se observa que no existe una agrupación cerca de la línea cero y no tienen una tendencia marcada lo que nos indica que los datos no se correlacionan entre sí.

✓ Comparaciones con el método de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey

DIAS	N	Media	Agrupación
10	3	107.67	A
20	3	49.00	A B
0	3	34.67	B
15	3	29.33	B
25	3	23.00	B
5	3	17.67	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%

Todas las comparaciones de dos a dos entre los niveles de DIAS

Nivel de confianza individual = 99.43%

DIAS = 0 restado de:

DIAS	Inferior	Centro	Superior	
5	-80.36	-17.00	46.36	(-----*-----)
10	9.64	73.00	136.36	(-----*-----)
15	-68.69	-5.33	58.02	(-----*-----)
20	-49.02	14.33	77.69	(-----*-----)
25	-75.02	-11.67	51.69	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----+
-80 0 80 160

DIAS = 5 restado de:

DIAS	Inferior	Centro	Superior	
10	26.64	90.00	153.36	(-----*-----)
15	-51.69	11.67	75.02	(-----*-----)
20	-32.02	31.33	94.69	(-----*-----)
25	-58.02	5.33	68.69	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----+
-80 0 80 160

DIAS = 10 restado de:

DIAS	Inferior	Centro	Superior	
15	-141.69	-78.33	-14.98	(-----*-----)
20	-122.02	-58.67	4.69	(-----*-----)
25	-148.02	-84.67	-21.31	(-----*-----)

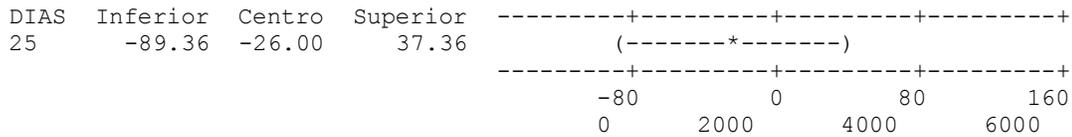
-----+-----+-----+-----+
-80 0 80 160

DIAS = 15 restado de:

DIAS	Inferior	Centro	Superior	
20	-43.69	19.67	83.02	(-----*-----)
25	-69.69	-6.33	57.02	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----+
-80 0 80 160

DIAS = 20 restado de:



Para determinar cuál es el día en que el valor de DQO es menor se utiliza el método de comparaciones de Tukey, y se tiene como resultado que el día 25 es cuando se obtiene el valor menor de DQO.

Después de realizar los análisis correspondientes del Método Estadístico ANOVA, de las gráficas y del método de comparaciones múltiples con el mejor, se acepta la hipótesis H1 que se planteó con anterioridad, es decir, el DQO disminuye notablemente después de los 25 días.

5.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE COLIFORMES TOTALES.

Tabla 17: Resultados de coliformes totales

ANÁLISIS DE COLIFORMES								
DIAS	TESTIGO DIA 0	DIA 5	DIA 10	DIA 15	DIA 20	DIA 25	DISOLUCIONES	UNIDADES
PRUEBA A	32.0	18.0	92.0	28.0	42.0	23.0	10 ⁵	UFC/ml ⁻¹
PRUEBA B	47.0	23.0	162.0	36.0	77.0	28.0	10 ⁵	UFC/ml ⁻¹
PRUEBA C	25.0	12.0	69.0	24.0	28.0	18.0	10 ⁵	UFC/ml ⁻¹
PROMEDIO	34.7	17.7	107.7	29.3	49.0	23.0	10 ⁵	UFC/ml ⁻¹

*UFC= Unidades Formadoras de Colonias

Fuente: Los autores.

El objetivo de este análisis es determinar la cantidad de unidades formadoras de colonias durante los 25 días que permanece el agua residual dentro del biodigestor, para lo cual nos planteamos la siguiente hipótesis:

H0: La cantidad de unidades formadoras de colonias de coliformes no disminuye luego de los 25 días.

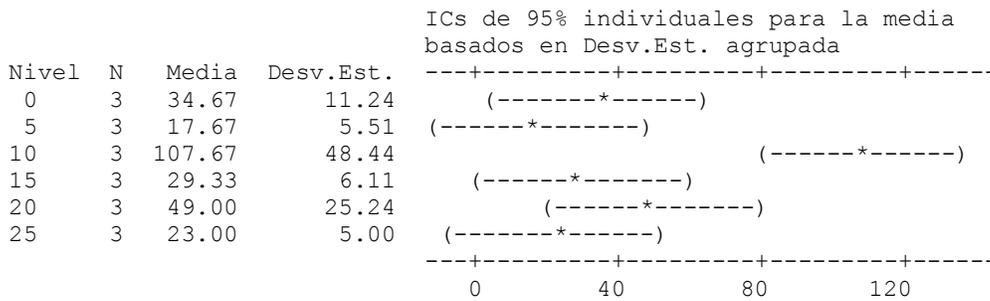
H1: La cantidad de unidades formadoras de colonias de coliformes disminuye luego de los 25 días.

Como resultado del análisis estadístico ANOVA para determinar si existe o no una diferencia significativa tenemos:

• **ANOVA unidireccional: COLIFORMES vs. DIAS**

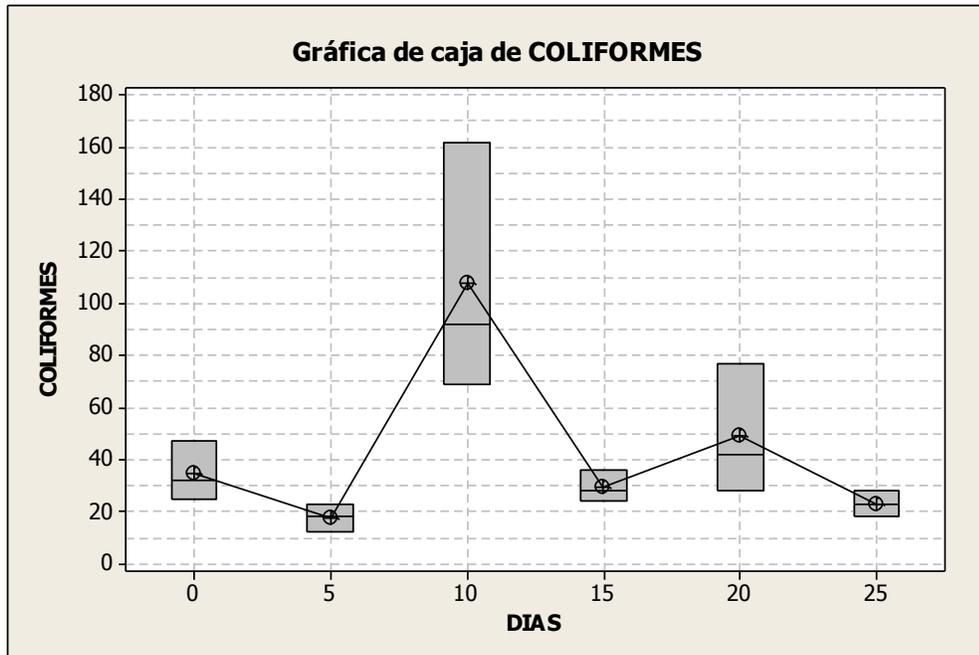
Fuente	GL	SC	MC	F	P
DIAS	5	16542	3308	6.20	0.005
Error	12	6405	534		
Total	17	22946			

S = 23.10 R-cuad. = 72.09% R-cuad.(ajustado) = 60.46%



Desv.Est. agrupada = 23.10

Ilustración 37: Gráfica de cajas de coliformes totales.



Fuente: Los autores.

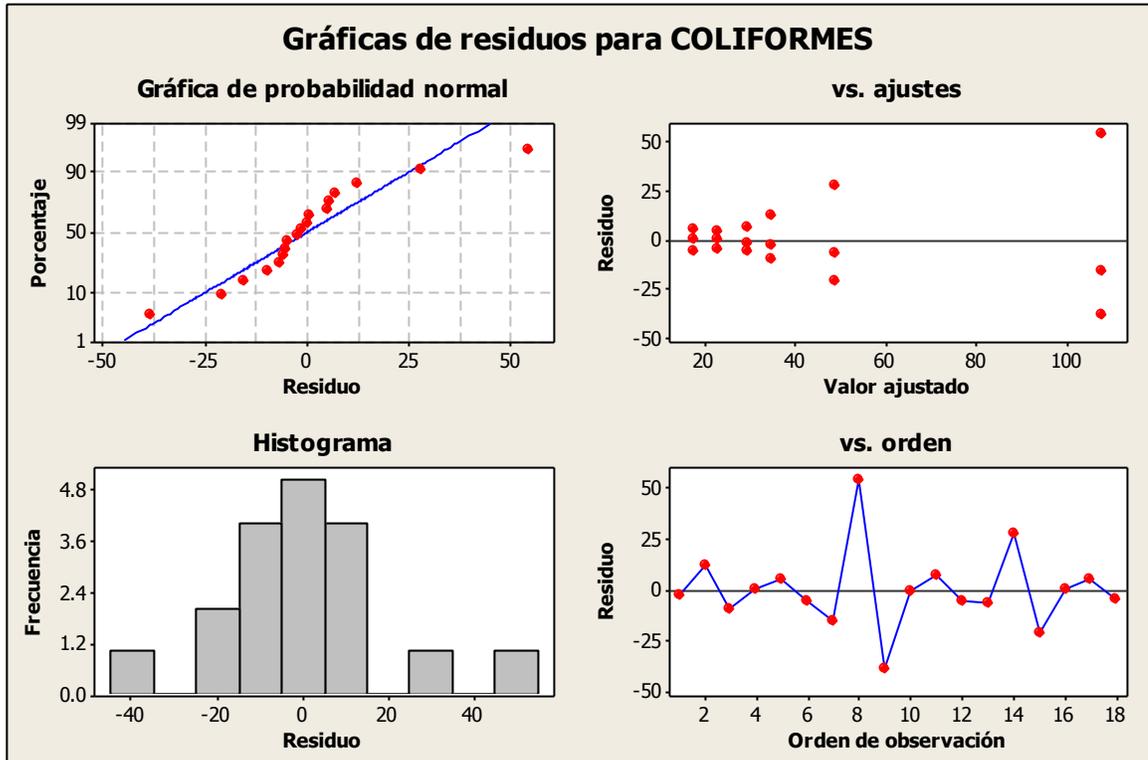
Luego de realizar el método ANOVA se puede observar que el valor de P indicado en la tabla del ANOVA unidireccional: DQO vs DIAS, es de 0.005 siendo menor al error tomado para realizar este análisis estadístico que es de 0.05, lo que nos indica que es significativa la diferencia entre los resultados.

Del mismo análisis realizado tenemos el valor de R-cuad. Igual 72.09%, lo que indica que el modelo realizado es confiable.

En el análisis de comparación de las medias se observa que la mayor diferencia presentada es del día 10, lo que quiere decir que existe un aumento de la población bacteriana en ese día.

De los datos obtenidos la población de coliformes sigue el comportamiento normal de la curva de crecimiento bacteriana.

Ilustración 38: Gráfica de residuos de coliformes totales.



Fuente: Los autores

En la gráfica de residuos de coliformes se tienen 4 gráficas en 1, por lo que se analizará por separado:

- En la gráfica de normalidad se puede observar que el comportamiento del Coliformes es normal ya que los datos se encuentran muy cercanos de la línea de tendencia.
- En el histograma podemos notar que existe una distribución aglomerada al centro, teniendo valores atípicos debido a que la diferencia entre los valores es muy significativa.
- En la gráfica de Residuos vs Valores ajustados se observa un patrón de los primeros datos con cierta tendencia hacia cero nos indica que no existe una varianza constante entre los datos de Coliformes.

- En la gráfica de Residuo vs Orden se observa que existe cierta agrupación cerca de la línea cero y tienen una tendencia poco marcada lo que nos indica que existen ciertos datos que se correlacionan entre sí.

✓ **Comparaciones con el método de Tukey**

Agrupar información utilizando el método de Tukey

DIAS	N	Media	Agrupación
10	3	107.67	A
20	3	49.00	A B
0	3	34.67	B
15	3	29.33	B
25	3	23.00	B
5	3	17.67	B

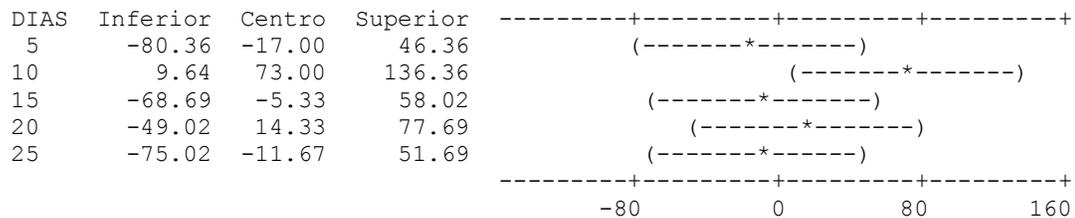
Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%

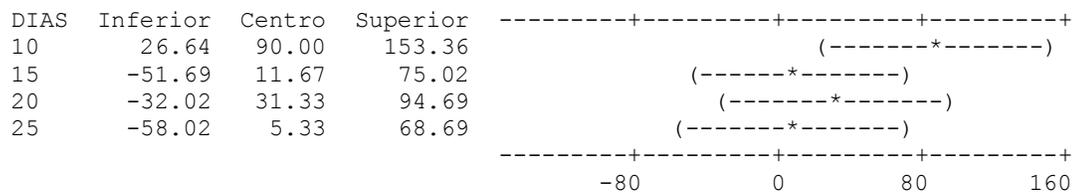
Todas las comparaciones de dos a dos entre los niveles de DIAS

Nivel de confianza individual = 99.43%

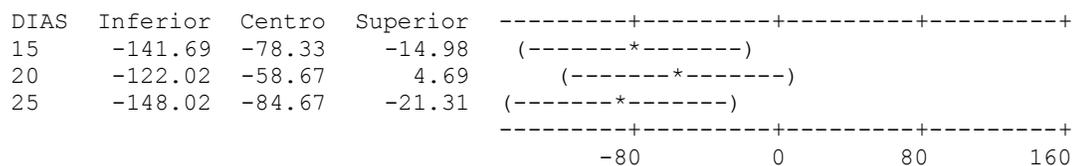
DIAS = 0 restado de:



DIAS = 5 restado de:



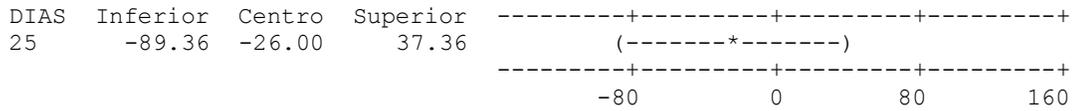
DIAS = 10 restado de:



DIAS = 15 restado de:



DIAS = 20 restado de:



Para determinar cuál es el día en que el valor de coliformes totales es menor se utiliza el método de comparaciones de Tukey, y se tiene como resultado que el día 5 es cuando se obtiene el valor menor de coliformes totales. Esto se debe a que antes de las bacterias comiencen a reproducirse tienen una fase de disminución de su población.

Después de realizar los análisis correspondientes del Método Estadístico ANOVA, de las gráficas y del método de comparaciones múltiples con el mejor, se acepta la hipótesis H1 que se planteó con anterioridad, es decir, los coliformes totales disminuyen después de los 25 días.

5.5 ANÁLISIS DE PROMEDIOS

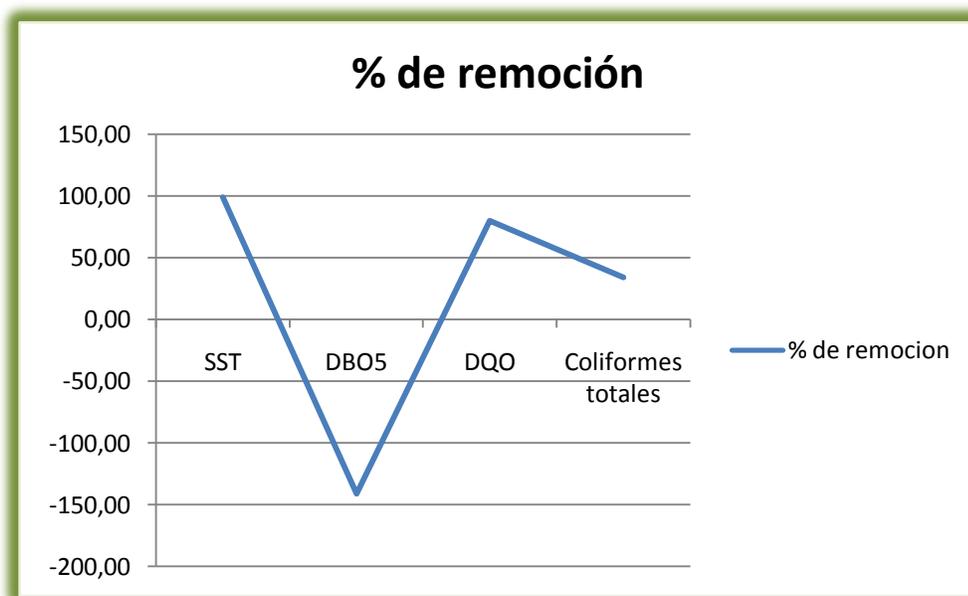
De los 4 parámetros que se analizan para determinar la carga contaminante, se analizará cuál de estos es el que más ha disminuido al término de los 25 días de permanecer el agua residual dentro del biodigestor.

Tabla 18: Resultados análisis de promedios.

Parámetros promedios	DIAS						% de aumento o disminución
	0° Días	5° Días	10° Días	15° Días	20° Días	25° Días.	
SST	18.11	9.46	6.83	3.07	1.50	0.22	98.79
DBO ₅	229.33	260.67	429.00	439.00	476.67	553.00	-141.14
DQO	7158.33	5835.33	2718.00	2400.67	1844.33	1462.67	79.57
Coliformes totales	34.70	17.70	107.70	29.30	49.00	23.00	33.72

Fuente: Los autores

Ilustración 39: Gráfica de porcentaje de remoción de SST, DBO₅, DQO, Y Coliformes totales, luego de los 25 días.



FUENTE: Los Autores.

Como se puede observar en la tabla 17 y en la ilustración 45, se determina que los Sólidos Suspendidos Totales es el parámetro que más disminuye luego de los 25 días, con un 98,79 % .

Y teniendo un aumento de la Demanda Bioquímica de Oxígeno de un 141,14 % como se explicó en análisis estadístico de este parámetro, esto se debe a que el tiempo de retención de 25 días es muy corto para que haya una disminución notable.

CONCLUSIONES

Luego de haber culminado con la elaboración de este proyecto se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- *Sólidos suspendidos totales:* tiende a disminuir con una remoción de 98,79% luego de un tiempo de retención de 25 días.
- *Demanda bioquímica de oxígeno:* en relación al tiempo de retención, muestra una fase con tendencia al aumento respecto al comportamiento logarítmico normal del desarrollo microbiano en un biodigestor.
- *Demanda química de oxígeno:* tiende a disminuir, en razón de la degradación de la materia orgánica con una remoción del 79,57%.
- *Coliformes Totales:* La disminución de coliformes totales en el agua residual presenta una remoción del 33,72%, valor que evidencia el cumplimiento de la Hipótesis 1, con la cual se logra una disminución de la carga contaminante luego del tiempo de retención de cada tratamiento.
- *Geomembrana:* Las características físicas de la geomembrana utilizada como biodigestor son las adecuadas para este tipo de tratamientos; soporta la presión de los 500 litros de agua residual, resiste la variación de temperaturas de la zona, y tolera la presión del biogás que se genera durante los tratamientos, por lo que en ningún momento presenta fugas por fisuras en el material.
- *Productos Finales:* Luego de cada tratamiento, se obtiene bio-abono, que es un abono orgánico biológico apto para los cultivos por poseer micronutrientes para el suelo; también se obtiene biogás, producto de la actividad microbiana que puede utilizarse como gas combustible.

RECOMENDACIONES

- se recomienda realizar pruebas y análisis con mayores tiempos de retención.
- Con la finalidad de mejorar el desempeño del biodigestor, se recomienda cubrir la estructura metálica exterior a fin de retener el calor y evitar bruscas caídas de temperatura.
- Durante la elaboración de este trabajo que tiene como finalidad la disminución de la carga contaminante, se obtuvieron otras resultantes como el bioabono y el biogás, optándose por incluir en el sistema del biodigestor un subsistema de depuración del biogás.
- En el subsistema de biogás se recomienda considerar la presión existente para una mejor captación de este, disminuyendo las distancias de las tuberías hacia el tanque de almacenamiento de biogás.

PROYECCION FUTURA

La importancia de este proyecto radica en la depuración de las aguas residuales provenientes de las actividades ganaderas del establo, para lo cual se considera la implementación de un biodigestor de flujo discontinuo, con el propósito de aprovechar estas aguas luego del tratamiento correspondiente.

El parámetro a considerarse para minimizar la concentración de la carga contaminante, es la presencia de coliformes totales. Una vez plasmados los resultados en valores beneficiosos a favor de una correcta disminución de la carga contaminante, se recomienda implementar subsistemas que completen el funcionamiento de la planta, como un sistema de captación de biogás, y bio-abono con el fin de optimizar su uso en la granja.

Los productos que se obtienen pueden ser aprovechados en las actividades de la granja; el biogás se puede utilizar en el funcionamiento de las campanas de calefacción del criadero de pollos y el bioabono como fertilizante natural para el pasto de ganado y otros cultivos.

El presente proyecto es de carácter investigativo, con opción a ampliar sus funciones con nuevas ideas y subsistemas que permitan el uso continuo del mismo, a más de ser un modelo para la instalación de futuras plantas de biodigestión que depuren la totalidad de aguas residuales provenientes del establo.

Un sistema de producción continua de gas debe considerarse como un proceso que conlleva tiempo hasta captar la cantidad necesaria que cubra las necesidades básicas de la granja, sin embargo, se puede potencializar esta producción con ideas de mejoramiento, aportadas por estudiantes y personas interesadas en este tipo de sistemas de depuración.

Con este proyecto se espera el aporte de ideas y nuevas prácticas que sean ambientalmente amigables, a más de poder difundir el conocimiento tecnológico y manejo local de los recursos agrícolas, pecuarios y también de los beneficios económicos generados en toda la cadena productiva y de comercialización.

ENFOQUE DE LA INVESTIGACION:

El biodigestor diseñado se enmarca dentro de las directrices del tratamiento de aguas residuales, abonos orgánicos y energías residuales para su aplicación y desarrollo sustentable de la comunidad.

BIBLIOGRAFÍA

SUQUILANDA, Manuel, *Agricultura orgánica: alternativa tecnológica del futuro* – 1^{ra}. Edición, Editorial Fundagro, Quito-Ecuador, 1996.

GUTIERREZ Pulido, H., VARA Salazar, R., *Análisis y diseño de experimentos*, 2a. Edición, Editorial Mc Graw Hill, México, 2008.

CHUNGANDRO, Mauricio, *Diseño y Construcción de un Biodigestor para pequeñas y medianas granjas*, E.P.N. Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito, Febrero del 2010.

DINAMA-laboratorio, *Manual de procedimientos analíticos para aguas y efluentes.*, métodos de análisis, disponible en línea. Consulta: 31 de mayo 2011.

www.mvotma.gub.uy/.../publicaciones.../999175-manual-de-procedi.

CIHEAM, *Technologies for warte and wastewater treatment*, propuesta de estructuración de biodigestores, disponible en línea: Consulta: 29 Marzo de 2011.

<http://ressources.ciheam.org/om/pdf/a31/CI971545.pdf>

GEINSA, *Geosinteticos e instalaciones S.A.C. Geomembranas*. en línea, consulta: 6 de junio de 2011.

<http://www.geinsaperu.com/productos/1.html>

ANEXOS

ANEXO I

REGISTROS FOTOGRAFICOS

CARACTERIZACIÓN DEL ESTABLO DE LA GRANJA JUAN LUNARDI



Ilustración: Establo



Ilustración: Lavado del establo



Ilustración: Concentración de estiércol en suelo y agua



Ilustración: Estudio del campo



Ilustración: Ubicación y Mediciones



Ilustración: Limpieza y excavación



Ilustraciones: Alineamiento desde la captación hasta el sitio del tanque de carga



Ilustración: Replanteamiento



Ilustración: Encofrado y excavado del tanque de descarga



Ilustración: Enlucido de la base del biodigestor e instalación del codo de 4" x 45°, para acoplar a la entrada de la geomembrana.



Ilustración: Base de concreto concluido; prueba de la geomembrana nueva e inicio de la estructura exterior



Ilustración: Armado de la estructura exterior



Ilustración: Instalación de tanques y accesorios



Ilustración: Obra concluida de la estructura exterior



Ilustración: Captación del efluente y almacenamiento en el tanque de carga



Ilustración: Conducción del efluente a la geomembrana.



Ilustración: Instalación del sistema de biogás



Ilustración: Preparación del filtro con los respectivos purificantes e instalación



Ilustración: Biogás disponible y almacenamiento de metano en el neumático



Ilustración: Comprobación del biogás y quema de biogás generado.



Ilustración: Quema de biogás a través de los filtros de tratamiento

ENSAYOS DE ANALISIS DE ST, DBO₅, DQO Y COLIFORMES TOTALES



Ilustración: Recolección de la muestra del sustrato de la salida del biodigestor.



Ilustración: Medidas de datos físicos del agua del biodigestor, T°C y pH.



Ilustración: Filtrado del sustrato durante los días de pruebas

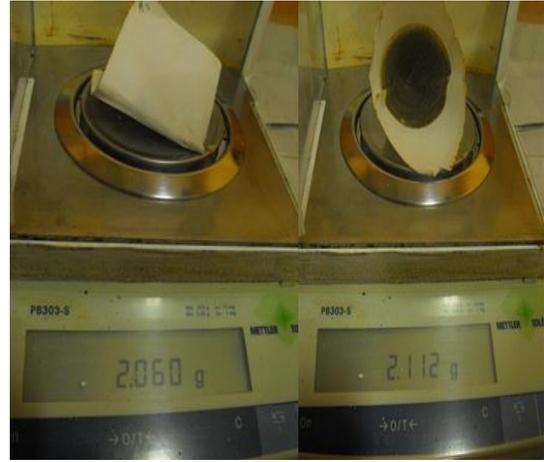
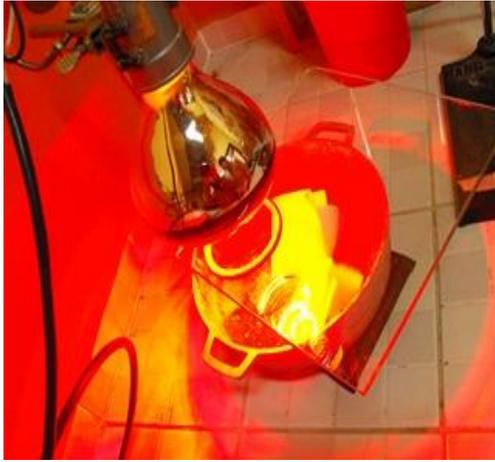


Ilustración: Secado y pesado de los sustratos.



Ilustración: Preparación de agua peptonada para el análisis de coliformes totales.



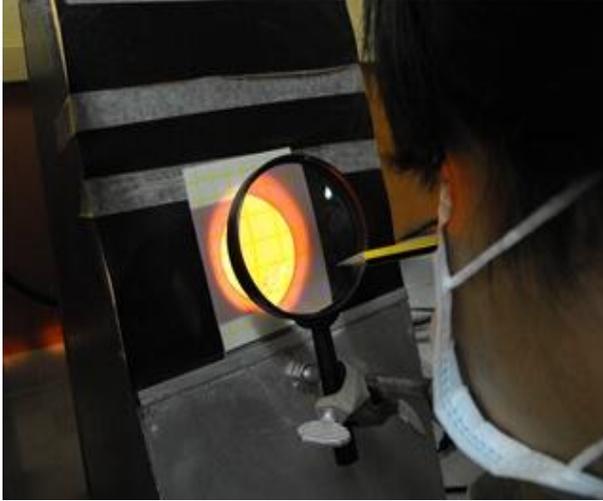
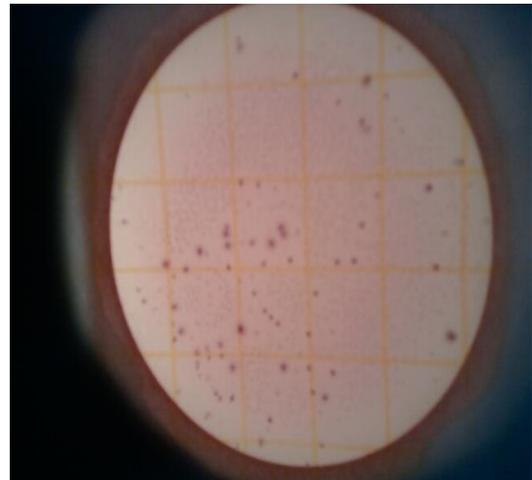
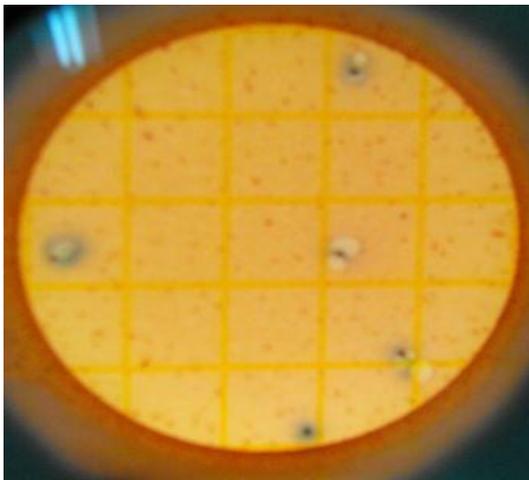
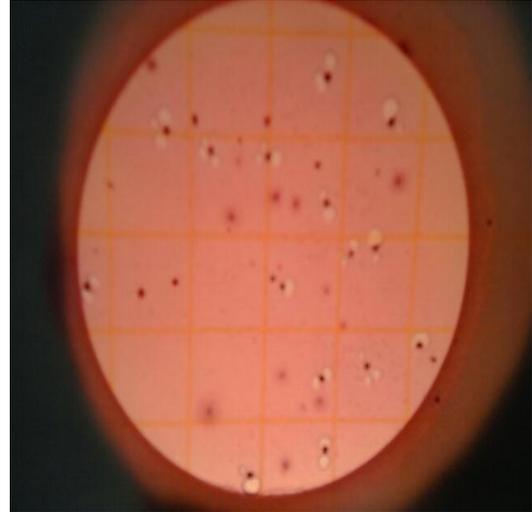
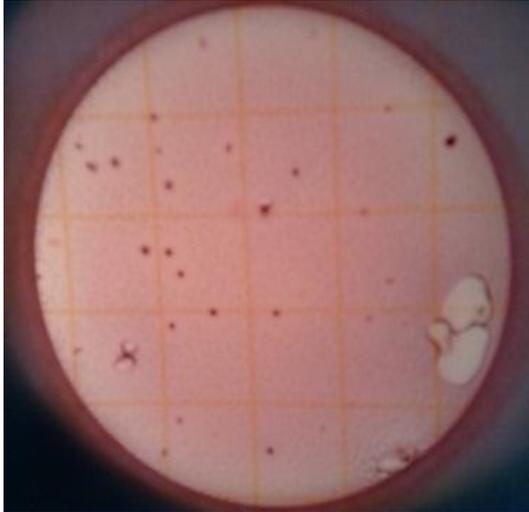


Ilustración: Incubación de los coliformes totales. 24 horas a 35°C., y recuento de coliformes totales.

RESULTADOS MICROBIOLÓGICO.

Resultados de los coliformes totales por método de recuento de coliformes 3M. Placas petrifilm.



ANEXO II

DETALLE DE LOS COSTOS DIRECTOS CORRESPONDIENTE A LA CONSTRUCCIÓN DEL BIODIGESTOR Y EL PRESUPUESTO DE LOS ANÁLISIS QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS

ANALISIS FINANCIERO

A fin de efectuar el proceso de digestión anaerobia en la granja Juan Lunardi, se ha implementado un biodigestor de flujo discontinuo, cuya inversión se detalla a continuación:

- Costo directos
- Costo indirectos
- Costos totales

COSTOS DIRECTOS.

Son aquellos que se pueden identificar o cuantificar plenamente con los productos terminados. En donde básicamente se relacionan con la materia prima y la mano de obra directa.

El costo de mano de obra se debe principalmente al tiempo en el cual se llevó a cabo la limpieza previa de toda la maleza y a la excavación del terreno para la construcción del biodigestor, a continuación se describe en la siguiente tabla..

Detalle de los costos directos

ítem	Descripción	Cantidades	Costo unitario USD	Subtotal USD
1	Mano de obra	-	-	1045
2	Materia prima	-	-	1238.89
3	Análisis Químico y Biológico	-	-	215.42
			TOTAL	2499.31

Fuente: los autores.

En lo referente a la materia prima, se encuentran los materiales utilizados para la instalación del biodigestor.

MANO DE OBRA

ítem	Descripción	cantidad (días)	Costo Unitario USD	subtotal USD
1	Limpieza del terreno	12	15	180
2	Desbanque de tierra	14	15	210
3	Excavación del terreno	25	15	375
4	Replanteo del terreno	5	15	75
5	Instalación de la cubierta	7	15	105
6	Transporte de material	-	-	50
7	Soldadura	2	15	50
	TOTAL	65	90	1045

DETALLE DE LA MATERIA PRIMA

ítem	Descripción	cantidad	Costo Unitario USD	subtotal USD
Estructuras de concreto				
1	Bloques 15 x 40 cm	65	0.4	26
2	carretillas de arena	5	0.8	4
3	carretillas de ripio	8	0.8	6.4
4	cemento	4	7	28
Estructura				
5	Tubo galvanizados 2"	14	6	84
6	Tubo galvanizados 1/2"	2	4	8
7	Malla	3	16	48
8	Hojas de Zinc	8	9.99	79.92
9	Ganchos para zinc (lb)	1	0.4	0.4
10	Pos electrodos (lb)	6	0.8	4.8
11	Bisagras pistón 5/8	1	1.7	1.7

Biodigestor				
12	Tubo PVC 4" d=110 mm	2	11,43	22,86
13	Codo pvc 4" X 45grados	1	1,8	1,8
14	Válvula compuerta 4" d=110mm	2	136	272
15	Geomembrana polietileno de alta densidad 0.75m ³	1	80	80
16	Codo pvc 4" X 90 grados	1	1,8	1,8

17	Dridas de 4"	2	14,87	29,74
18	Adaptador macho de 4"	6	3,5	21
19	Tanques rectangulares de polietileno	2	152	304
Sistema de biogás				
20	Tubo pvc 1/2"	1	6	6
21	Adaptador macho 1/2"	1	5,57	5,57
22	Válvula de seguridad 1/2"	6	3,35	20,1
23	Codo de 1/2"x 45	6	3,2	19,2
24	Neplo de 1/2"	6	0,85	5,1
25	Buggsing rosca 1/4" gal.	4	0,7	2,8
26	Filtros de tratamiento (1 unidad)	1	65,55	65,55
27	Manguera de gas	3	0,83	2,49
28	Neumático	1	5,46	5,46
29	Cilindro de gas	1	60	60
30	Adaptador 1/2"	1	0,2	0,2
31	Manómetro	1	12	12
32	Suelda de bronce (lb)	1	10	10
			TOTAL	1238,89

PRESUPUESTO DE ANALISIS : DQO, DBO5 Y COLIFORMES

ítem	Descripción	cantidad	Costo Unitario USD	subtotal USD
1	Análisis químico DQO	6	14.55	87.3
2	Análisis químico DBO ₅	6	13.51	81.06
3	Análisis biológico Coliformes totales	1	17.06	17.06
4	Caja petrifilm 3M_ placas para Recuento de Coliformes	1	30	30
			TOTAL	215.42

COSTOS INDIRECTOS.

Son todos los costos diferentes de los materiales directos y la mano de obra directa que interviene en el desarrollo de un producto. Básicamente son aquellos elementos que complementan la acción, en el desarrollo del bien producido y tiene una relevancia relativa frente a los costos directos, a continuación la siguiente detalle.

Detalle de los costos indirectos.

ítem	Descripción	cantidad	Costo Unitario USD	subtotal USD
1	Alquiler de soldadura	3	45	135
2	Alquiler de equipo de presión a calor	1	40	40
3	Pegamento de pvc	4	3.99	15.96
4	Teflón	12	0.25	3
5	Estilete	1	1	1
6	Clavos (lb)	1	0.75	0.75
7	Llama roja (lt)	2	5	10
8	Disolvente (lt)	1	1.45	1.45
9	Envase plástico pomo (gl)	6	0.74	4.44
10	Agua destilada (gl)	1	9	9
11	Guantes cirurgicos (unidad)	1	9	9
12	Papel filtro (pliego)	1	1	1
13	viáticos (3 personas)	3	100	300
			TOTAL	355.6

Fuente: los autores

COSTOS TOTAL DEL PROYECTO.

Se puede apreciar el costo total del proyecto.

TABLA N° Costo total del proyecto.

ítem	Descripción	Cantidades	Costo unitario USD	Subtotal USD
1	COSTO DIRECTO	-	-	2499.31
2	COSTO INDIRECTO	-	-	355.6
			TOTAL	2845.91

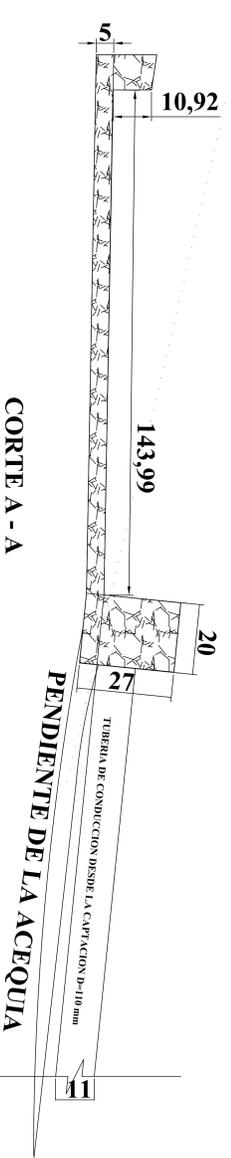
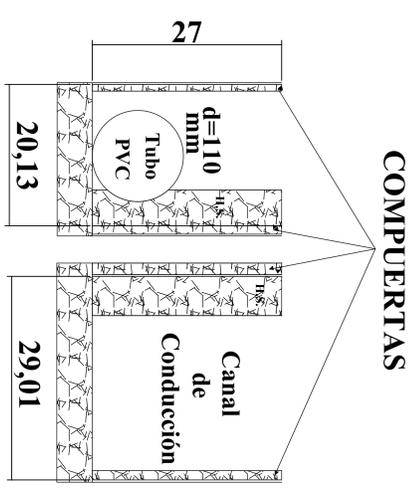
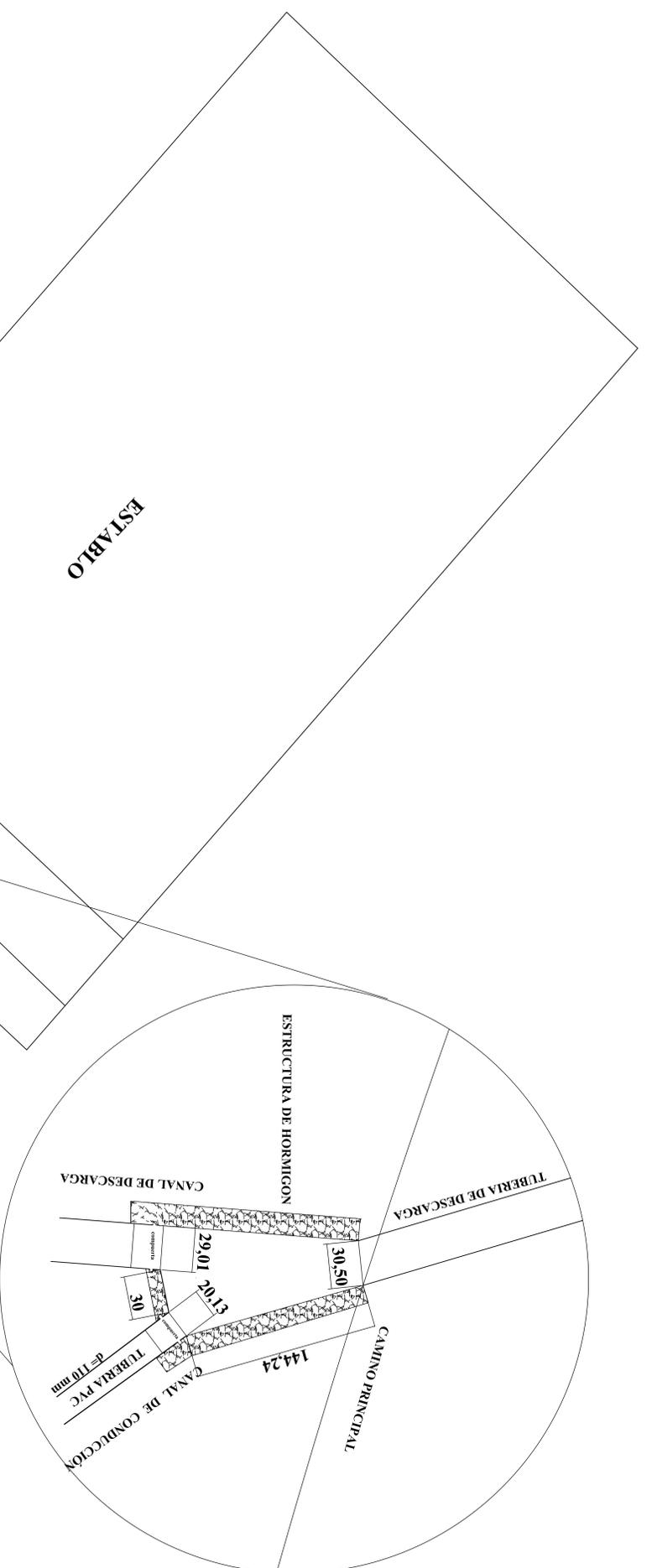
Fuente: los autores.

Por lo tanto se concluye que el costo total del proyecto es de 2837,75 (dos mil ochocientos treinta y siete con setenta y cinco centavos de dólares).

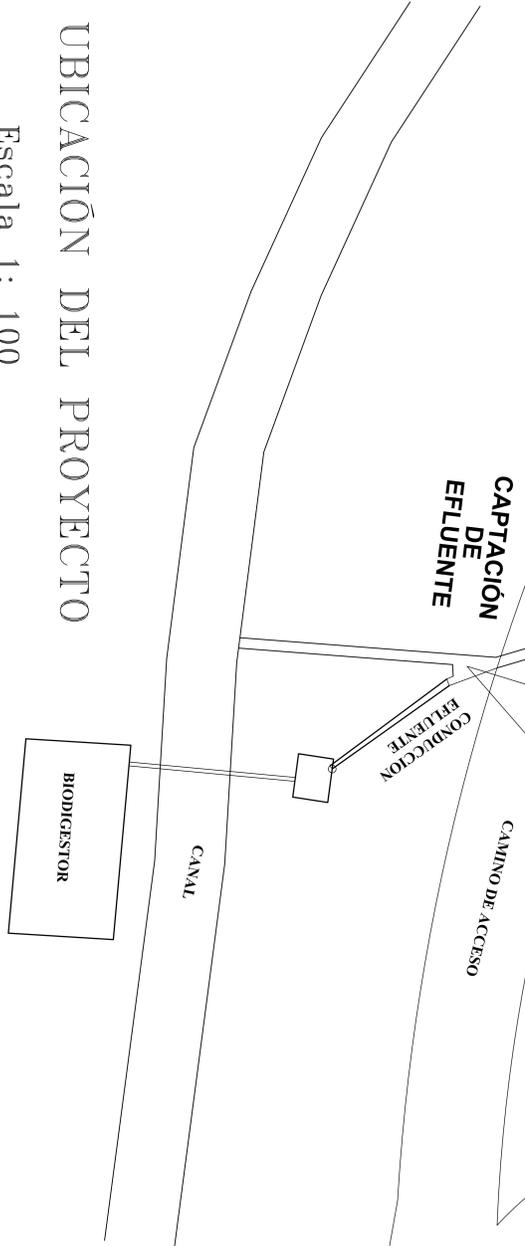
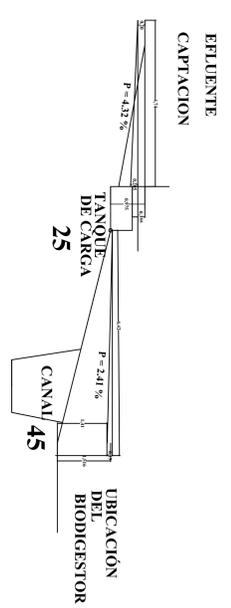
ANEXO III

DETALLE DE LOS DISEÑOS DEL PROYECTO.

CAPTACIÓN DEL EFLUENTE



CORTE VERTICAL DEL PROYECTO



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

DIRECTOR **ING. SERVIO ASTUDILLO**

DISEÑO: **LOS AUTORES**

APROBADO: **ING. SERVIO ASTUDILLO**

* IMPLEMENTACIÓN DE UN BIODIGESTOR EN LA DEPURACIÓN DE AGUA RESIDUAL CON ESTIÉRCOL DE GANADO BOVINO *

UBICACION DEL PROYECTO, DETALLE CAPTACION

CORTE VERTICAL DEL PROYECTO

FECHA: NOVIEMBRE 2011

DIBUJO: Los autores

ESCALA: 1 : 100

PLANO: 1 DE 3