

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA E INGENIERIA DE ALIMENTOS



**PROPUESTA PARA UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE  
AGUAS RESIDUALES DEL ESTABLO DE GANADO BOVINO  
PERTENECIENTE A LA ESTACIÓN EXPERIMENTAL DE LA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS DE LA  
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

PRESENTADO POR:

**ROCÍO CORINA GUEVARA LOZANO  
TANIA MAREYLI MARTÍNEZ ORELLANA**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERA QUÍMICA**

CIUDAD UNIVERSITARIA, OCTUBRE, 2017

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**RECTOR:**

**MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO**

**SECRETARIO GENERAL:**

**MSC. CRISTOBAL HERNAN RIOS BENITEZ**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**DECANO:**

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCON SANDOVAL**

**SECRETARIO:**

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS**

**DIRECTOR:**

**INGA. TANIA TORRES RIVERA**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA E INGENIERIA DE ALIMENTOS

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERA QUÍMICA**

Título:

**PROPUESTA PARA UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE  
AGUAS RESIDUALES DEL ESTABLO DE GANADO BOVINO  
PERTENECIENTE A LA ESTACIÓN EXPERIMENTAL DE LA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS DE LA  
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

Presentado por:

**ROCÍO CORINA GUEVARA LOZANO**

**TANIA MAREYLI MARTÍNEZ ORELLANA**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Asesores:

**M. I. ALBA MARISELA SARAVIA CORTEZ**

**DR. ING. AGR. REYNALDO ADALBERTO LOPEZ LANDAVERDE**

**SAN SALVADOR, OCTUBRE 2017**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Asesores:

**M. I. ALBA MARISELA SARAVIA CORTEZ**

**DR. ING. AGR. REYNALDO ADALBERTO LOPEZ LANDAVERDE**

## AGRADECIMIENTOS

### COMO GRUPO AGRADECEMOS A:

A Dios Todopoderoso Rey del universo que nos ha permitido finalizar nuestro trabajo de graduación y nuestra carrera universitaria.

A la Escuela de Ingeniería Química por sus enseñanzas y colaboración para emprender el presente trabajo de graduación en especial a Inga Tania Torres, Inga Cecilia de Flamenco, Inga Eugenia Gamero y nuestra asesora Inga Marisela Saravia, gracias por su guía profesional, su tiempo y apoyo incondicional; Ing. Saturnino Gámez por el apoyo y por creer al igual que nosotros en este proyecto. Así mismo a la Facultad de Ciencias agronómicas por abrir sus puertas y el apoyo.

De igual forma queremos agradecer a todas esas personas que se pusieron en total disposición para compartir experiencias técnicas, laborales y personales, enseñándonos tanto, nuestro más profundo agradecimiento por abrir las puertas de sus empresas: Ing. Diego Robles, Ing. Fernando Chavarría, Ing. Carlos Borjas e Ing. Juan Carlos Hidalgo.

Agradezco a Dios en primer lugar por bendecirme, haberme permitido llegar hasta este punto de mi vida y brindarme la sabiduría, conocimiento y fortaleza para poder seguir adelante a pesar de cada obstáculo que se presentaba en el camino. A mis queridos padres que creyeron en mí siempre, se esforzaron y me apoyaron en cada momento de mi carrera y aún me animan e inspiran a seguir con proyectos a futuro.

A mi abuela por siempre haberme cuidado, estar siempre pendiente desde mis primeros años de vida, hasta la fecha; a mi hermana por apoyarme y escucharme en cada momento, a mi novio por su cuidado y confianza en cada etapa de esta carrera, y brindarme su confianza, creyendo siempre que lograría esta meta.

A todos los docentes mediante los cuales fui formada y que conforman un pilar fundamental de mi vida; en especial a Magdalena de Jesús Serrano por haberme formado en mis primeros años de escuela e inculcado muchos valores, costumbres y hábitos que me ayudaron a continuar hasta profesionalizarme.

A mi compañera Rocío por su dedicación, entrega, esfuerzo y trabajo a lo largo de este proyecto, por compartir conmigo muchos momentos y experiencias que nos marcaron como personas; a su abuela por recibirme siempre en su hogar con una sonrisa y de manera acogedora; a su hermano por siempre haber estado pendiente y brindarnos su ayuda cuando lo necesitamos.

“Ve tan lejos como puedas ver, y cuando llegues allí, verás más lejos”.

*Orison Swett Marden.*

**Tania Martínez**

Primero quiero agradecer a Dios todopoderoso por permitirme terminar nuestro trabajo de graduación, bendecir mi vida a lo largo de toda la carrera y darme las fuerzas para continuar día tras día, así mismo a mi amada abuelita por apoyarme desde el primer momento, creer en mí siempre, estar junto a mí en los peores y mejores momentos, darme ánimos y tantos consejos.

A mis tíos Jairo y Sandra Camargo que son y serán un pilar fundamental en mi vida, gracias por apoyarme en todos mis proyectos, a mi tía Lorena, a mis hermanos Hugo y Leopoldo, y a todos esos compañeros de estudios, amigos con los que he compartido tantas experiencias, en especial a Dora Marcela Villeda por su entrega a este proyecto por dar lo mejor, Alberto Rodrigo Jiménez por su colaboración; por la amistad y cariño Verónica Arévalo, Rebeca Hernández y a la Asociación de Ingeniería Química y Alimentos por abrir sus puertas.

A todos esos docentes que marcaron mi educación, que transformaron mi forma de pensar y llenaron de ilusiones e ideales que han guiado y guiarán por siempre mi vida, entre ellos Licda Ruth María Navas por creer desde siempre en mí y animarme a nunca desmayar y enseñarme lo valiosas que somos las mujeres, al Maestro Darío Hernández gracias por su dedicación y esfuerzo por enseñar en las áreas más trascendentales para la carrera universitaria.

Agradezco a mi compañera de tesis Mareyli por comprometerse, seguir adelante siempre, y por compartir tantas experiencias y decisiones que nos transformaron y brindaron muchísimo aprendizaje.

“La verdadera tragedia es la del hombre que nunca en su vida se impulsa para un esfuerzo supremo, nunca utiliza todo su potencial, nunca llega a su plena estatura”.

*Arnold Bennett*

**Rocío Guevara**

## RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se desarrolla una propuesta de tratamiento para la gestión de las aguas residuales de lavado de estiércol procedente del establo de ganado bovino perteneciente a la Estación Experimental de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador, buscando con ello disminuir la contaminación al medio ambiente.

Para lograr lo anterior se realizó una caracterización fisicoquímica y microbiológica de tales aguas residuales para así determinar el grado de contaminación de las mismas; además, se calculó la cantidad de agua residual descargada; también se realizaron pruebas, entre las que predominan: Pruebas de Jarras y Test de Actividad Metanogénica Específica para determinar la viabilidad de un tratamiento fisicoquímico y anaeróbico respectivamente y con base en estos resultados, se seleccionó como alternativa de tratamiento primario la digestión anaeróbica, llegándose a proponer dos tipos de biodigestores de polietileno con la finalidad de proveer a la propuesta la posibilidad de adaptarse a la disponibilidad económica al momento de ponerse en marcha.

Los resultados obtenidos con esta propuesta fueron muy positivos, ya que con la configuración de tratamiento planteada se logró llevar siete parámetros que se exigen por normativa y que sobrepasaban significativamente los máximos establecidos antes del tratamiento a valores muy por debajo de los máximos permitidos; dándole por tanto a los efluentes generados las características para aplicarse en actividades agrícolas como riego y uso en forma de fertilizante, con la posibilidad de sustituir hasta con el cien por ciento del consumo de gas propano en el Departamento de Agroindustria por medio del aprovechamiento del biogás generado en la Estación Experimental.

Los autores de esta propuesta ponen a disposición de los pequeños ganaderos o cualquier persona interesada esta información, para el dimensionamiento de un sistema de tratamiento de aguas residuales de origen ganadero que se desee emprender, o si se desea conocer a cerca del dimensionamiento de forma puntual de biodigestores de polietileno que es la alternativa de digestión propuesta.

## INDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	viii
INTRODUCCION.....	1
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES .....	2
1.1 Planteamiento del problema.....	2
1.2 Alcances.....	5
1.3 Objetivos .....	6
1.4 Justificación .....	7
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	8
2.1 Descripción General del establo de ganado.....	8
2.1.1 Ubicación Geográfica.....	8
2.1.2 Descripción de Actividades realizadas en el establo .....	9
2.1.3 Saneamiento actual.....	12
2.2 Contaminación generada por establos.....	13
2.2.1 Composición de excretas ganaderas en general .....	14
2.2.2 Contaminación de agua.....	16
2.2.3 Contaminación del suelo .....	16
2.2.4 Contaminación del aire .....	18
2.3 Marco legal aplicable .....	19
2.4 Alternativas para el manejo de aguas residuales de establos ganaderos.....	23
2.4.1 Tratamiento de separación sólido- líquido fisicoquímica.....	24
2.4.2 Tratamiento Aeróbico.....	24
2.4.3 Tratamiento anaeróbico.....	26
CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN Y DETERMINACIÓN DE LAS CARGAS CONTAMINANTES DEL AGUA RESIDUAL .....	37

3.1 Caracterización de aguas residuales de origen ganadero.....	37
3.1.1 Aspectos Físicos.....	37
3.1.2 Aspectos Químicos .....	38
3.1.3 Aspectos Biológicos .....	39
3.2 Determinación de caudal de aguas residuales del establo de ganado.....	39
3.2.1 Cantidad de excretas producidas en el establo de ganado.....	39
3.2.2 Determinación del caudal del establo de ganado .....	41
3.3 Metodología de muestreo.....	43
3.3.1 Criterios para la selección de la técnica de muestreo .....	44
3.3.2 Puntos y momentos de muestreo .....	48
3.4 Resultados de caracterización y muestreo.....	49
<b>CAPÍTULO 4: FASE EXPERIMENTAL.....</b>	<b>50</b>
4.1 Test de Actividad Metanogénica Específica (AME) .....	50
4.1.1 Metodología a utilizar para realizar el estudio de viabilidad de producción de Biogás.....	51
4.1.2 Resultados del Test de Actividad Metanogénica (AME) .....	56
4.2 Prueba de Jarras para agua residual cruda .....	59
4.2.1 Metodología de la Prueba de Jarras .....	63
4.2.2 Resultados de Prueba de Jarras para agua cruda .....	67
4.3 Selección de alternativa de tratamiento .....	73
<b>CAPÍTULO 5: PROPUESTA DE TRATAMIENTO .....</b>	<b>77</b>
5.1 Selección del tipo de biodigestor.....	77
5.2 Desarrollo de propuesta.....	79
5.2.1 Determinación del caudal diario .....	79
5.2.2 Pre tratamiento.....	80

5.2.3 Digestión anaeróbica .....	86
5.2.4 Tratamiento secundario posterior a la biodigestor .....	103
5.2.5 Patios de secado para biodigestor y para tanque clarificador.....	109
5.2.6 Estimación teórica de la producción de biogás generado .....	112
5.2.7 Aprovechamiento de biogás generado .....	112
5.2.8 Sistema de conducción de biogás .....	114
Recomendaciones técnicas .....	125
DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	127
CONCLUSIONES.....	130
RECOMENDACIONES.....	132
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	133
ANEXOS.....	154

## INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1</i>	<i>Canal de recolección de excretas y aguas residuales.....</i>	<i>3</i>
<i>Figura 1.2</i>	<i>Ganado dentro del establo.....</i>	<i>3</i>
<i>Figura 1.3</i>	<i>Limpieza del establo por paleo.....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2.1</i>	<i>Fases de la fermentación anaeróbica y poblaciones de microorganismos.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 2.2</i>	<i>Flujo de DQO (Demanda Química de Oxígeno) en el proceso de digestión anaerobia de materia orgánica.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3.1</i>	<i>Esquema general de recolección de muestras compuestas.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 4.1</i>	<i>Configuración convencional del montaje de AME.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 4.2</i>	<i>Configuración propuesta para montaje de AME.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 4.3</i>	<i>Curva de producción de CH<sub>4</sub> acumulada.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 4.4</i>	<i>Gráfico Turbidez-pH para conocer pH óptimo, Sulfato de Aluminio al 15% p/v.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 4.5</i>	<i>Gráfico Turbidez-Dosis para conocer dosis óptima de Sulfato de Aluminio al 15% p/v.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 4.6</i>	<i>Gráfico Turbidez-pH para conocer pH óptimo con PAC al 8% p/v.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 4.7</i>	<i>Curva Turbidez-Dosis para conocer dosis óptima de PAC al 8% p/v....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 5.1</i>	<i>Modelos de biodigestores polietileno.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5.2</i>	<i>Rampa de carga para el homogeneizador primario.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 5.3</i>	<i>Dimensiones del tanque homogeneizador.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 5.4</i>	<i>Comparación de una homogeneización con y sin placas deflectora....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 5.5</i>	<i>Distribución de equipos y dimensiones de homogeneizador primario...</i>	<i>83</i>
<i>Figura 5.6</i>	<i>Rejilla de pretratamiento para la remoción de sólidos gruesos.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 5.7</i>	<i>Dimensiones de la caja de distribución del biodigestor.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 5.8</i>	<i>Configuración de la zanja para el sello hidráulico.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 5.9</i>	<i>Parámetros geométricos de biodigestor tubular y zanja trapezoidal.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 5.10</i>	<i>Forma de zanja de biodigestor tubular.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 5.11</i>	<i>Dimensiones de entrada y salida para zanja de biodigestor tubular.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 5.12</i>	<i>Inclinación de la entrada y salida en el biodigestor tubular.....</i>	<i>94</i>

<i>Figura 5.13</i>	<i>Dimensiones de la zanja del biodigestor de laguna cubierta.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 5.14</i>	<i>Figura prismatoide del tipo “Pequeño Altar” junto con sus magnitudes características.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 5.15</i>	<i>Largos de zanja del biodigestor de laguna cubierta.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 5.16</i>	<i>Anchos de zanja del biodigestor de laguna cubierta.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 5.17</i>	<i>Medidas de las dimensiones para la zanja del biodigestor de laguna cubierta.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 5.18</i>	<i>Sistema de agitación del biodigestor de laguna cubierta.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 5.19</i>	<i>Distribución del sistema de extracción de lodos.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 5.20</i>	<i>Medidas de tuberías para el sistema de extracción de lodos para biodigestor de laguna cubierta.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 5.21</i>	<i>Conexión de sistema de extracción de lodos para biodigestor tubular.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 5.22</i>	<i>Dimensiones de la laguna de Biol.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 5.23</i>	<i>Dimensiones del tanque homogeneizador secundario.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 5.24</i>	<i>Esquema de sistema de bombeo de homogeneizador a clarificador....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 5.25</i>	<i>Dimensiones y accesorios de tanque clarificador.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 5.26</i>	<i>Dimensiones para patios de secados de lodos provenientes del biodigestor.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 5.27</i>	<i>Dimensiones para patios de secado de lodos provenientes del clarificador.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 5.28</i>	<i>Sistema de conducción de biogás para biodigestores tubulares.....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 5.29</i>	<i>Sistema de conducción de biogás para biodigestor de laguna cubierta.....</i>	<i>115</i>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Composición del alimento del ganado bovino.....	9
Tabla 2.2	Composición de vitaminas y minerales del alimento del ganado bovino..	10
Tabla 2.3	Cantidad de alimento proporcionada dependiendo del tipo de bovino....	10
Tabla 2.4	Valores de excreción de heces y orina de bovino lechero.....	15
Tabla 2.5	Composición del estiércol de ganado bovino en la ingesta, retención y excreción de nitrógeno y fósforo.....	17
Tabla 2.6	Resumen de legislación aplicable.....	20
Tabla 2.7	Valores máximos permitidos presentada en la “Norma para regular la calidad de aguas residuales del tipo especial descargadas al alcantarillado sanitario”.....	22
Tabla 2.8	Valores máximos permitidos para aguas residuales del tipo especial provenientes de actividad agropecuaria bovina.....	22
Tabla 2.9	Tabla parámetros complementarios sobre valores permitidos permisibles para aguas descargadas a un cuerpo receptor.....	23
Tabla 2.10	Clasificación de los diferentes sistemas de digestión anaeróbicos.....	35-36
Tabla 3.1	Generación diaria de estiércol en el establo.....	40
Tabla 3.2	Determinación de tiempos de aforo.....	42
Tabla 3.3	Promedio diario de caudales.....	43
Tabla 3.4	Clasificación de los tipos de muestreo para aguas residuales.....	45
Tabla 3.5	Resultados de caracterización del agua residual in situ.....	49
Tabla 3.6	Resultados de caracterización de agua residual mediante análisis de laboratorio.....	49
Tabla 4.1	Valores de turbidez, debido a la variación de pH a dosis constante, Sulfato de Aluminio al 15% p/V.....	68
Tabla 4.2	Valores de turbidez, debido a variación de dosis a pH optimo, para Sulfato de aluminio al 15% p/V.....	69

<i>Tabla 4.3</i>	<i>Valores de turbidez, debido a la variación de pH a dosis constante para PAC al 8% p/V.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 4.4</i>	<i>Valores de turbidez, debido a variación de dosis a pH optimo, PAC al 8% p/V.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 4.5</i>	<i>Ventajas y desventaja del uso de los coagulantes Policloruro de Aluminio (PAC) y Sulfato de Aluminio.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 5.1</i>	<i>Parámetros en función del anchos de rollo de manga de polietileno.....</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 5.2</i>	<i>Longitud optima entre longitud y diametro del biodigestor.....</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 5.3</i>	<i>Parametros de biodigestor tubular.....</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 5.4</i>	<i>Medida de las dimensiones de la zanja y cúpula.....</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 5.5</i>	<i>Parámetros para determinación de diámetro de tubería para conducción de biogás, biodigestor tubular.....</i>	<i>117</i>
<i>Tabla 5.6</i>	<i>Parámetros para determinación de diámetro de tubería para conducción de biogás, biodigestor laguna cubierta.....</i>	<i>118</i>
<i>Tabla 5.7</i>	<i>Requisitos de remoción de distintos compuestos gaseosos de acuerdo a la aplicación en la que se utilize el biogás.....</i>	<i>122</i>

## NOMENCLATURA

a: ancho grande prismatoide

az: Ancho inferior de la zanja de biodigestor tubular

A: Altura del biodigestor de laguna cubierta

A<sub>i</sub>: Ancho inferior del biodigestor de laguna cubierta

A<sub>P.D.</sub>: Ancho de placas deflectoras

A<sub>S</sub>: Ancho superior del biodigestor de laguna cubierta

A<sub>T</sub>: Área transversal del biodigestor tubular

A<sub>z</sub>: Área transversal de la zanja

b: Largo grande prismatoide

bz: Ancho superior de la zanja

c: Ancho pequeño prismatoide

cz: Talud de la zanja

C: Perímetro del segmento de circunferencia perteneciente a la zanja

CD: Volumen de carga diaria

d: Largo pequeño prismatoide

D: Diámetro de biodigestor

DQO<sub>CH<sub>4</sub></sub>: Carga de DQO removida en R1 y convertida en metano (gDQO)

Dt: Diámetro total del tanque

h: Altura

K(t): Factor de corrección

K: Carga orgánica digerida correspondiente a una mol de CH<sub>4</sub> (64 gDQO/mol)

L: Longitud del biodigestor

L<sub>biodigestor</sub>: Longitud de biodigestor tubular

$L_{\text{campana}}$ : Longitud de la campana de gas

$L_i$ : Largo inferior del biodigestor de laguna cubierta

$L_m$ : Longitud de la tubería

$L_s$ : Largo superior del biodigestor de laguna cubierta

$m$ : Pendiente máxima en la curva producción de metano (Vol. Acumulado  $\text{CH}_4$  vs tiempo)

$M$ : masa de lodo (volumen lodo adicionado \* concentración inicial LODO) (g)

$P$ : Presión atmosférica

$P_e$ : Perímetro

$P_1$ : Presión de entrada

$P_2$ : Presión de Salida

$Q$ : Caudal

$Q'_g$ : Tasa de flujo

$r$ : radio del biodigestor

$R$ : Constante de los gases (0.08206 atm\*L/mol \* K)

$t$ : Tiempo

$T$ : Temperatura operacional del montaje

TRH: Tiempo de Retención Hidráulico

$V_{\text{CH}_4}$ : Volumen teórico de metano producido

$V_b$ : Volumen del biodigestor

$V_g$ : Volumen gaseoso

$V_l$ : Volumen líquido

$V_p$ : Volumen del prismatoride

$\alpha$ : Ángulo formado entre la vertical y las paredes de la zanja

$\theta$ : Ángulo formado entre el centro del biodigestor y las esquinas del ancho superior de la zanja.

## INTRODUCCION

En El Salvador, la importancia económica del sector agropecuario es relevante ya que alcanza el 18.9% del PIB, lo que indica que dicho sector de producción bovina se ha expandido alrededor de todo el ancho y largo del territorio salvadoreño. Según datos del IV Censo Agropecuario 2007-2008, en el sector de producción bovina existen 59,462 ganaderías, las cuales se dividen en: ganadería lechera especializada, ganadería de doble propósito y ganadería de subsistencia o familiar; esta última representa el 58% del total, lo que indica que el sector de producción bovino predomina una composición de hatos heterogénea, encaste inadecuados, desconocimiento de técnicas apropiadas de manejo de residuos y escasa utilización de tecnología ligadas (Lizano y Pérez, 2012).

Una práctica muy común en la actualidad es el almacenamiento de los desechos en especial el estiércol cerca del establo o en otros casos son diseminados en potreros indistintamente, lo que representa una fuente de problemas para la salud de los humanos, de los animales y para el medio ambiente; pues se estima que contribuyen a la emisión de gases efecto invernadero con 2.2 Gt CO<sub>2</sub>-eq/año (Gerber, Henderson y Makkar, 2013); en otros casos el estiércol y orines son desechados sin ningún tratamiento a cuerpos receptores, a falta de vigilancia por las autoridades ambientales, generando un abuso de las descargas.

Por tanto, es necesario el estudio técnico y científico de alternativas tecnológicas que incluya los pre tratamientos y tratamientos necesarios teniendo en cuenta el contexto de aplicación y características de las excretas; estas alternativas a su vez deben estar orientadas al manejo de la mejor forma de los residuos posteriores, que no solo generen beneficios ambientales a largo plazo, sino también que colaboren al impulso del sector ganadero al implementarlas.

## **CAPÍTULO 1: GENERALIDADES**

### **1.1 Planteamiento del problema**

La Facultad de Ciencias Agronómicas, posee una Estación Experimental ubicada en el departamento de La Paz, con un área de 143 manzanas, cuenta con instalaciones y recursos para la ganadería, agricultura, sistemas de riego, maquinaria agrícola, planta de procesamiento de productos agropecuarios; cada uno de estos distribuidos en diferentes áreas (Universidad de El Salvador Facultad de Ciencias Agronómicas, 2017) una de ellas es el área de ganado bovino el cual posee un establo y una sala de ordeño presentando la siguiente problemática de contaminación ambiental:

Se generan aproximadamente 300 kg/d de estiércol, ya que a diario en promedio ingresan 36 terneros, 29 vacas lecheras y sustitutas. Se opta por una total permanencia de los terneros menores de un año en el establo (figura 1.1), mientras que para las vacas y terneros de más de 1 año es únicamente de 10 h por la noche. En el día, para el ganado en general, se realizan las actividades de: ordeño, vacunación, aplicación de medicamentos y revisión rutinaria para posteriormente ser trasladados a los corrales correspondientes; esto provoca que los animales ensucien el lugar con sus excretas, la parte más gruesa es separada previamente y colocada en el suelo atrás del establo a la intemperie, la restante es llevada a un canal de concreto de aproximadamente 22.5 m de largo y 0.95 m de anchura (figura 1.2) únicamente por paleo (figura 1.3), que luego es lavado con agua direccionada a una quebrada que converge al río Cacapa, usualmente aprovechado por los pobladores para actividades domésticas y recreativas.

El manejo actual de las excretas y las aguas residuales podría representar un potencial de contaminación para las aguas subterráneas en el área, daños a la salud por problemas de exposición a bacterias y contaminantes químicos (Ting Teo, Kim Tak y Lee Myun, 2007). La sobre carga de excretas y aguas residuales como se indicó anteriormente, contaminan el aire por volatilización de la materia orgánica y la producción de gases efecto invernadero, provocan la proliferación de moscas y otros insectos desagradables que son vectores de enfermedades y contaminan los cuerpos de agua con organismos patógenos que producen elevadas cargas orgánicas e inorgánicas que limitan el oxígeno del agua

(Mazzucchelli y Sánchez, 1999). Por lo anterior es importante y necesario realizar una propuesta para el tratamiento de aguas residuales provenientes del establo, que dé una solución al problema de contaminación por una inadecuada disposición y que a la misma vez sea accesible y aprovechable en nuestro contexto nacional.



*Figura 1.1: Terneros menores de un año dentro del establo.*



*Figura 1.2: Canal de recolección de excretas y aguas residuales.*



*Figura 1.3: Limpieza de establo por paleo.*

## 1.2 Alcances

- Se determinarán los parámetros contemplados en “Reglamento Especial de Aguas Residuales”: Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Potencial de Hidrógeno (pH), Sólidos Sedimentables (SSed), Coliformes Totales (CT), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Temperatura (T) y Caudal (Q).
- Se determinará la metodología para el tipo de muestreo, luego de la inspección del área geográfica en estudio.
- Se determinará mediante la Prueba de Jarras la cantidad óptima de coagulante o floculante.
- Se efectuará el Test de Actividad Metanogénica Específica (AME) para definir el sistema de tratamiento de aguas más apropiado.
- Se determinará los parámetros de diseño del sistema seleccionado.
- Se determinará mediante eficiencias teóricas los valores estimados de los parámetros de descarga del sistema de tratamiento seleccionado, los cuales serán comparados con los valores permitidos según las normas que apliquen para su uso como agua de riego u otros usos.

### 1.3 Objetivos

#### **General:**

- Desarrollar una propuesta para un sistema de tratamiento de aguas residuales provenientes del establo de ganado bovino de la Estación Experimental de la Facultad de ciencias agronómicas.

#### **Específicos:**

- Realizar la caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua residual.
- Establecer el sistema de tratamiento fisicoquímico o biológico más apropiado, según el tipo de aguas residuales.
- Seleccionar los parámetros de diseño para el dimensionamiento del tratamiento fisicoquímico o biológico.
- Proponer la reutilización del agua residual tratada dentro de las instalaciones de la Estación Experimental.

## 1.4 Justificación

La elaboración de una propuesta para el tratamiento de aguas provenientes del establo en la Estación Experimental de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador es importante, pues tiene como beneficio primordial el poner a disposición del centro de enseñanza e investigación una alternativa accesible y aprovechable para el manejo integral del agua residual generada durante la limpieza del estiércol de ganado bovino producido en el establo, lo que contribuiría a disminuir la contaminación ambiental, y prevenir problemas de salud a la localidad, mejorando su calidad de vida. De tomarse en cuenta y realizarse la propuesta, se contribuiría a reconocer a la institución de educación como una entidad socialmente responsable y comprometida con la investigación e innovación.

El desarrollo de dicha propuesta no estará orientada únicamente a tratar las aguas residuales generadas por el estiércol de ganado bovino, sino al aprovechamiento de la forma más apropiada tanto de los productos como de los residuos en base a condiciones ambientales reales y a la vez se dé cumplimiento a las normativas nacionales aplicables, pues actualmente es vertido al suelo continuamente y sin control excediendo la capacidad de captación de nutrientes; lo que resulta un riesgo para la fertilidad del suelo y estabilidad del suelo en época lluviosa.

Se estudiará un residuo que actualmente en El Salvador no se está explotando completamente, lo que podría significar el primer paso para la intensificación del sector ganadero y ser un soporte para el impulso de nuevos proyectos de aprovechamiento y manejo de residuos ganaderos dentro de la región.

## CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 Descripción General del establo de ganado

Por naturaleza, el ganado bovino vive en los campos donde se alimentan de hierbas y pasto; aunque el hombre, para aprovechar al máximo a estos animales, ha hecho establos para que el manejo de los mismos se facilite y se maximice la producción. Según la Real Academia Española (2017), un establo es un “*Lugar cubierto en que se encierra ganado para su descanso y alimentación*” y debe diseñarse tomando en cuenta factores como la ubicación de la administración y facilidades conexas, del flujo de los animales (parto, ordeño, manejo sanitario) y el acceso al área de los alimentos y otros servicios (Andresen S., 2010). A continuación se describe el área de estudio correspondiente al establo de ganado bovino de la Estación Experimental de la Facultad de Ciencias Agronómica, Universidad de El Salvador.

#### 2.1.1 Ubicación Geográfica

En la Estación Experimental una de las prácticas que se lleva a cabo es la actividad ganadera, se cuenta con un establo destinado para el descanso y alojamiento de los bovinos durante la noche y primeras horas de la madrugada del siguiente día. Ubicado en el departamento de La Paz, en el municipio de San Luis Talpa, a latitud 13.47° Norte y longitud 89.09° Oeste a una altura de 36 m.s.n.m.<sup>1</sup> (Maps, 2017). El establo de ganado bovino está ubicado al costado Poniente de la Estación Experimental siendo de fácil acceso, pues colinda con la entrada principal a la Estación Experimental; consta de un área aproximada de 1500 m<sup>2</sup> dividida en cuatro áreas básicas:

- Área de permanencia de los especímenes.
- Área de ordeño.
- Área de preparación de los alimentos.
- Área de secado de excretas.

---

<sup>1</sup> m.s.n.m.: metros sobre el nivel del mar.

En la Anexo A1 se muestra el sector perteneciente al establo del ganado bovino, donde se pueden observar las áreas descritas anteriormente:

### 2.1.2 Descripción de Actividades realizadas en el establo

Son muchas las actividades que son realizadas en el lugar. A continuación se enlistan y explican estas actividades diarias, periódicas y ocasionales (ver Anexo A2):

- **Ordeño:** esta actividad es realizada a diario por los jornaleros entre las 4:00 y 5:00 am de cada día con las vacas de ordeño que se tienen en el establo.
- **Preparación de alimento:** El alimento del ganado bovino es preparado a diario por las personas encargadas del área y cuentan con una formulación propia para su preparación, la cual es controlada tanto por los jornaleros responsables del establo como por los estudiantes y docentes de la carrera de Licenciatura en medicina Veterinaria y Zootecnia. En la tabla 2.1 se presenta la receta utilizada para preparar el alimento del ganado correspondiente a un día:

*Tabla 2.1: Composición del alimento del ganado bovino.*

Ingrediente	Cantidad (kg)
Soya	40.9
Maíz	61.4
Afrecho	49.1
Rastrojo	25.6
Pollinaza	10.2
Urea	1.0
Carbonato	2.0
Fosfato	1.0
Sal	2.0
Sales minerales	1.0
Total	204.5 kg

*Fuente: Elaboración propia a partir de observación directa.*

Las sales minerales son agregadas mediante harina marca *Zoopack pecumin®* que es vendida comercialmente para su uso en alimento de ganado y su composición es presentada en la tabla 2.2:

*Tabla 2.2: Composición de vitaminas y minerales del alimento del ganado bovino.*

<b>Ingrediente</b>	<b>Cantidad</b>
Cloruro de sodio	22 g/Kg
Óxido de Magnesio	55.6 g/Kg
Óxido de zinc	6250 mg/Kg
Carbonato de Hierro	750 mg/Kg
Óxido de Manganeso	968 mg/Kg
Sulfato de Cobre	8000 mg/Kg
Yoduro de Potasio	92 mg/Kg
Molibdato Sódico	38.2 mg/Kg
Selenito Sódico	26.9 mg/Kg
Palminato de Vitamina A	300000 UI/Kg
Vitamina D3	50000 UI/Kg
Acetato de Tecofenol	100 mg/Kg
Laca Eritrosina (colorante)	500 mg/Kg
Fosfato de Calcio hidrogenado	CSP 1 Kg

*Fuente: Composición presentada por el empaque.*

Las cantidades de alimento proporcionadas, dependen del tipo de bovino. La tabla 2.3 proporciona una vista general de la distribución del alimento:

*Tabla 2.3: Cantidad de alimento proporcionada dependiendo del tipo de bovino.*

<b>Tipo de bovino</b>	<b>Cantidad de alimento proporcionada en libras y kilos</b>	
	<b>Libras</b>	<b>Kilos</b>
Terneros	80	36.4
Novillas	120	54.5
Vacas	250	113.6

*Fuente: Elaboración propia a partir de observación directa.*

- **Traslado de los animales:** Entre las 5:00 y 6:00 pm de cada día, los bovinos comprendidos entre vacas lecheras, vacas sustitutas y terneros mayores de un año son trasladados del potrero al establo y al amanecer, aproximadamente entre las 6:00 y 7:00 am son llevados de regreso al potrero donde pasan el resto del día hasta que de nuevo, se trasladan al establo. Cabe aclarar que se opta por una estadía total en el establo de los terneros menores de un año.
  
- **Limpieza del área de permanencia nocturna:** Esta actividad es realizada a diario para garantizar la mayor salubridad posible. Se lleva a cabo mediante el uso de agua para diluir cierta parte de las excretas y ser paleadas hasta la canaleta que tiene una longitud de 25.20 metros, un ancho de 1.33 metros y su profundidad es de 11.0 cm, para luego ser drenadas a la quebrada seca que desemboca al río Cacapa. La parte más gruesa previamente es separada y llevada a un patio trasero para su secado mediante la exposición al sol. Posteriormente es distribuida en todo el campo sin ningún acondicionamiento previo, como método de abono.
  
- **Desparasitado:** esta actividad es realizada con una periodicidad de tres meses con el medicamento *Labimectin®*, una solución al 1% *Ibermectina de Larga Acción*; cada mL contiene 10 mg del principio activo *Ibermectina*. Es un medicamento utilizado para el tratamiento y control de parásitos tanto internos como externos en forma adulta y larvaria en bovinos. Actúa contra parásitos gastrointestinales y pulmonares, combate la mosca *Dermatobia hominis*, ácaros de la sama y garrapata. La administración es por vía subcutánea o intramuscular; la dosis en bovinos es de 1mL por cada 50 kg de peso vivo.
  
- **Curaciones y tratamientos:** El tratamiento con medicamentos a bovinos que lo necesiten es una actividad que no es realizada a diario a lo largo del año, sino solamente cuando se tienen especímenes con alguna enfermedad; además, entre los tratamientos también se incluye la puesta de vitaminas de forma periódica realizándose cada tres o cuatro meses dependiendo de la necesidad mediante multivitamínicos. Entre las enfermedades más comunes indicadas por los veterinarios del establo, están:
  - Diarreas de origen bacteriano.
  - Gastroenteritis.

- Neumonía.
- Enfermedades metabólicas.
- Anomalías congénitas (Consanguinidad).

Y los medicamentos más utilizados son:

- Calfon ®.
  - Antibióticos.
  - Oxitetraciclina ®.
  - Hematopán B-12®.
- **Limpieza de la zona de ordeño:** A diario únicamente se patea la zona y se realiza un lavado del piso con agua, con mayor frecuencia, en la época de invierno. El agua residual proveniente de esta actividad es llevada a la canaleta perteneciente al área de ordeño para ser drenada a la misma quebrada seca donde se descargan las aguas residuales provenientes de la limpieza de excretas.

### 2.1.3 Saneamiento actual

Los establos de ganado bovino, se ensucian por la acumulación de excretas, combinadas con purines y desperdicios del alimento del ganado; por lo cual es necesario el saneamiento del lugar. El buen manejo del estiércol, puede ayudar a aumentar la rentabilidad global de una ganadería y reducir costes de diferentes maneras (DeLaval, 2017):

- Un establo limpio reduce los problemas de pezuñas y los costes del veterinario.
- Si las ubres están limpias, disminuye el tiempo de preparación pre ordeño y puede incrementar el rendimiento.
- Vacas más limpias significan también recuentos de células más bajos y mayor calidad de la leche.
- Reducir las emisiones es bueno para los ganaderos y para sus vacas, pero también lo es para la tierra y el suministro de agua.

En la Estación Experimental, el manejo de los residuos ganaderos bovinos generados, se desarrolla a diario por la mañana sin seguir un plan o lineamiento que forme parte de un estudio adecuado de estos residuos y del volumen de producción generado. El manejo que actualmente se lleva a cabo para estas excretas, se realiza mediante las actividades siguientes. Al costado poniente de los corrales de ordeño se recogen con rastrillo las porciones más grandes de los desechos que posteriormente son distribuidas por toda la Estación Experimental, con el fin de utilizarlo como fertilizante y para aumentar la materia orgánica de los suelos.

Los residuos líquidos que forman parte de las actividades de limpieza, lo conforman únicamente excretas que lograron disolverse y mezclarse con el agua que es incorporada mediante el drenaje de la pila más próxima que es llenada con anticipación; no se utiliza ningún producto químico o biológico para realizar un pre tratamiento de los desechos mencionados antes de eliminarlos de la zona. Estos residuos líquidos son descargados por gravedad hacia el canal de drenaje de 25.20 metros de longitud, hasta los puntos de disposición final en la superficie de terrenos aledaños colindantes con el cuerpo receptor más cercano que es una quebrada seca que en período lluvioso desemboca en el río Cacapa.

Según Pinos, García, Peña, Rendón, Gonzáles, y Tristán (2012), las aguas residuales producidas en este tipo de instalaciones poseen una alta carga orgánica, debido a lo cual las autoridades correspondientes han comenzado a buscar alternativas para un mejor manejo de las excretas que produzca una disminución en los niveles de contaminantes provenientes de estas descargas y poder cumplir con los límites permitidos de los contaminantes más importantes contemplados en normativas, reglamentos, leyes y decretos de El Salvador.

## **2.2 Contaminación generada por establos**

De acuerdo con la Propuesta de Ley General de Gestión Integral de Residuos de El Salvador se define residuo como “cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido, resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales, de servicios, que el generador abandona, rechaza o entrega

y que es susceptible de aprovechamiento o transformación en un nuevo bien, con valor económico o de disposición final (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales [MARN],2016).

Entre los diferentes tipos de residuos se encuentran los residuos de manejo especial que contienen agentes patógenos en concentraciones o cantidades suficientes para causar enfermedades (Cortés, 2013), dentro de este tipo se encuentran los de origen ganadero como resultado de la cría intensiva o extensiva de ganado y ordeño que según Rodríguez (2002) se pueden clasificar en:

- Estiércol: mezcla de residuos o desechos, excretadas por el ganado que están constituidas en su mayor parte por los alimentos que no son digeridos por el animal.
- Purines: deyecciones líquidas incluida orina.
- Agua residual: desecho constituido por estiércol, orina, leche y otros productos generados en la limpieza de instalaciones.

En el ganado bovino, se encuentran las vacas de ordeño, vacas de vientre (que son para procrear), vacas adultas (orientación ordeño y cría), bovinos de cebo o engorde y los terneros desde el destete hasta el sacrificio (Gobierno de Aragón, 2009). La cantidad de estiércol y purines generada en una explotación ganadera no es constante sino que depende de una serie de factores:

- El número de animales.
- La aptitud productiva.
- Edad de los animales.
- Método de explotación.
- Y el tipo de alimentación.

### **2.2.1 Composición de excretas ganaderas en general**

La producción de estiércol de ganado bovino por día ha sido estimada por diferentes autores y varía dependiendo de los aspectos tomados en cuenta, Pinos et al. (2012) lo estiman a partir de la aptitud productiva a la que se está destinado, indicando que son: 22

kg/ bovino de engorde, 38kg/ vaca seca y 68 kg/ vaca lactante. Figueroa, Núñez, Delgado, Cueto y Flores (2009) estiman la cantidad de estiércol en base húmeda y orina con la clasificación de ganado bovino lechero productivo o no (ver tabla 2.4):

Tabla 2.4: Valores de excreción de heces y orina de ganado bovino lechero.

Residuo	kg vaca <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup>	
	Productivas	No productivas
Estiércol	43.2	19.4
Orina	23.1	12.2
Total	66.3	31.6

*Nota: Vacas productivas: peso promedio= 630 kg, Ingesta Diaria de Materia Seca (IDMS)=21 kg y Proteína Cruda (PC)=17.5%. Vacas secas: peso promedio= 755 kg, IDMS=10.4 kg y PC= 13.3%. Vaquillas: peso promedio=437 kg, IDM= 8.34 kg y PC=11.2%. Fuente: Figueroa Viramontes, Núñez Hernández, Delgado, Cueto Wong, y Flores Margez, 2009.*

Un bovino sano orina en promedio 9 veces al día, la proporción estiércol/orina es de 1:3. Se espera que las vacas lecheras orinen y defequen una mayor cantidad de veces por las mañanas que las vacas no productoras. La orina contiene aproximadamente 70% de nitrógeno que se excreta en forma de urea, convirtiéndose en amonio y nitratos, además de aportar potasio y azufre. Estos elementos pueden ser fácilmente absorbidos por las plantas (Antúnez, 2015).

Todo lo anterior indica el gran valor como fertilizante que tiene a priori las excretas pues genera un beneficio ecológico al depositar nutrientes como nitrógeno y fósforo en el suelo, por sus características orgánicas aumenta la capacidad de retención de agua, el intercambio catiónico y la filtración de agua al subsuelo, y reduce la erosión (Capullin, Núñez, Etchevers y Baca, 2001), pero la intensificación de la explotación ganadera generada en las últimas décadas induce a la concentración de animales en superficies reducidas de terreno, convirtiendo los residuos de los animales en un problema de gestión y en un foco de contaminación para el entorno, en especial para el agua, aire y suelo.

### **2.2.2 Contaminación de agua**

El agua es contaminada por excretas ganaderas directamente a través de escurrimientos, infiltraciones y percolación profunda en los establos, e indirectamente por esorrentías y flujos superficiales desde zonas de pastoreo y tierras de cultivo. Cuando el animal se alimenta con exceso de minerales y éstos no son absorbidos, se eliminan en la defecación y así pueden llegar a los cuerpos de agua. Las masas de agua se ven afectadas por los nitratos que llegan por medio de filtración o escurrimientos, aunque el nitrógeno puede llegar también por precipitación del amonio (generado en el estiércol) y para poder ser usado por los cultivos debe ser oxidado a ion nitrato por bacterias nitrificadoras (EPA 2006). Pinos et al. (2012) señalan que la contaminación por nitratos se presenta cuando rebasan los 45 mg/L; estos pueden llegar a aguas subterráneas por lixiviación; el contacto prolongado de dichas aguas con humanos puede causar metahemoglobinemia, debido a los altos contenidos de nitratos, pues reducen la capacidad de transporte de oxígeno en la sangre (Miner, Humenik y Overchash, 2000).

#### **Transferencia de microorganismos patógenos.**

El estiércol de animal es una fuente potencial de microorganismos patógenos. Entre los patógenos de interés se encuentran: *Escherichia coli* (*E. coli*) causante de diarrea y dolores abdominales, *Salmonella* causante de fiebres, diarreas y la fiebre tifoidea, así como *campylobacter* y *cyptosporidium parvum* (*C. parvum*), que pueden ser transferidos de animal a seres humanos. Recientemente estos patógenos se han encontrado en ríos y desagües, siendo atribuidos a la presencia de fuentes de nutrientes en exceso; algunos de las cuales provenientes de zonas de producción ganadera y donde se generaban esorrentías de estiércol de ganado (Humenik, 2001).

### **2.2.3 Contaminación del suelo**

El suelo puede ser seriamente afectado por el estiércol si contiene concentraciones altas de nutrientes en especial nitrógeno y fósforo, que facilitan la propagación de microorganismos patógenos y compuestos que interactúen con el sistema endócrino

(hormonas esteroidales, fitoestrógenos, plaguicidas y herbicidas). En países donde las regulaciones ambientales son imprecisas o no existen, el estiércol se deposita en el suelo continuamente, excediendo la capacidad de captación de nutrientes por los cultivos. Las excretas de ganado bovino frescas, esparcidas en áreas de cultivo contienen nitrógeno en forma de nitratos y nitritos; la forma de acumulación de estos compuestos oxidados en el cultivo puede causar intoxicación en el ganado que los consuma (Reátegui, 2015).

Los constituyentes inorgánicos de importancia ambiental contenidos en las excretas son el nitrógeno y el fósforo (Penman, Gytarsky, Hiraishi, Irving y Krug, 2006) los resultados de composición del estiércol que incluye la ingesta, retención y excreción de nitrógeno y fósforo, son presentados en la tabla 2.5:

*Tabla 2.5: Composición del estiércol de ganado bovino en la ingesta, retención y excreción de nitrógeno y fósforo.*

ESPECIE	CONSUMO		RETENCION		EXCRECIÓN	
	N	P	N	P	N	P
<i>Bovino lechero en sistema tecnificado</i>	163.7	22.6	34.1	5.9	129.6	16.7
<i>Bovino lechero en sistema de baja producción</i>	39.1	6.7	3.2	0.6	35.9	6.1

*Fuente: Pinos et al., 2012.*

Tal como se puede observar, se tienen cerca del 50% de pérdidas en nitrógeno y fósforo debido a los procesos naturales de la digestión del animal que no pueden ser controlados, lo que puede significar el aporte de nutrientes superiores a la capacidad de absorción de las plantas o la aportación de nutrientes en momentos inadecuados, con lo que es suficiente para la introducción de contaminantes a un curso de agua superficial o subterráneo, a través de vías indirectas y desde fuentes que no es posible establecer con exactitud y puntualmente; siendo muy difícil encontrar a los responsables directos, a lo que se denomina: contaminación difusa (Alfaro y Salazar, 2005).

#### **2.2.4 Contaminación del aire**

Los residuos ganaderos crean dos tipos de problemas desde el punto de vista de la contaminación atmosférica, por un lado estaría la producción de malos olores y por otro la emisión de contaminantes a la atmósfera:

- **Contaminación por olores**

Muchos de los procedimientos desarrollados en el marco de la producción ganadera dan como resultado la emisión de una serie de olores que se ha convertido en fuente de conflictos entre el ganadero y la sociedad. Los gases responsables de los olores son principalmente compuestos de bajo peso molecular, que se liberan en el curso de la fermentación anaerobia del estiércol. Se han identificado cerca de 100 compuestos olorosos producidos en la explotación ganadera, siendo los más importantes el amoníaco, las aminas, los mercaptanos, los ácidos orgánicos y determinados compuestos heterocíclicos nitrogenados (Mazzucchelli y Sánchez, 1999).

- **Contaminantes atmosféricos**

La contaminación de la atmósfera por residuos ganaderos se presenta principalmente por producción de polvo y generación de gases de efecto invernadero y gases acidificantes donde el metano y óxido nitroso son los gases de efecto invernadero principales. El polvo se genera en mayor cantidad en explotaciones ganaderas ubicadas en zonas áridas, ya que cuando la vegetación es removida en su totalidad, en la parte superior del suelo se genera una capa de estiércol y al momento de que el ganado se mueve se producen nubes de polvo (Blanco 2009).

En El Salvador el ganado es en su mayor parte bovino, complementado con pequeñas proporciones de cabras y ovejas. Además, existen explotaciones avícolas y porcinas. Las emisiones de CH<sub>4</sub> generadas por animales domésticos, debido a la fermentación entérica según el Segundo Comunicado Nacional sobre Cambio Climático, para el año 2013 representaba el 91.26% del total de emisiones de CH<sub>4</sub> emitido por este sector. Entre los animales domésticos, el ganado bovino es el mayor emisor de metano con 69.22 Gg que equivalen a 1453.71 Gg de CO<sub>2</sub>, es decir, un 46% de las emisiones totales del sector

agricultura. El mismo informe indica que aún cuando en El Salvador no se reportan lagunas u otro tipo de tratamiento para el manejo de estiércol de animales, se estima que las emisiones de metano provenientes del manejo de estiércol representan el 2.2% de las emisiones de CH<sub>4</sub> del sector ganadero.

### 2.3 Marco legal aplicable

Es recomendable considerar los niveles máximos permitidos en las descargas de aguas residuales de uso ganadero de acuerdo a la normativa que rige cada país. En Centroamérica se han desarrollado lineamientos por cada uno de los países que integran esta región en relación a las aguas residuales, sin embargo se puede apreciar una debilidad en las instituciones y en el marco legal del sector. Algunas de las manifestaciones en relación a la debilidad antes mencionada son: pocas plantas de tratamiento para este tipo de aguas residuales, falta de planes de construcción de plantas, debilidad de operadores de sistemas, falta de monitoreo y seguimiento de los sistemas (Foro centroamericano y República Dominicana de agua potable y saneamiento, 2014).

En el caso de El Salvador se tienen las siguientes legislaciones cuyo objetivo principal es velar por mejorar la calidad de vida de la sociedad proveyendo la regulación pertinente a las aguas residuales y el tratamiento de las mismas. La tabla 2.6 resume las normativas aplicables:

Tabla 2. 6: Resumen de legislación aplicable.

LEGISLACIÓN Y ARTICULO APLICABLE	DESCRIPCIÓN
<p><b>Decreto N 50 Reglamento sobre la calidad del agua, el control de vertidos y las zonas de protección.</b> Art. 35 – 42.</p>	<p>Entró en vigencia en octubre de 1987; y trata sobre la calidad del agua, el control de vertidos y las zonas de protección, con el objetivo de evitar, controlar o reducir la contaminación de los recursos hídricos.</p>
<p><b>Decreto N 39 Reglamento especial de aguas residuales, año 2000.</b> Art. 7, 8, 11 y 15</p>	<p>Entró en vigencia en junio del año 2000. Tiene por objeto velar porque las aguas residuales no alteren la calidad de los medios receptores, para contribuir a la recuperación, protección y aprovechamiento sostenibles del recurso hídrico respecto de los efectos de la contaminación. También incluye un listado de análisis, dependiendo del tipo de agua residual a descargar, necesarios y obligatorios según esta norma.</p>
<p><b>Norma para regular la calidad de aguas residuales de tipo especial descargadas al alcantarillado sanitario.</b></p> <p>Todos los artículos son aplicables.</p>	<p>Entró en vigencia el 01 de enero de 2005; y tiene por objeto regular las descargas de aguas residuales para proteger los sistemas de alcantarillado sanitario y evitar las interferencias con tratamientos biológicos.</p>
<p><b>Norma Salvadoreña Obligatoria: NSO.13.49.01:09 “Aguas. Aguas residuales descargadas a un cuerpo receptor”.</b></p> <p>Todos los artículos son aplicables.</p>	<p>Entró en vigencia el 11 de marzo de 2009; y establece las características y valores físico-químicos, microbiológicos y radioactivos permisibles que debe presentar el agua residual para proteger y rescatar los cuerpos receptores. Se aplica en todo el país para la descarga de aguas residuales vertidas a cuerpos de agua que son receptores superficiales. Esta norma clasifica las aguas residuales en dos tipos: Aguas residuales de origen doméstico y Aguas residuales del tipo especial; donde la última clase se subdivide de nuevo, atendiendo al origen de las descargas.</p>
<p><b>Anteproyecto de la Ley del Agua.</b> Art. 19, 20, 76, 103-111</p>	<p>Este documento se encuentra como anteproyecto de ley desde el 22 de marzo de 2012, hasta la fecha. Es de orden público y tiene como objeto regular la gestión integral de las aguas continentales, insulares, estuarias y marinas dentro del territorio nacional, cualquiera que sea su ubicación, estado físico, calidad o condición natural, para garantizar su sustentabilidad y el derecho al agua para la vida de todas las personas habitantes del país.</p>

Fuente: Elaboración propia a partir de recopilación y lectura de las legislaciones aplicables.

En los documentos pertenecientes a la legislación aplicable, se encuentran segmentos dedicados a la estimación de parámetros y la presentación de los límites máximos permisibles de interés para el tratamiento de aguas residuales en especial, las de origen ganadero. Las cuales son:

- Reglamento especial de Aguas Residuales: para el caso de aguas residuales del tipo especial, en el artículo 15 cita de la siguiente forma los análisis obligatorios a realizar:

**“Art. 15:** *En los análisis de las características físico- químicas y microbiológicas de las aguas residuales de tipo especial vertidas a un medio receptor, deberán ser determinados esencialmente los valores de los siguientes componentes e indicadores:*

- a) *Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>);*
  - b) *Demanda Química de Oxígeno (DQO)*
  - c) *Potencial de hidrógeno (pH)*
  - d) *Grasas y Aceites (GyA)*
  - e) *Sólidos sedimentables (Ssed)*
  - f) *Sólidos suspendidos totales (SST) y*
  - g) *Temperatura (T)*
- Norma Para Regular Calidad De Aguas Residuales De Tipo Especial Descargadas Al Alcantarillado Sanitario: en el inciso 4 se encuentran los valores máximos permitidos de cada componente contaminante que provenga de aguas residuales del tipo especial. Los valores de interés para vigilar en el caso tratado se presentan en la tabla 2.7:

Tabla 2. 7 Valores máximos permitidos presentada en la “Norma para regular la calidad de aguas residuales del tipo especial descargadas al alcantarillado sanitario.”

Parámetro	Unidades	Valor máximo permisible
Aceites y grasas	mg/L	150
DBO <sub>5</sub>	mg/L	400
DQO	mg/L	1000
pH*	mg/L	5.5 – 9.0
Sólidos sedimentables	mg/L	20
Sólidos suspendidos totales	mg/L	450
Temperatura*	°C	21 – 35

Nota: \*Deberán ser determinados in situ. Fuente: NORMA PARA REGULAR CALIDAD DE AGUAS RESIDUALES DE TIPO ESPECIAL DESCARGADAS AL ALCANTARILLADO SANITARIO, 2005.

- Norma salvadoreña de aguas residuales descargadas a un cuerpo receptor: en la que se encuentran los límites máximos permisibles para las descargas de aguas residuales del tipo especial, de origen ganadero. En las tablas 2.8 y 2.9 se presentan los valores:

Tabla 2. 8 Valores máximos permitidos para aguas residuales del tipo especial provenientes de actividad agropecuaria bovina.

Actividad	DQO (mg/L)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	Sólidos sedimentables (mg/L)	Sólidos suspendidos totales (mg/L)	Aceites y grasas (mg/L)
<b>I. ANIMALES VIVOS Y PRODUCTOS DEL REINO ANIMAL</b>					
Producción agropecuaria	800	300	15	150	50

Fuente: Norma salvadoreña NSO 13.49.01:06 “AGUAS RESIDUALES DESCARGADAS A UN CUERPO RECEPTOR”.

Tabla 2.9: Tabla parámetros complementarios sobre valores permitidos permisibles para aguas descargadas a un cuerpo receptor.

Parámetros	Unidad de medición	Valores máximos permisibles
Coliformes totales	NMP/100 mL	10,000
pH	Unidades	5.5 – 9.0
Temperatura	°C	20 – 35 °C
Turbidez (Turbiedad)	NTU	No se incrementará en 5 unidades la turbidez del cuerpo receptor

Fuente: Norma salvadoreña NSO 13.49.01:06 “AGUAS RESIDUALES DESCARGADAS A UN CUERPO RECEPTOR”.

#### 2.4 Alternativas para el manejo de aguas residuales de establos ganaderos

El objetivo de un tratamiento de agua residual es de proteger la calidad de las aguas receptoras de los efluentes de establos y esto se logra por medio de sistemas depuradores diseñados para: reducir la DBO<sub>5</sub>, SST y Coliformes totales. Por lo que se dirige a lo largo de una serie de procesos físicos, químicos y biológicos en los que cada uno posee una función para reducir una carga contaminante específica. Estas etapas son típicamente:

**Pre tratamiento:** Es el proceso o procesos que preparan las condiciones del agua residual para que pueda someterse a posteriores procesos de tratamiento secundarios biológicos convencionales, entre los tipos de pre tratamiento están: homogenización, rejillas de gruesos, eliminación de arenas y lavado con aire.

**Tratamientos primarios** son aquellos que eliminan los sólidos en suspensión presentes en el agua residual. Los principales procesos fisicoquímicos que pueden ser incluidos, son: clarificación, sedimentación o decantación. En este proceso unitario el agua residual se deja decantar durante un período en un tanque y producir así un efluente clarificado en una línea y un fango líquido en una segunda línea. El objetivo es producir un efluente

líquido de calidad aprovechable para la siguiente etapa de tratamiento, es decir el tratamiento secundario.

**Tratamientos secundarios:** el objetivo principal es la reducción del valor de DBO<sub>5</sub>; debe ser un proceso capaz de biodegradar la materia orgánica en productos no contaminantes como por ejemplo H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> y biomasa (o fangos). La biodegradación es el mecanismo dominante para la eliminación de compuestos orgánicos en las aguas residuales.

A continuación se expondrán los tres tipos de tratamientos más utilizados que corresponden a la clasificación de tratamientos secundarios:

#### **2.4.1 Tratamiento de separación sólido- líquido fisicoquímica**

El tratamiento por separación sólido-líquido fisicoquímico se refiere a un método de transferencia de partículas suspendidas en una solución sólida, separable mediante algún sistema de separación sólido-líquida. Estas partículas se caracterizan por tener un tamaño muy pequeño y por no sedimentar de manera natural, debido a su tamaño natural. Para conseguir que estos coloides sean decantables se requiere la ayuda de agentes químicos, para provocar la coagulación y/o la floculación. Los floculantes facilitan la aglomeración o la agregación de las partículas, previamente coaguladas o no, para formar flóculos más grandes y facilitar la sedimentación por gravedad o la separación por flotación. Las partículas coloidales de carga superficial negativa normalmente están constituidas de materia orgánica. Cuando se desea separar un compuesto en dilución, debe encontrarse un compuesto químico con el que forme una sal que precipite. Son coagulantes habituales el sulfato de aluminio, el sulfato de hierro o el cloruro de hierro y policloruro de aluminio (Pozuelo, Magrí, Illa, Solé y Flotats, 2004).

#### **2.4.2 Tratamiento Aeróbico**

El tratamiento aeróbico es un proceso biológico, cuyo principio es el uso de oxígeno libre o disuelto por microorganismos (aerobios) en la degradación de desechos orgánicos. Los microorganismos aeróbicos requieren oxígeno como un terminal aceptor de electrones donados por sustancias orgánicas e inorgánicas (Lawrence, Wang, Tay y Hung, 2010).

Se indica que un tratamiento aeróbico elimina materia orgánica biodegradable del agua residual y que consiste básicamente en el funcionamiento de dos fases simultáneas: la primera fase es la oxidación biológica que tiene sub-productos como dióxido de carbono y agua, lo que produce energía. La segunda fase utiliza la energía de la primera para la síntesis de las nuevas células, como muestra la siguiente reacción simplificada:



*Ecuación 2. 1*

El oxígeno debe ser suministrado continuamente y en las cantidades requeridas dependiendo de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), solo la fracción del residuo que ha sido oxidado puede ser considerada estabilizada. En un adecuado ambiente (con cantidades suficientes de alimento y oxígeno) las bacterias aeróbicas tiene un ciclo que comienza con un período de climatización; entonces ellas se reproducen a un ritmo exponencial. Durante este período, el consumo de oxígeno incrementa rápidamente, el sustrato (residuos orgánicos) es consumido y la masa de las células incrementa, la etapa final del ciclo es el metabolismo endógeno donde bajos niveles de oxígeno y nutrientes son necesarios; cuando los nutrientes disponibles disminuyen por debajo de los niveles necesarios para sobrevivir, entonces la energía u otros factores en el ambiente se vuelven insatisfactorios para el mantenimiento de la vida y las células se desintegran, aumentando los nutrientes para las que sobrevivan.

Un parámetro importante es la relación F/M (alimento a microorganismos) que es el parámetro de mayor utilidad a la hora de diseñar y operar sistemas aeróbicos, pues son procesos continuos con crecimiento y muerte de organismos. Un sistema alcanza el equilibrio cuando la cantidad de sustrato y los microorganismos que lo consumen se igualan, otro parámetro importante lo indica Zhu (2008), los cuales son los niveles de oxígeno disuelto que deben ser igual de un tercio a un medio de la carga de DBO, que es recomendada para el control de olores, además indica que algunos reportes de estudios de laboratorio muestran que el mantenimiento del nivel de oxígeno disuelto debe ser de 0.5 mg/L. La cantidad total de oxígeno requerido en el proceso de aireación depende de la demanda de oxidación de los microorganismos del agua residual, que puede ser estimada

basado en estos parámetros: demanda bioquímica satisfecha, amoníaco-oxígeno, oxidado y oxígeno disuelto para el crecimiento microbiano.

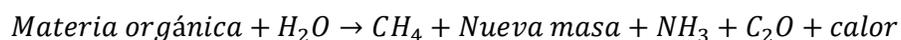
### **Aireación**

La introducción de aire dentro del agua residual, es una técnica bien establecida; se emplea a menudo como un método in situ para lograr que la descarga de aguas residuales logren los niveles establecidos por la ley o para reducir los costos de tratamiento, en una variedad de entornos. Funciona estimulando la biomasa residente con un suministro adecuado de oxígeno, en el mantenimiento de los sólidos en suspensión y ayudando a mezclar el efluente para lograr las condiciones óptimas, lo que también ayuda a eliminar el dióxido de carbono producido por la actividad microbiana. Al mismo tiempo, la aireación puede tener un efecto floculante, cuya extensión depende de la naturaleza del efluente (Evans y Furlong, 2003).

### **2.4.3 Tratamiento anaeróbico**

Existe un creciente interés en los procesos anaeróbicos (en contraposición al tratamiento aeróbico) con el fin de reducir el consumo de energía, una meta deseada debido a las preocupaciones del cambio climático, pues el tratamiento aeróbico convencional consume energía. El proceso unitario de tratamiento de digestión anaeróbica se emplea en todo el mundo para la depuración de aguas residuales y fangos. Estos reactores han ganado popularidad, porque producen menos residuos sólidos que otros tipos de tratamiento (Loupasaki y Diamadopoulos, 2013). La producción de biogás puede ser usada para generar calor o electricidad, o ambos.

Kiely (1999) indica que por definición, la digestión anaeróbica (D/A) es: “la utilización de microorganismos, en ausencia de oxígeno, para estabilizar la materia orgánica por conversión a metano y otros productos inorgánicos incluyendo dióxido de carbono”:



*Ecuación 2. 2*

Frecuentemente este proceso se emplea como primera etapa de tratamiento en residuos de alta carga orgánica. El objetivo en el uso de la D/A es el reducir las altas cargas orgánicas a valores de DQO que puedan emplearse en procesos aerobios tradicionales.

Entre los residuos de la agricultura que pueden tratarse por D/A se incluyen:

- Ganadería porcina.
- Ganadería avícola.
- Ganadería bovina.
- Residuos de granja.
- Despojos de animales.
- Productos residuales: de cosechas, etc.

### ***Fases de la digestión anaeróbica***

La digestión anaerobia está caracterizada por la existencia de varias etapas consecutivas diferenciadas en el proceso de degradación del sustrato (término genérico para designar, en general, el alimento de los microorganismos), interviniendo 5 grandes poblaciones de microorganismos (ver figura 2.1) (Nidal, Grietje y B. van Lier, 2008). Estas poblaciones se caracterizan por estar compuestas de seres con diferentes velocidades de crecimiento y diferente sensibilidad a cada compuesto intermedio como inhibidor (por ejemplo, H<sub>2</sub>, ácido acético o amoníaco producido de la acidogénesis de aminoácidos). Esto implica que cada etapa presentará diferentes velocidades de reacción según la composición del sustrato y que el desarrollo estable del proceso global requerirá de un equilibrio que evite la acumulación de compuestos intermedios inhibidores o la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV), que podría producir una bajada del pH (Blanco, 2011).

Los productos finales de un grupo de microorganismos suelen ser el alimento del grupo siguiente, de forma que a lo largo del proceso existe un delicado balance que es necesario mantener para que la digestión transcurra correctamente. Se acepta que cada componente del residuo (carbohidratos, proteínas y lípidos) pasa por tres etapas: hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis (Lorenzo y Obaya, 2005), que son descritas a continuación:

### Hidrólisis/ Licuefacción

Las bacterias fermentativas convierten a la materia orgánica compleja insoluble, como la celulosa, en moléculas solubles tales como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos. La materia polimérica compleja se hidroliza a monómero; por ejemplo: celulosa a azúcares o alcoholes y proteínas a péptidos o aminoácidos, por enzimas hidrolíticas (lipasas, proteasas, celulasas, amilasas, etc.) segregadas por microbios (Verma, 2002). Este primer paso en el proceso de digestión anaeróbica es llevado a cabo por bacterias, clostridios y bacterias facultativas tales como estreptococos (Chen y Neibling, 2014). La importancia de la presencia de estas bacterias radica en que, además de proporcionar sustrato para los grupos posteriores de bacterias, eliminan el oxígeno disuelto que pudiera quedar en la materia orgánica.

La etapa hidrolítica es la etapa que limita la velocidad global del proceso, sobre todo en residuos con alto contenido de sólidos, puesto que se requiere que se desarrolle el ataque enzimático sobre el sustrato para que se liberen los compuestos orgánicos que las poblaciones microbianas pueden descomponer. Esta limitación puede ser reducida mediante la aplicación de pre tratamientos fisicoquímicos los cuales permiten obtener un aumento de la velocidad de hidrolización. Dentro del conjunto de operaciones y procesos desarrollados para este fin se encuentran el pre tratamiento mecánico del sustrato (trituration), ataque con ultrasonido, ataque químico (ácido o alcalino) y pre tratamientos térmico o termoquímico (Cendales, 2011).

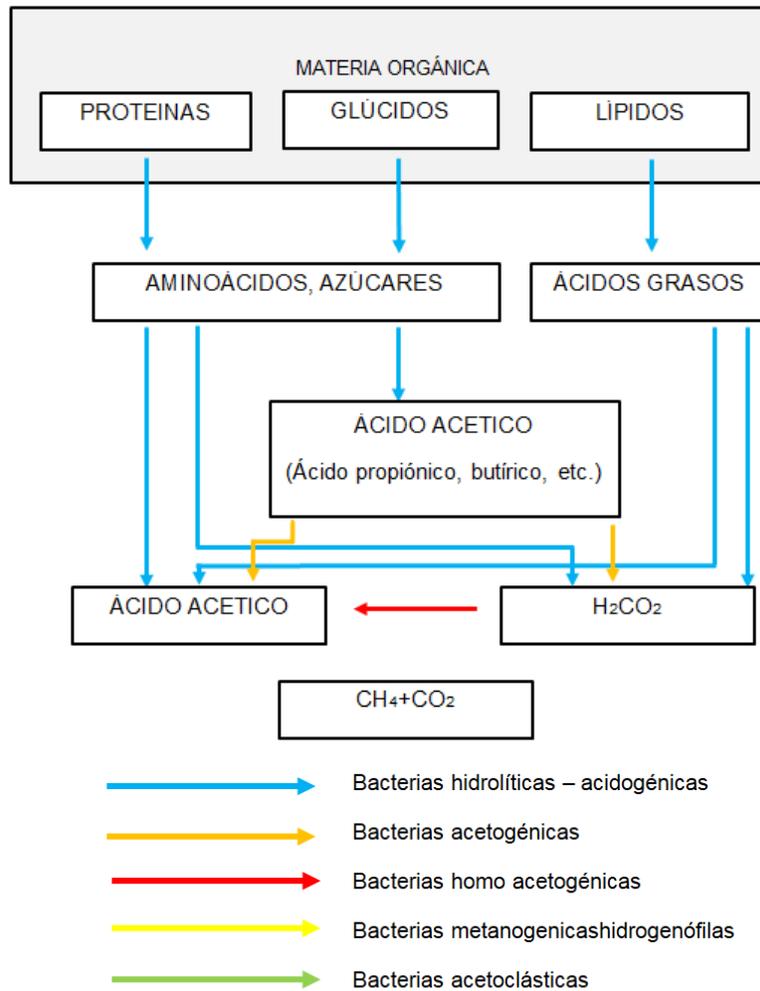


Figura 2.1: Fases de fermentación anaeróbica y poblaciones de microorganismos. Fuente: González Cabrera, 2014.

### Etapa fermentativa o acidogénesis

Las pequeñas moléculas resultantes de la hidrólisis son convertidas por acidógenos (bacterias fermentativas) a una mezcla de ácidos grasos volátiles como: ácido acético, ácido propiónico, ácido butílico y otros productos en menor cantidad como hidrógeno, dióxido de carbono y ácido acético. La acidogénesis es usualmente la etapa más rápida en la conversión anaeróbica de la materia orgánica compleja en la fase líquido-sólido de la digestión (Chen y Neibling, 2014). Las proporciones entre los productos de la fermentación varían en función del consumo de  $H_2$  por parte de las bacterias que utilizan

hidrógeno. Cuando el H<sub>2</sub> es eliminado de forma eficiente las bacterias fermentativas no producen compuestos reducidos como el etanol, favoreciendo la producción de H<sub>2</sub> y la liberación de energía en forma de ATP (Adenosina Trifosfato). La actividad de algunas bacterias fermentativas y acetogénicas depende de la concentración de H<sub>2</sub>, siendo posible sólo a valores muy bajos de presión parcial de este y su eliminación continua mediante oxidación por CO<sub>2</sub> (bacterias metanogénicas e hidrogenotróficas) estimula la acción de las bacterias fermentativas al eliminar un producto de la reacción (García, 2012).

### Etapa acetogénica

Los compuestos intermedios resultantes de la etapa acidogénica van a ser transformados por las bacterias acetogénicas, obteniéndose como principales productos hidrógeno, dióxido de carbono y ácido acético. Este último compuesto aparece directamente por la acción de estas bacterias por la transformación de alcoholes, ácidos grasos, ácidos volátiles, etcétera junto con hidrógeno y dióxido de carbono que por acción de las bacterias homoacetogénicas lo transforman en ácido acético. El metabolismo acetogénico va a ser muy dependiente de las concentraciones de estos productos. Como ejemplos de bacterias acetogénicas se identifican *Syntrophobacterwolnij*, que descompone el ácido propiónico, o *Syntrophomonaswolfei* que descompone el ácido butírico. Los ácidos valérico y butírico son descompuestos por las mismas especies, mientras que como bacterias pertenecientes al grupo de las homoacetogénicas se encuentran los géneros *Acetobacterium*, *Acetoanaerobium*, *Acetogenium*, *Clostridium* o *Eubacterium*. (González, 2014).

### Etapa metanogénica

Los microorganismos metanogénicos son organismos anaerobios que requieren estrictamente condiciones libres de oxígeno (Sosa, Galindo y Bocourt, 2007), siendo los responsables de la formación de metano y la eliminación en el medio de los productos de grupos anteriores, siendo, además, los que dan nombre al proceso general de biometanización. Los microorganismos metanogénicos forman metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente:

acetato, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, formiato, metanol, y algunas metilaminas. En función del sustrato principal, los metanógenos se dividen en hidrogenotróficos, que consumen hidrógeno y fórmico; y acetoclásticos, que consumen grupos metilo del acetato, metanol y algunas aminas. Se considera que el 70% del metano generado en los reactores anaerobios proviene del ácido acético mientras que el resto proviene del ácido fórmico y del dióxido de carbono (el cual se reduce con el hidrógeno producido en las etapas anteriores). Los microorganismos metanogénicos tienen una rapidez de reproducción que es muy baja, pudiéndose estimar que los tiempos de regeneración son diez veces superiores a los de las bacterias acidogénicas. El fracaso en el mantenimiento del balance entre estos dos grupos de microorganismos es la principal causa de inestabilidad del reactor (Demirel y Yenigün, 2002).

Jarabo (1999) citado por Blanco (2011) indica que durante una digestión estable, las concentraciones de sustancias intermedias deben ser bajas (menos de 10 ppm de ácido acético y menos del 0.1% de hidrógeno en el gas), pero si, por cualquier razón, la población de metanógenos es anormalmente baja, las concentraciones de estos productos puede elevarse demasiado (hasta 1000 ppm de ácido acético y 10% de hidrógeno en el gas). Esta acumulación viene acompañada de una fuerte caída de la producción de metano y la acidificación del medio de digestión.

### **Producción de biogás**

Para un sistema anaerobio, la DQO puede considerarse un parámetro conservativo, es decir, la suma de las DQO de entrada debe ser igual a la suma de las DQO de salida (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía [IDA], 2007):

$$DQO_{influyente} = DQO_{efluente} + DQO_{biogás}$$

*Ecuación 2. 3*

Si se considera un biogás formado exclusivamente por CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, y teniendo en cuenta que la DQO del CO<sub>2</sub> es nula, la DQO eliminada en el residuo se correspondería con la DQO obtenida en forma de metano, lo cual significa 2.857 kg DQO por m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>, ó 0.35 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> por kg de DQO eliminada, a P=1 atm y T= 25°C, ó 0.38 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> a

P = 1 atm y 25 °C. Atendiendo a la potencia calorífica del metano, estos valores corresponderían aproximadamente a 3.5 kW·h/kg de DQO eliminada, en unidades de energía primaria. Esto confiere a los sistemas anaerobios una clara ventaja frente a los sistemas aerobios de tratamiento de residuos orgánicos y aguas residuales, para los cuales el consumo de energía para transferir oxígeno se encuentra alrededor de 1.0 kW·h/kg O<sub>2</sub> consumido; variaciones sobre los valores anteriores pueden ser debido a posibles acumulaciones en el reactor, a la producción de otros gases (H<sub>2</sub>) o, a que la DQO medida no sea tan solo debida al carbono oxidable. En la figura 2.2 se observa esta conservación de la DQO en el proceso de digestión anaerobia para un residuo con un 10% de la DQO no biodegradable, en el que el 90% de la DQO inicial se transforma en CH<sub>4</sub>.

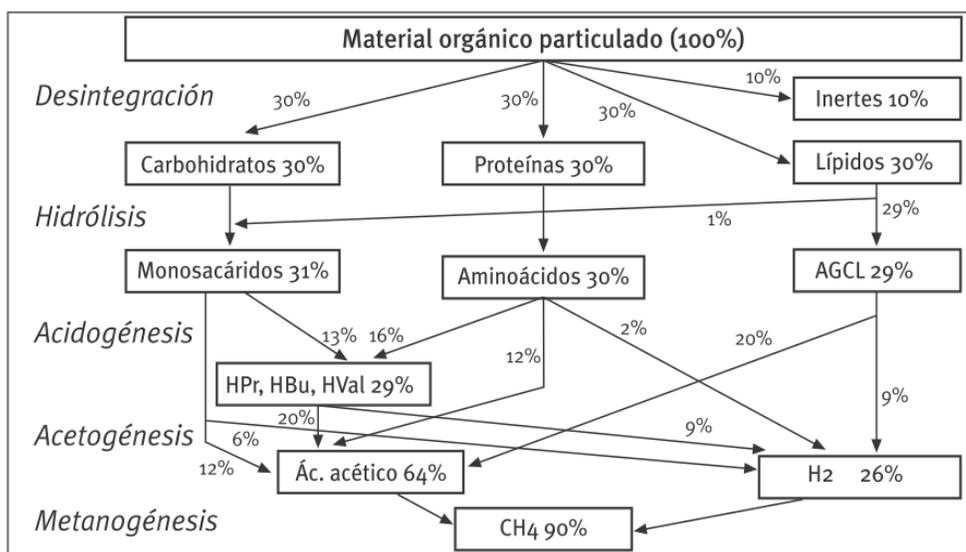


Figura 2.2: Flujo de DQO (Demanda Química de Oxígeno) en el proceso de digestión anaerobia. En el proceso de digestión anaerobia de materia orgánica particulada, formada por un 10% de materiales inertes y un 90% de hidratos de carbono, proteínas y lípidos, a partes iguales. El ácido propiónico (HPr, 10%), ácido butírico (HBu, 12%) y ácido valérico (HVal, 7%) se han agrupado para simplificar el esquema. AGCL: ácidos grasos de cadena larga. Fuente: Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía [IDA], 2007.

### Condiciones del proceso

Es importante considerar los siguientes aspectos para lograr una producción óptima de metano (The German Solar Energy Society [CGS], 2005), (MINENERGIA/PNUD/FAO/GEF, 2001):

- Condiciones anaeróbicas: las bacterias son activadas solo cuando no hay presencia de oxígeno.
- Condiciones de humedad: un contenido de humedad de al menos 50% es necesario.
- Temperatura: Existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaeróbicos psicrófilos (por debajo de 25°C), mesófilos (entre 25 y 45°C) y termófilos (entre 45 y 65°C). Las cepas termófilas tienen la actividad más alta. La mayoría de digestores ganaderos operan en el rango mesofílico. Este proceso es menos sensible a los cambios y por tanto más fácil de controlar que el proceso termofílico. Para un óptimo funcionamiento del digestor, se recomienda que el tratamiento anaeróbico se diseñe para que opere con variaciones de temperatura que no excedan los 0.6 – 1.2 °C /día.
- Tiempo de retención: el tiempo de retención es el tiempo por el cual el sustrato está dentro del digestor. El tiempo de retención para una producción óptima de biogás depende de la temperatura. Para una producción de biogás que está cerca del máximo teórico, el rango de temperatura psicrófila requiere un tiempo de retención de 40-100 días, en el rango mesofílico de 25-40 días, y en el rango termofílica 15-25 días.
- pH: El valor de pH en los digestores anaeróbicos debería ser alrededor 7.5. Debe dársele atención especial a este aspecto, en el caso de la codigestión de sustratos ácidos.
- Cargas orgánicas: Las bacterias necesitan un mínimo de cargas orgánicas (materia orgánica seca por m<sup>3</sup> de reactor por día) como “comida” para sobrevivir, pero ellas pueden también “sobrealimentarse”. La carga orgánica debería estar en el rango de 0.5 kg y 5 kg de materia orgánica por m<sup>3</sup> del tanque de digestión por día (MO/m<sup>3</sup>/día). Una saludable situación podría ser entre 1 a 3 kg de MO/m<sup>3</sup>/día. Con el fin de evitar una carga orgánica demasiado elevada en el punto de alimentación del reactor; se debe alimentar el reactor con sustrato fresco al menos diariamente.
- Sustancias auxiliares: las bacterias necesitan compuestos nitrogenados solubles, minerales y trazas de elementos como auxiliares del sustrato; estas sustancias deberán estar presentes en suficientes cantidades.

- Sustancias restrictivas: algunas sustancias que pueden aparecer en estiércol, como desinfectante, antibiótico y ácidos orgánicos, impiden la actividad de las bacterias o incluso las mata. Altas concentraciones (por ejemplo como resultado de limpieza de todo el establo con desinfectante a la vez o el tratamiento de todo el ganado con antibióticos) debería evitarse.
- Tamaño de partícula: Las partículas en el sustrato no deberían ser tan largas; de lo contrario las bacterias no tiene suficiente superficie para unirse. Puede ser necesario reducir el tamaño de sustratos.
- Mezcla del sustrato: El gas que es producido por las bacterias solo emergerá a la superficie automáticamente si hay menos del 5% de materia seca en el sustrato; en todos los otros casos, es necesaria mezclar para evitar acumulación de presión.
- Condiciones consistentes: Rápidos cambios en las condiciones del proceso deberían ser evitados. Alimentación de sustrato fresco dentro del digestor debería hacerse gradualmente. Esto también aplica a cambios en la composición en el sustrato, por ejemplo como un resultado de un cambio en forraje.
- Contenido de nitrógeno: La presencia de nitrógeno en el sustrato es necesario porque es un elemento esencial para el metabolismo de bacterias, y es necesario para mantener el pH (cuando convertido a amoníaco se neutraliza el ácido). Sin embargo, mucho nitrógeno en el sustrato puede dejar excesiva formación de amoníaco, resultando en efectos tóxicos. Una apropiada relación carbono-hidrogeno (C: N) es entre 20:1, aunque en valores extremos pueden aún resultar digestiones eficientes.

### **Tecnología de digestión anaeróbica**

Hay muchas maneras en que los sistemas de digestión anaeróbicos pueden ser categorizados; que independiente de su construcción individual, todos ellos consisten fundamentalmente en tanques diseñados para aislar el aire y mantener condiciones óptimas para la actividad bacteriana (Evans y Furlong, 2003). A continuación en la tabla 2.10 se presenta un cuadro resumen que contiene una variedad de diseños y categorías presentados por diferentes autores para la digestión anaeróbica:

Tabla 2.10: Clasificación de los diferentes sistemas de digestión anaeróbicos.

DISEÑO DE BIODIGESTOR	TIPOS	DESCRIPCIÓN
<p><b>Régimen de carga</b></p> <p>(Evans y Furlong, 2003) (Guerrero, Inga, y Samaniego, 2011) (MINENERGIA/PN UD/FAO/GEF, 2001)</p>	Flujo Continuos	<p>Cuando la alimentación del digestor es un proceso ininterrumpido, el efluente que descarga es igual al afluente o material de carga (que entra al digestor), con producciones de biogás, uniformes en el tiempo. Son utilizados principalmente para el tratamiento de aguas negras. Corresponde a plantas de gran capacidad, tipo industrial, en las cuales se emplean equipos comerciales para alimentarlos, proporcionándoles calefacción y agitación.</p>
	Flujo discontinuo o estacionario	<p>Este digestor es completamente llenado de forma periódica, sellado y luego se empieza el proceso de digestión; con el tiempo aumenta la tasa de producción de biogás hasta un máximo; posteriormente baja por debajo del nivel mínimo y el 90-95% la carga se mueve del tanque; el resto continúa para empezar el nuevo lote de digestión de sustrato fresco. (Se recomienda tener varios digestores en diferentes etapas del proceso para operar en paralelo y lograr producir constantemente biogás).</p> <p>Estos reactores han sido aplicados a residuos con una alta concentración de sólidos que dificultan la adopción de sistemas de bombeo, tales como residuos de ganado bovino con lecho de paja.</p>
	Flujo Semicontinuo	<p>Cuando la primera carga que se introduce al digestor consta de una gran cantidad de materias primas. Posteriormente, se agregan volúmenes de nuevas cargas de materias primas (afluente), calculados en función del tiempo de retención y del volumen total del digestor. Se descarga el efluente regularmente en la misma cantidad del afluente que se incorporó. Este proceso es usado en el medio rural, cuando se trata de sistemas pequeños para uso doméstico.</p>

*continúa...*

Tabla 2.10: Clasificación de los diferentes sistemas de digestión anaeróbicos.

DISEÑO DE BIODIGESTOR	TIPOS	DESCRIPCIÓN
<b>Orientación de construcción o forma del reactor</b> (Guerrero et al., 2011) ( The German Solar Energy Society (CGS), 2005) (Levenspiel, 2004), (López y Borzacconi, 2009).	Horizontal	Debido a los bajos tiempos de retención el sustrato no será completamente digerido, por tanto no habrá mejor eficiencia en la producción de biogás y el efecto de saneamiento es inferior a los otros dos tipos.
	Vertical	Son normalmente pequeños, ellos consisten de un largo tanque con sistema de agitación. El volumen estándar es entre 20 y 150 m <sup>3</sup> .
	Horizontal	Este tipo de reactores trabajan con flujo en pistón, que se caracteriza porque el flujo de fluido a su través es ordenado, sin que ningún elemento del mismo sobrepase o se mezcle con cualquier otro elemento situado antes o después de aquel, lo que significa que no hay mezcla en la dirección de flujo (dirección axial). Como consecuencia, todos los elementos de fluido tienen el mismo tiempo de residencia dentro del reactor.
Vertical	Vertical	Son de forma cilíndrica y normalmente tienen un volumen entre 300 a 1500 m <sup>3</sup> . Hay varios sistemas de mezclado y en muchos casos el biogás es almacenado sobre el digestato, debajo del techo de membrana flexible.

Fuente: Elaboración propia a partir de la información presentada por diferentes autores.

El orden de los denominados tratamientos primarios y secundarios, puede variar dependiendo de la finalidad del proyecto, ya sea si el objetivo es solamente la reducción los parámetros de contaminación o la reducción dichos parámetros y el aprovechamiento de los residuos.

## **CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN Y DETERMINACIÓN DE LAS CARGAS CONTAMINANTES DEL AGUA RESIDUAL**

### **3.1 Caracterización de aguas residuales de origen ganadero**

Para la caracterización del agua residual del establo en estudio es necesario tomar en cuenta diferentes aspectos clasificados en físicos, químicos y biológicos, los cuales son indispensables para el diseño de la propuesta de tratamiento y además, su evaluación está regulada por el Reglamento especial de Aguas Residuales, y reflejan las condiciones del agua residual en vía a su tratamiento.

#### **3.1.1 Aspectos Físicos**

**Olor:** Este tipo de agua residual tiene un olor característico, generado por los gases volátiles que producen metano ( $\text{CH}_4$ ) y por los procesos de degradación de la materia orgánica, despidiendo un olor fecal y nauseabundo (Guerrero et al., 2011).

**Sólidos totales:** El contenido de sólidos de un agua afecta directamente la cantidad de lodos que se produce en el sistema de tratamiento o disposición (Barba, 2002). Se considera como sólidos totales de un agua, el residuo de la evaporación y secado a  $103 - 105^\circ\text{C}$ . Se expresa en mg/L.

**Sólidos sedimentables:** Son una medida del volumen de sólidos asentados al fondo de un cono Imhoff, en un período de una hora, y representan la cantidad de lodo removible por sedimentación simple (Sluiter et al., 2008). Se expresan comúnmente en mL/L.

**Sólidos suspendidos:** son un tipo de sólidos no sedimentables que son transportados gracias a la acción de arrastre y soporte del movimiento del agua (Hernández, 2007).

**Turbidez:** Es una expresión de la propiedad óptica que origina que la luz se disperse y absorba en vez de transmitirse en línea recta a través del agua (Hernández, Nolasco y Salguero, 2016). Es un parámetro que indica la presencia de sólidos en suspensión de compuestos principalmente por arcillas, materia orgánica e inorgánica. Se determina la

turbidez por su gran aporte en la caracterización de las aguas para su tratamiento pues indica su efectividad (Mora, 2014). Se expresa en NTU.

**Temperatura:** Es uno de los parámetros físicos más importantes en el agua, pues por lo general influye en el retardo o aceleración de la actividad biológica, la absorción de oxígeno, la precipitación de compuestos, la formación de depósitos, la desinfección y los procesos de mezcla, floculación, sedimentación y filtración (Barrenechea, 2000). Se expresa en °C.

### 3.1.2 Aspectos Químicos

**Aceites y grasas:** Al nivel de aceites y grasas se les concede especial atención por su escasa solubilidad en el agua y su tendencia a separarse de la fase acuosa. A pesar de que estas características son una ventaja para facilitar su separación mediante el uso de sistemas de flotación, su presencia complica el transporte de los residuos y su eliminación en unidades de tratamiento biológico (Barba, 2002).

**pH:** La determinación del pH en agua residuales es un parámetro importante, pues determina la calidad de la misma. Existe un intervalo de pH óptimo para el desarrollo de la vida que se encuentra entre 6,5 a 8,5, si este es alterado, provocará una acidez o basicidad de la misma que producirá la muerte de la vida acuática (Marín, 2006).

**Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>):** Es el parámetro de contaminación orgánica más ampliamente utilizado. Se define como la velocidad a la que los microorganismos y los productos químicos utilizan el oxígeno del agua residual en el proceso de la oxidación bioquímica de la materia orgánica bajo condiciones aeróbicas (Corporation of The City of Guelph, 2011).

**Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Es una medida de la capacidad del agua para consumir oxígeno durante la descomposición de la materia orgánica y la oxidación de sustancias químicas inorgánicas como amoníaco y nitrito (Narayanan, 2015).

### **3.1.3 Aspectos Biológicos**

Los principales parámetros biológicos que se pueden medir en las aguas residuales de establos son: Coliformes fecales, Coliformes totales, *Escherichia*, *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Serratia*, *Edwarsiella*. En el caso de aguas residuales provenientes de establos de ganado bovino se toma como principal indicador de contaminación bacteriana, el conteo de Coliformes totales (Guerrero et al., 2011). Los Coliformes totales involucran a los contaminantes comunes del tracto gastrointestinal en grandes cantidades tanto del hombre como de los animales de sangre caliente, permanecen por más tiempo en el agua que las bacterias. Estas bacterias son de interés clínico, ya que pueden ser capaces de generar infecciones en el tracto respiratorio superior e inferior, además de bacteremia, infecciones de piel y tejidos blandos, enfermedad diarreica aguda y otras enfermedades severas en el ser humano (Arcos, Ávila, Estupiñán y Gómez, 2005).

## **3.2 Determinación de caudal de aguas residuales del establo de ganado**

La determinación de los caudales del agua residual a tratar es fundamental a la hora de proyectar las instalaciones para su recogida, tratamiento y evacuación. De cara a la utilización de un diseño adecuado a las necesidades reales del lugar, es preciso conocer datos fiables sobre los caudales que se quieren tratar.

### **3.2.1 Cantidad de excretas producidas en el establo de ganado**

La estimación de la cantidad de estiércol generada; se realizó en el sitio por un período de cinco días contabilizando un total de 30 vacas y 15 terneros, de la siguiente forma:

- Se recogió a diario con la ayuda de una pala, en sacos vacíos de concentrado (Ver Anexo A3).
- Dichos sacos fueron transportados en una carreta y llevados hasta una báscula rústica.
- Una vez en la báscula rústica, fueron pesados.
- Luego de pesadas las excretas, se anotó la información.

En la tabla 3.1 se presenta los resultados obtenidos:

Tabla 3.1: Generación diaria de estiércol en el establo.

Día	Peso (kg)	Peso (lb)	Promedio diario (kg)	Promedio diario (lb)	Σ	Coefficiente de variación
1	131.7	290.35				
2	138.5	305.34				
3	132.8	292.77				
4	130.9	288.59	133.4	294.10	3.25	2.23%
5	136.4	300.71				
<b>Total (Semanal)</b>	<b>670.3</b>	<b>1477.76</b>				

Fuente: Elaboración propia a partir de mediciones realizadas a diario en un período de cinco días.

Según la generación de estiércol presentada en la tabla 2.4 una vaca no productiva genera en promedio 19.4 kg estiércol /día por lo que:

$$19.4 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}} * \frac{\text{día}}{24 \text{ h}} = 0.8083 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{h}}$$

Si cada vaca se mantiene despierta 4 h entre el lapso de la noche y madrugada se generan una cantidad de estiércol para el día siguiente de:

$$0.8083 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{h}} * 4 \text{ h} = 3.23 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{vaca}}$$

$$\frac{3.23 \text{ kg estiércol}}{\text{vaca}} * 36 \text{ vaca} = 116.28 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}}$$

Según estimaciones de parte de los jornaleros en promedio un ternero menor de un año excreta una cuarta parte de lo generado por una vaca no productiva, por lo que:

$$\frac{1}{4} \left[ 19.4 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}} \right] = 4.85 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}}$$

Con cuarenta terneros

$$4.85 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}} * 40 \text{ terneros} = 194 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}}$$

Con un total de generación de estiércol teórica de:

$$116.28 \frac{kg \text{ estiércol}}{dia} + 194 \frac{kg \text{ estiércol}}{dia} = 310.8 \frac{kg \text{ estiércol}}{dia}$$

Al comparar el resultado anterior con lo estimado en la recolección diaria de estiércol en el establo se puede deducir que el promedio diario obtenido en las mediciones es menor a la mitad de los valores estimados por diferentes autores.

### 3.2.2 Determinación del caudal del establo de ganado

Posterior a la determinación de la cantidad de excretas generadas, se procede a determinar el flujo volumétrico del efluente del establo que son las aguas de limpieza, donde la parte más gruesa ya se ha separado y la descarga está conformada solamente por la parte que se logró disolver de las excretas del ganado bovino (Tabla 3.1). Esta determinación ayuda al dimensionamiento del sistema de tratamiento pues se estima la cantidad de agua manejar.

La medición del flujo volumétrico o caudal se realiza comúnmente por medio de un correntómetro también llamado molinete o reómetro, el cual consiste en una hélice y cojinete protegida para la medición de una velocidad de agua, acoplado a un mando de sonda telescópica que termina en un flujo con pantalla LCD del ordenador (Ortega, 2014). Es un aparato diseñado para la determinación de la velocidad de corrientes de agua tales como canales de laboratorio, alcantarillados, mares, ríos, estuarios, bahías, arroyos y quebradas (Pérez, 2005). Por lo anterior, queda claro que la medición del caudal del agua residual proveniente del establo, no se puede llevar a cabo mediante el uso de un correntómetro pues no se cuenta con la profundidad necesaria para lograr sumergir el equipo para que las hélices giren. Además, según Rojas (2006) no se recomienda el uso de un correntómetro cuando:

- Se presenta una excesiva velocidad del agua.
- Hay presencia frecuente de cuerpos extraños en el curso del agua.
- Peligra la integridad del correntómetro.

Por lo anterior y debido al volumen del caudal y los patrones de generación no continuos del agua residual, se hizo uso del método volumétrico recomendado para la medición de pequeños caudales como los que escurren en surcos, pequeños canales o tuberías. El método requiere de:

- Depósito (balde o tambor) de volumen conocido en el cual se colecta el agua,
- Cronómetro para medir el tiempo de llenado del depósito.
- Repetir 2 o 3 veces el procedimiento y promediar para asegurar mayor exactitud.

El procedimiento de cálculo consiste en dividir el volumen de agua recogido en el depósito por el tiempo (en segundos) que demoró en llenarse (ecuación 3.1). El resultado expresa el caudal medido en litros por segundo (Villavicencio y Villablanca, 2010).

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{[L]}{[s]} = \frac{[mL]}{[s]}$$

Ecuación 3.1

### **Metodología para determinación de caudal**

Se midió el caudal de forma manual utilizando un cronómetro y un recipiente con una capacidad de contención de 3951 mL, con el cual se tomaron volúmenes de muestra y se procedió a medir el tiempo transcurrido desde que se introduce a la descarga hasta que se retira de ella obteniendo los resultados presentados en la tabla 3.2:

Tabla 3.2: Determinación de tiempos de aforo.

Día	Hora (am)		MEDICIÓN DE CAUDAL					Promedio diario	Promedio semanal
	Inicio	Fin	P1	P2	P3	P4	Tiempo (s)		
1	10:09	10:20	3.66	3.65	3.64	3.67	3.65		
2	9:47	9:56	3.42	3.44	3.45	3.46	3.44		
3	9:24	9:33	3.31	3.49	3.30	3.59	3.42	3.49	
4	8:25	8:34	3.50	3.29	3.41	3.43	3.41		
5	9:10	9:20	3.74	3.40	3.39	3.51	3.51		

Fuente: Elaboración propia a partir de mediciones de campo.

Tabla 3. 3: Promedio diario de caudales

MEDICION DE CAUDAL (mL/s)						
Día	P 1	P 2	P 3	P 4	Promedio diario	Promedio Semanal
1	1,079.51	1,082.47	1,085.44	1,076.57	1,090.00	
2	1,155.26	1,148.55	1,145.21	1,141.90	1,147.73	
3	1,193.65	1,132.09	1,197.27	1,100.56	1,155.89	1,136.22
4	1,128.86	1,200.91	1,158.65	1,151.89	1,160.08	
5	1,056.42	1,162.06	1,165.49	1,125.64	1,127.40	

Fuente: Elaboración propia a partir de mediciones

Una vez realizados los procedimientos de medición de caudal durante cinco días consecutivos, se obtuvo un promedio diario de caudal de 1,136.22 mililitros por segundo, durante diez minutos, que es el tiempo que dura el proceso de lavado del establo obteniendo así un volumen por día de:

$$1,136.22 \frac{mL}{s} * \frac{1 L}{1,000 mL} * \frac{60 s}{1 min} * \frac{10 min}{día} = \frac{681.732 Litros}{día}$$

El dato anterior representará el caudal base con que se trabajará, para el diseño de la propuesta.

### 3.3 Metodología de muestreo

Posterior a la determinación del caudal es necesario medir las características de importancia para el estudio del agua residual en base a un procedimiento adecuado de muestreo que proporcionará la información necesaria para los intereses del estudio.

El objetivo del muestreo es obtener una parte representativa del material bajo estudio, en este caso las aguas residuales del establo, para la cual se analizarán las variables físicoquímicas y biológicas de interés. Luego del muestreo, el volumen del material captado se transporta hasta el lugar de almacenamiento (cuarto frío, refrigerador, nevera, etc.), para luego ser transferido al laboratorio para el respectivo análisis, momento en el cual la muestra debe conservar las características del material original. Para lograr el

objetivo se requiere que la muestra conserve las concentraciones relativas de todos los componentes presentes en el material original y que no hayan ocurrido cambios significativos en su composición antes del análisis.

En algunos casos, el objetivo del muestreo es evaluar que se cumplen las normas especificadas por la legislación (resoluciones de las autoridades ambientales). Las muestras ingresan al laboratorio para determinaciones específicas, sin embargo, la responsabilidad de las condiciones y validez de las mismas debe ser asumida por las personas responsables del muestreo, de la conservación y el transporte de las muestras. Las técnicas de recolección y preservación de las muestras tienen una gran importancia, debido a la necesidad de verificar la precisión, exactitud y representatividad de los datos que resulten de los análisis (Intituto de toxicología de la defensa de España, 2016).

### **3.3.1 Criterios para la selección de la técnica de muestreo**

Previo a un muestreo es importante tener claramente definido varios aspectos; entre los cuales están: la forma como serán tomadas las muestras, revisando el presupuesto, el personal con que se cuenta, la capacitación del personal, el transporte, los costos de inversión, los requerimientos de energía, espacio y la disponibilidad de los mismos, entre otros; así mismo, la recolección de las muestras depende de los procedimientos analíticos a emplear y de los objetivos del estudio (Severiche, Castillo y Acevedo, 2013). Severiche et al. (2013) clasifican los tipos de muestreo para aguas residuales en tres categorías:

Tabla 3.4 Clasificación de los tipos de muestreo para aguas residuales.

Tipo de muestras	Descripción	Se aplica cuando:
Simple	Es una muestra individual de agua residual tomada en un momento cualquiera. Por ello, solamente es representativa del efluente en el momento del muestreo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El agua residual a muestrear no circula de forma continua, por ejemplo, por descargas periódicas de depósitos, fosas sépticas, barcos, etc.</li> <li>• Las características del agua residual son relativamente constantes a lo largo del tiempo, por lo que es innecesario un programa de muestreo complejo.</li> <li>• Se quiere caracterizar la muestra, ya que en ese momento hay una descarga de agua residual con una carga contaminante diferente a la media de ese vertido.</li> </ul>
Compuesta	En la mayoría de los casos, el término "muestra compuesta" se refiere a una combinación de muestras sencillas o puntuales tomadas en el mismo sitio durante diferentes tiempos.	Se desea observar concentraciones promedio, usadas para calcular las respectivas cargas o la eficiencia de una planta de tratamiento de aguas residuales pues estas muestras representan las variaciones de los contaminantes.
Integrada	Son mezclas de muestras puntuales tomadas simultáneamente en diferentes puntos, o lo más cercanas posible.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La composición de ríos o corrientes varía a lo ancho y profundo de su cauce.</li> <li>• Se propone un tratamiento combinado para varios efluentes de aguas residuales separados, cuya interacción puede tener un efecto significativo en la tratabilidad o en la composición.</li> <li>• La predicción matemática puede ser inexacta o imposible, mientras que la evaluación de una muestra integrada puede dar información más útil.</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia a partir de información presentada por Severiche et al. (2013).

Debido a que no se tiene un caudal constante y que las composiciones varían con respecto al tiempo significativamente; la metodología de muestreo más adecuada a emplear es la toma de muestras compuestas. Según Eaton y Greenberg (2012) es necesario tener en cuenta especificaciones como:

Las muestras deben ser recogidas en recipientes a lo largo de un período que puede variar desde unos pocos minutos, horas, hasta semanas o meses, siendo lo más habitual 24 horas, de tal manera que cubran las variaciones de la descarga. El intervalo entre la toma de cada muestreo simple para integrar la muestra compuesta, debe ser el suficiente para determinar la variación de los contaminantes del agua residual. Una ventaja de este tipo de muestreos, es que el número de determinaciones analíticas que se suelen realizar es menor. Al recoger durante un período de tiempo las muestras simples, esta se puede componer de volúmenes proporcionales al caudal circulante. En este caso se puede conocer simultáneamente la concentración y la cantidad de contaminantes del vertido en el tiempo o en su totalidad. A continuación en la figura 3.1 se señala la secuencia de pasos de un muestreo compuesto:

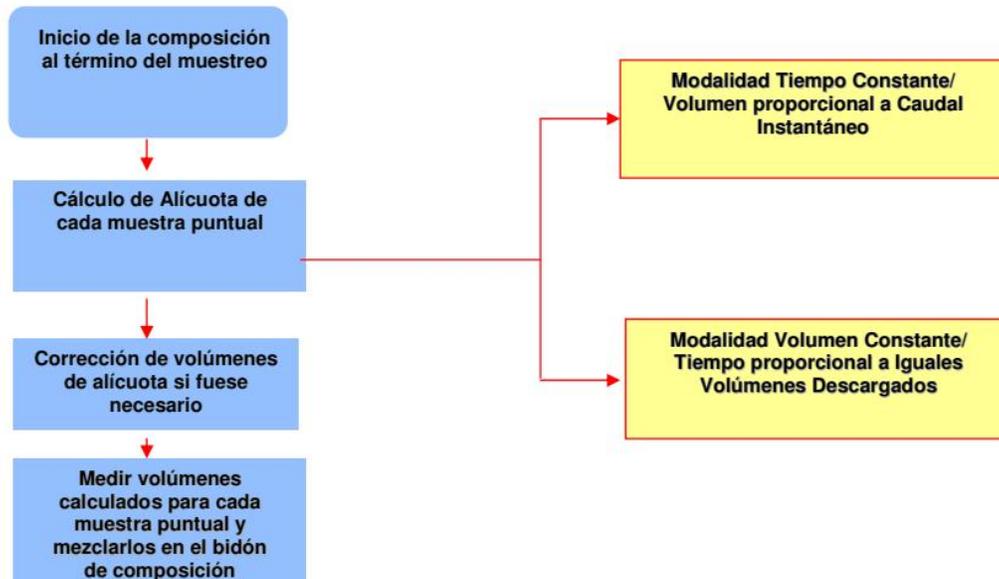


Figura 3.1: Esquema general de recolección de muestra compuesta Fuente: Manual Operativo de la Norma de muestreo de Aguas Residuales, Superintendencia de Servicios Sanitarios (2010).

## Determinación del volumen de las alícuotas

Los valores de caudal permiten calcular la alícuota a considerar por cada muestra puntual recolectada durante el periodo de monitoreo. Se debe considerar estrictamente que el valor de caudal utilizado para la composición final de la muestra es el caudal instantáneo asociado al horario de recolección de la muestra (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2010).

$$\text{Información de Caudal} + \text{Volumen muestra puntual} = \text{Muestra Compuesta}$$

*Ecuación 3.2*

Las modalidades de composición de muestras son las siguientes:

- Modalidad “tiempo constante/volumen proporcional a caudal instantáneo”:  
Consiste en recolectar muestras de volumen semejante y proporcional al caudal, durante intervalos de tiempo determinados, en conjunto con la medición de caudal al momento de la recolección de la muestra. Esta modalidad es aplicable tanto para el monitoreo manual como para el monitoreo automático.
- Modalidad “volumen constante/tiempo proporcional a iguales volúmenes descargados”:  
Consiste en componer la muestra durante el período del monitoreo, mediante la recolección de muestras puntuales al tiempo en que un volumen constante de aguas residuales ha pasado por el punto de muestreo. Es por esta razón que no debe existir una diferencia mayor al 10% entre los volúmenes históricos descargados y los del periodo de monitoreo. Esta modalidad es aplicable en monitoreos manuales o con equipo de muestreo automático en programación manual, requiriéndose una certeza del comportamiento del caudal, que aseguren el volumen descarga diario.

Una vez definido el tipo de muestreo, Eaton y Greenberg (2012) presentan la siguiente serie de pasos a seguir para la recolección de muestras compuestas:

- Recoger las porciones individuales en una botella de boca ancha cada hora (dependiendo del caso, puede ser cada media hora o incluso cada 5 minutos).
- Mezclar el final del período de muestreo o combinar en una sola botella tal como se recoge.
- Si se utilizan conservantes, añadirlos al frasco de la muestra inicialmente para que todas las partes del material compuesto se conserven tan pronto como se recogen.
- Es deseable y a menudo esencial, combinar muestras individuales en volúmenes proporcionales al flujo.
- Un volumen de muestra final de 2 a 3 litros suele ser suficiente para el análisis de aguas residuales, efluentes y desechos.

### **3.3.2 Puntos y momentos de muestreo**

Según la Norma para Regular la Calidad de Aguas Residuales de Tipo Especial Descargadas al Alcantarillado Sanitario:

*“Para los casos de procesos que generen un efluente con características constantes a lo largo del día, deberán tomarse muestras compuestas por un mínimo de tres muestras simples; contrario se tomarán muestreos puntuales en el momento de efectuar la descarga de mayor concentración”.*

Por tanto, en base a todo lo anterior y debido a lo dictado en la Norma para Regular la Calidad de Aguas Residuales de Tipo Especial Descargadas al Alcantarillado Sanitario, para este estudio se tomarán muestras compuestas conformadas con un mínimo de tres muestras simples tomadas al final de la canaleta donde se descarga el agua de lavado del establo y cada muestra se recolectará con un intervalo de un minuto entre cada toma y con una recolección de muestra de modalidad “tiempo constante/volumen proporcional a caudal instantáneo”, cuyo tiempo es cuatro segundos desde el momento en que se coloca el recipiente para recibir el agua descargada (ver Anexo A4).

### 3.4 Resultados de caracterización y muestreo

El agua residual es muestreada tal como se explicó anteriormente y el resultado de la caracterización in situ se muestra en la tabla 3.5:

Tabla 3.5: Resultados de caracterización del agua residual.

Determinación fisicoquímica	Resultado de medición
Temperatura	30.2°C
Presión	1010 Pa
pH	8.41
Salinidad	0.96%
Conductividad	1892 µS/cm
Sólidos Disueltos totales	952 mg/L
Oxígeno Disuelto	0.12 mg/L

Fuente: datos obtenidos a partir de medición propia.

Para la determinación de los análisis que se catalogan como ex situ, se tomaron muestras y fueron llevadas al laboratorio obteniendo los resultados presentados en la tabla 3.6:

Tabla 3.6. Resultados de caracterización de agua residual mediante análisis de laboratorio.

Determinación fisicoquímica	Resultado	Norma para aguas residuales NSO 13.49.01:09	Dictamen
DQO	9,620	800	RECHAZADO
DBO <sub>5</sub>	8,000	300	RECHAZADO
Sólidos sedimentables	240	15	RECHAZADO
Sólidos suspendidos totales	7,800	150	RECHAZADO
Aceites y grasas	90	50	RECHAZADO
Coliformes totales (NMP/100 mL)	24,000	10,000	RECHAZADO
Ph	8.41	5.5 a 9.0	ACEPTADO
Temperatura	30.2	20 a 35 °C	ACEPTADO

Fuente: Resultados de análisis realizados en el Centro de Control de Calidad Industrial.

## **CAPÍTULO 4: FASE EXPERIMENTAL**

En la búsqueda de la mejor alternativa de tratamiento con base a una de sus características principales, es decir en presencia o no de oxígeno se desarrollaran dos pruebas experimentales: El ensayo de viabilidad de producción de biogás por medio del Test de Actividad Metanogénica Específica (AME) y el Ensayo de tratamiento fisicoquímico: Prueba de Jarras. Al finalizar dichas pruebas se medirán sus resultados por medio de las propiedades: Demanda química de oxígeno (DQO), Solidos Suspendidos Totales y Turbidez; las cuales, al ser comparadas permitirán seleccionar la alternativa o alternativas más favorables para el desarrollo de la propuesta de tratamiento de las aguas residuales en estudio.

Con el objetivo de conocer los principios y metodologías más viables con base a los recursos disponibles para desarrollar cada una de estas pruebas, a continuación se expone la información más relevante según diversos autores, así como la metodología a seguir para realizar cada una de las pruebas antes descritas.

### **4.1 Test de Actividad Metanogénica Específica (AME)**

El Test de Actividad Metanogénica Específica evalúa la máxima capacidad de los microorganismos anaeróbicos para convertir las sustancias orgánicas en el metano que se transforma a la fase gaseosa, reduciendo la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en la fase líquida, trabajando bajo condiciones idóneas (Meler y Yu Tao, 2012); de esta forma puede ser utilizado como un parámetro para monitorear la eficiencia de la población metanogénica presente en un reactor biológico (Hussain y Kant, 2015) y de esta manera tener una mejor percepción del sistema y su estabilidad.

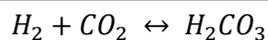
Su desarrollo permite llevar a escala de laboratorio las condiciones de un reactor anaeróbico, lo que provee información de la actividad de las cargas orgánicas. El Test de Actividad Metanogénica Específica es una herramienta muy importante también para el estudio en el arranque de reactores anaerobios, independiente de su escala pues en inicio de los procesos anaeróbicos está caracterizado por una baja actividad biológica, relacionada con el crecimiento de las bacterias acidogénicas, acetogénicas y

metanogénicas como biomasa dispersa y por medio de esta prueba es posible conocer la eficiencia y estabilidad con la que se desarrollan (Lorenzo et al., 2013).

#### 4.1.1 Metodología a utilizar para realizar el estudio de viabilidad de producción de Biogás

La bibliografía reporta distintos procedimientos para determinar la AME, temperatura, concentración del lodo, espacio de cabeza (Headspace), relación sustrato/inóculo (F/M) tipo y concentración de sustrato, así también la metodología usada para cuantificar el metano producido. Para determinar la cantidad de metano existe el método manométrico que según Ortiz (2011) se basan en la medición de la presión ejercida sobre un sensor por el gas producido (biogás) que consiste principalmente en CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, por medio del equipo OxiTop®, en el cual se puede realizar una absorción del CO<sub>2</sub> mediante la adición de escamas de NaOH. Para comprobar que se ha producido la absorción completa del CO<sub>2</sub>, se hace necesario realizar un análisis cromatográfico del biogás.

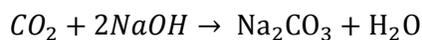
De igual manera existen los métodos volumétricos que se basan en la cuantificación del volumen de metano producido mediante el uso de una sustancia desplazante, que comúnmente es NaOH, en un rango de 15 -20 g/L, debido a su propiedad de reaccionar con el CO<sub>2</sub> presente en el biogás, que permite una medición más aproximada del volumen de metano producido (Torres y Pérez, 2010). Con base a las reacciones:



*Ecuación 4. 1*



*Ecuación 4. 2*



*Ecuación 4. 3*

Este procedimiento asume que el CO<sub>2</sub> y el CH<sub>4</sub> son los principales constituyentes del biogás formados durante la prueba AME. Esta consideración es válida, ya que en un pH

neutro la mayor parte del amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y la mitad del total Sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), presentes, están ionizados y disueltos en la fase líquida como  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{HS}^-$  (Aquino, Chernicharo y Foresti, 2007). En esta metodología no es necesario el uso de análisis cromatográfico por lo que se utilizará como la metodología de estimación del metano generado para esta investigación.

Según Canales Garcia, Rivas Oliva y Sorto Cruz (2010); la luz solar no es letal para los organismos metanogénicos, pero inhibe la metanogénesis y con el ingreso de la luz solar se podría favorecer al crecimiento de algas al interior del reactor dando como resultado interferencia. Por lo tanto se optó por el uso de recipientes color ámbar para colocar el sustrato orgánico.

### **Materiales y equipo**

3 Botellas de 1 L de vidrio ámbar con tapón de plástico.

3 Botellas de 1 L de vidrio claro con tapón de plástico.

3 Mangueras de Plástico transparente #2, diámetro de  $\frac{1}{4}$ ".

Silicón.

Cinta Aislante.

2 Probetas graduadas de 25 mL.

6 Agujas Hipodérmicas número 20.

Como equipo se usa:

1 pH-metro.

1 set de papel pH-metro.

2 Termómetros de inmersión parcial de mercurio rango  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  a  $50\text{ }^\circ\text{C}$ .

## Montaje del Equipo para el Ensayo del Test de Actividad Metanogénica Específica

Para el montaje de AME es necesario contar con el equipo de actividad Metanogénica y la preparación del sustrato.

- Equipos de actividad Metanogénica

La configuración más utilizadas por diferentes autores es la presentada en la figura 4.1, pero Torres y Pérez (2010) sugieren el uso de la configuración mostrada en la figura 4.2, indicando que su uso previene daños del ensayo, si se presenta presiones negativas al interior del sistema, lo que podría ocasionar una succión del NaOH al reactor biológico (R1) afectándolo totalmente; dicha configuración. Consiste en colocar en un nivel superior a (R1) de la solución de NaOH (R2).

Adicionalmente, la manguera dentro de la solución de NaOH (R2) se sugiere colocarla en forma de "U" con el objetivo de que actúe como un sifón y dificulte el paso del NaOH hacia R1. Por lo tanto, para el montaje del sistema se ensayara la metodología presentada por Torres y Pérez (2008) (ver Anexo A6), y si no se tiene buenos resultados, se usar la configuración comúnmente presentada.

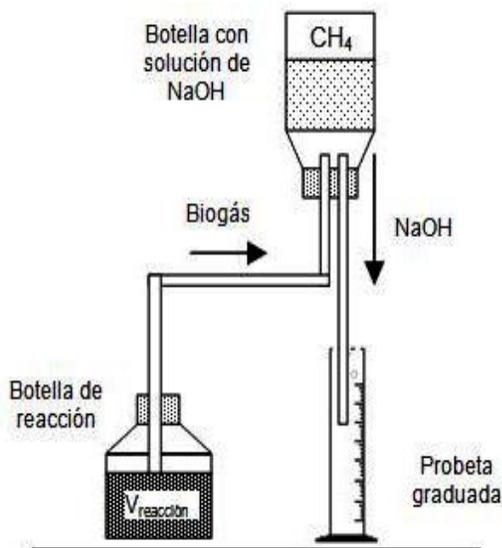


Figura 4.1: Configuración convencional del montaje de AME. Fuente: Torres y Pérez, 2008

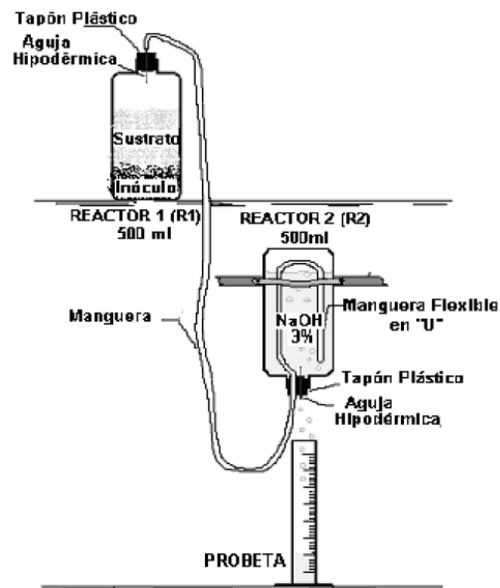


Figura 4.2 Configuración propuesta para montaje de AME. Fuente: Torres y Pérez, 2008

- Preparación del agua residual

### *Nutrientes*

El agua residual en estudio debe poseer ciertas adecuaciones que garanticen una buena cantidad de nutrientes. Debido que existe una cantidad de nutrientes en exceso, con base a los resultados obtenidos en el muestreo, no será necesario el uso de nutrientes extras.

### *Temperatura*

Para el crecimiento óptimo de las bacterias metanogénicas, Ince, Kasapgil y Yenugun (2001), indica que es necesario manejar temperaturas de  $30 \pm 5$  °C; para lograr dichas condiciones, se adaptará un sistema que permita realizar un baño maría y a cada reactor se le incorporará un termómetro para monitorear la temperatura.

### *pH*

Debe mantenerse en un rango de 6.8 -7.6. Para garantizar el rango del pH se recomienda utilizar una solución tampón (Ortiz, 2011). En esta investigación se utilizará una solución tampón conformada por fosfato bipotásico ( $K_2HPO_4$ ) y fosfato mono potásico ( $KH_2PO_4$ ) (Ver Anexo A7 para cálculos de solución Tampón).

Cada 48 horas será tomada una muestra del reactor y se medirá pH para controlar que se mantenga en el rango antes descrito y si de ser necesario, se inyectara la solución tampón, por lo que cada reactor tendrá adaptado una aguja hipodérmica intravenosa.

## **Procedimiento**

### Puesta en marcha

1. Acondicionar las tapas de los reactores, con el termómetro, manguera de conducción del metano y agua hipodérmica, sellando con silicón.
2. Marcar todos los reactores con su número y composición para poder ser reconocidos.
3. Llenar los reactores con el agua residual, asegurándose previamente de ajustar el pH en  $7.0 \pm 0.5$  con la solución tampón.

4. Colocar en un baño maría hasta llegar a la temperatura de trabajo,  $30 \pm 5$  °C.
5. Sellar los reactores con cinta aislante.
6. Colocar cada uno de los reactores en el sistema de baño maría.
7. Adaptar la manguera de conducción de metano a su sistema correspondiente de fijación de CO<sub>2</sub>.

#### Monitoreo diario

1. En las primeras aproximadamente 24 horas no se produce metano por lo cual debe hacerse el monitoreo cada hora del goteo del sistema de fijación de CO<sub>2</sub>, si se presenta goteo hay fuga.
2. A partir de las 24 horas comienza la medición del NaOH desalojado del sistema, con un monitoreo de forma constante.
3. Cada 48 horas a partir del segundo día se extrae una muestra de 0.5 mL del agua residual y con papel pHmetro se determina el pH, controlando que no baje de 7.0.
4. Realizar una agitación manual al menos tres veces al día.

Paralelamente se realiza la curva de volumen de NaOH desplazado.

#### **4.1.2 Producción de metano y cálculo de AME**

La producción teórica de metano se estima por medio de la ecuación 4.4 (Lozada, Chafón y Pereda, 2010):

$$V_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(t)}$$

*Ecuación 4.4*

Al calcularse el volumen teórico de metano producido debe tomarse en cuenta las condiciones de temperatura y presión atmosférica bajo las cuales se realicen los montajes de AME, y eso es por medio de la ecuación 4.5:

$$K(t) = \frac{P * K}{R * (273 + T)}$$

Ecuación 4.5

La ecuación 4.4 al incluir el valor de la carga en el reactor ( $DQO_{CH_4}$ ), su valor es asumido como la relación entre el volumen de  $CH_4$  teórico producido y el valor de DQO removida en el cálculo de AME que se efectúa por medio de la ecuación 4.6:

$$AME (gDQO/gSTV * d) = \frac{m * 24}{V_{CH_4} * M}$$

Ecuación 4.6

Para el cálculo de la pendiente (m) se construirá una curva de “volumen acumulado de  $CH_4$ ” vs “tiempo del ensayo”, este último podrá ser determinado una vez la curva se torne asintótica según lo indicado por Lozada et al. (2010).

#### 4.1.2 Resultados del Test de Actividad Metanogénica (AME)

##### Estimación de dilución

El sustrato fue caracterizado previamente para determinar gSVT/L, en donde se obtuvo un valor de 7.87 gSVT/L (ver Anexo A8). Los valores recomendados para una buena digestión anaeróbica son de 2 a 5 gSVT/L (Díaz y Molina, 2002), lo cual es posible alcanzarla con una dilución al 50%.

$$V_1 C_1 = V_2 C_2$$

Ecuación 4.7

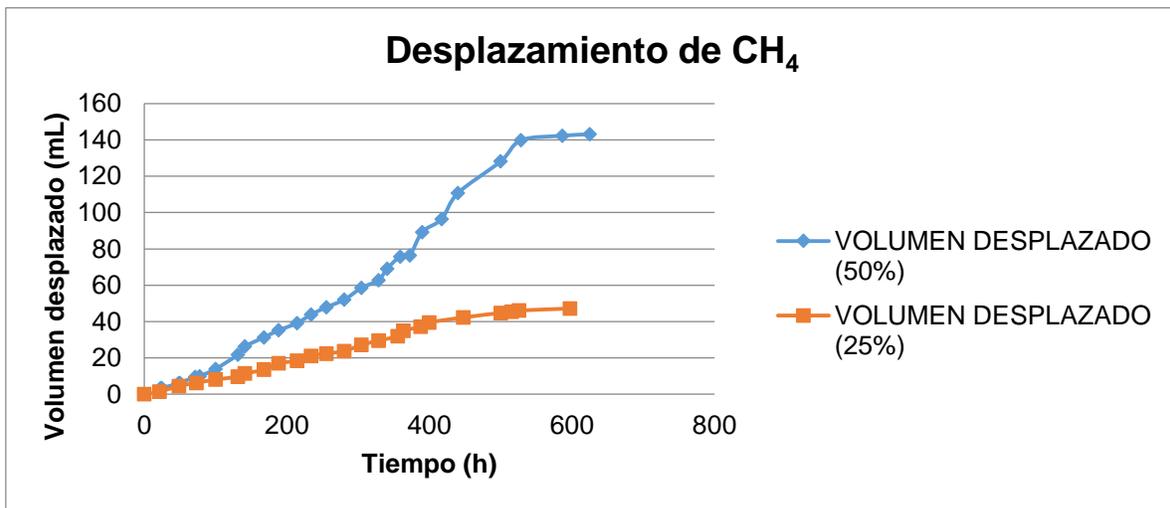
$$C_2 = \frac{V_1 * C_1}{V_2}$$

$$C_2 = \frac{1.0 L * (7.87 \frac{gSVT}{Lt})}{2 L} = 3.93 \frac{gSVT}{L}$$

### Generación de curva de volumen desplazado

Con un monitoreo total de 600 horas, se dio seguimiento al volumen desplazado de una disolución del 50% y a una del 25% para comparar la tendencia entre estas. En el Anexo A9 se presenta una tabla con dichos valores para cada disolución; los resultados son presentados en la figura 4.3:

Figura 4.3: Curva de producción de CH<sub>4</sub> acumulada.



Fuente: Elaboración propia a partir de mediciones.

Donde se puede evidenciar claramente un mayor desplazamiento de volumen a una concentración del 50%.

### Cálculo posterior al Test de Actividad Metanogénica Específica (AME)

El agua residual cruda, contiene:

$$DQO = 9.62 \frac{gDQO}{L}$$

$$SVT = 7.87 \frac{gSVT}{L}$$

Si el biodigestor de 1 L de capacidad está conformado por 0.5 L del agua residual cruda y 0.5 L de agua potable:

$$DQO_{inicial} = 9.62 \frac{gDQO}{L} * 0.5 L = 4.81 gDQO$$

$$SVT = 7.87 \frac{gSVT}{L} * 0.5 L = 3.94 gSVT$$

Al realizar la estimación de DQO, al finalizar el período de la prueba se obtuvieron  $1.10 \frac{gSVT}{L}$  (ver Anexo A10) y una DQO de  $1.58 \frac{gDQO}{L}$ , para el volumen correspondiente a un litro del biodigestor:

$$DQO_{final} = 1.58 \frac{gDQO}{L} * 1 L = 1.58 gDQO$$

- Calculo del factor de corrección con ecuación 4.5:

$$K(t) = \frac{1.00 atm * 64 \frac{gDQO}{mol}}{0.08206 \frac{atm L}{mol K} (273 + 33)K} = 2.548 \frac{gDQO}{L}$$

- Calculo de metano teórico con ecuación 4.8, en donde

$$DQO_{CH_4} = DQO_{inicial} - DQO_{final}$$

Ecuación 4.8

$$DQO_{CH_4} = 4.81 gDQO - 1.58 gDQO = 3.22 gDQO$$

$$V_{CH_4} = \frac{3.22 gDQO}{2.548 \frac{gDQO}{L}} = 1.27 \frac{mL CH_4}{gDQO}$$

- Calculo de AME, por medio de la ecuación 4.6, tomando como pendiente máxima, la obtenida en la curva de producción,  $m = 0.2515 \frac{mL CH_4}{h}$ .

$$AME \left( \frac{g^{DQO}}{g^{STV} * d} \right) = \frac{0.2515 \frac{mL CH_4}{h} * 24}{1.27 \frac{mL CH_4}{g^{DQO}} * 3.94 g^{STV}} = 1.21 \frac{g^{DQO}}{g^{STV} * d}$$

Los valores óptimos reportados por la bibliografía (Guerra, Trupiano y Figueroa, 2001; Enriquez et al., 2011; Lorenzo, Chafón, J. M., y Pereda, 2013) rondan valores entre 0.5 a 2.0  $\frac{g^{DQO}}{g^{STV} * d}$ ; por lo que se puede constatar que un tratamiento anaeróbico es totalmente viable.

#### 4.2 Prueba de Jarras para agua residual cruda

La turbidez y el color del agua son factores importantes al momento de determinar la calidad del agua y principalmente son causados por partículas muy pequeñas, llamadas partículas coloidales. Estas partículas permanecen en suspensión en el agua por tiempo prolongado y pueden atravesar un medio filtrante muy fino; para eliminar estas partículas se recurre a los procesos fisicoquímicos de coagulación y floculación (Andía, 2000).

Los tratamientos fisicoquímicos cubren una serie de objetivos, de los cuales, para el caso de las aguas residuales, cabría destacar los siguientes (GAIKER, 2017):

- Reducción de sólidos en suspensión y materia orgánica (DQO y DBO) como alternativa al tratamiento biológico.
- Laminado o estabilización de cargas contaminantes para controlar la entrada a los tratamientos biológicos.
- Reducción de contaminantes industriales no biodegradables (sobre todo metales pesados).
- Eliminación de fósforo.
- Espesamiento de lodos.

La Prueba de Jarras es un método de simulación de un proceso de coagulación-floculación para el tratamiento del agua a gran escala, proporcionando a operadores de sistema una idea razonable de la manera en que un producto químico del tratamiento se

comportará y operará ante un tipo particular de agua cruda. Debido a que imita el funcionamiento a gran escala, los operadores del sistema pueden usar las pruebas de jarras para ayudar a determinar qué tipo de producto químico de tratamiento funcionará mejor con el agua de su sistema.

La prueba implica ajustar la cantidad de productos químicos del tratamiento y la secuencia en la cual se agregan a las muestras del agua cruda sostenida en tarros o vasos de precipitados. La muestra se agita entonces de modo que la formación, el desarrollo y el asentamiento del flóculo pueden ser observados tal como sería en la planta de tratamiento a escala completa. El operador realiza entonces una serie de pruebas para comparar los efectos de diferentes cantidades de agentes de floculación a diferentes valores de pH para determinar el flóculo de tamaño adecuado para una planta en particular (Zane, 2005).

El grado de clarificación resultante depende tanto de la cantidad de productos químicos que se añade como del nivel de control de procesos. Mediante el proceso de coagulación-floculación, es posible conseguir efluentes clarificados básicamente libres de materia en suspensión o en estado coloidal y se puede llegar a eliminar del 80 al 90% de la materia total suspendida, entre el 40 y el 70% de la DBO<sub>5</sub>, del 30 al 60% de la DQO y entre el 80 y el 90% de las bacterias. Estas cifras contrastan con los rendimientos de eliminación de los procesos de sedimentación simple, en los que la eliminación de la materia suspendida sólo alcanza valores del 50 al 70% y en la eliminación de la materia orgánica sólo se consigue entre el 30 y el 40% (Ros, 2011).

Se plantea que para romper la estabilidad de las partículas coloidales y poderlas separar, es necesario realizar tres operaciones, estas son: la coagulación, la floculación y la decantación o flotación posterior, las que se describen a continuación:

- **La coagulación**

Tiene por objetivo la desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que las mantienen separados, por medio de la adición de coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado a las partículas en suspensión; es decir, facilitar su aglomeración (Freese y Nozaic, 2003).

La coagulación es el tratamiento más eficaz, pero también es el que representa un gasto elevado cuando no está bien realizado. Es igualmente el método universal debido a que elimina una gran cantidad de sustancias de diversas naturalezas y de peso de materia que son eliminados al menor costo, en comparación con otros métodos.

Los componentes de los coagulantes son productos químicos que al adicionar al agua son capaces de producir una reacción química con los componentes químicos del agua, especialmente con las sustancias alcalinas (disueltas o suspendidas) del agua para formar un precipitado voluminoso, muy absorbente, constituido generalmente por el hidróxido metálico del coagulante que se está utilizando (Andía, 2000).

Los principales coagulantes utilizados para desestabilizar las partículas y producir el floculo son (Freese, Trollip y Nozaic, 2003):

- Sulfato de aluminio.
- Sulfato de aluminio libre de hierro.
- Aluminato de Sodio.
- Cloruro de Aluminio.
- Cloruro Férrico.
- Sulfato Férrico.
- Sulfato Ferroso.
- Polielectrolitos (como ayudantes de la floculación).

En la década de los 80 se empezaron a desarrollar los denominados coagulantes prepolimerizados de sales metálicas, entre los que cabe destacar el Policloruro de Aluminio (PAC), convirtiéndose en un compuesto muy común en procesos de coagulación - floculación (Torra, Valero, Bisbal y Tous, 2000).

- Factores que influyen en la Coagulación

Es necesario tener en cuenta los siguientes factores con la finalidad de optimizar el proceso de coagulación (Andía, 2000):

- pH.
- Turbidez.

- Sales disueltas.
- Temperatura del agua.
- Tipo de coagulante utilizado.
- Condiciones de mezcla.
- Sistemas de aplicación de los coagulantes.
- Tipos de mezcla y color.

La interrelación entre cada uno de ellos, permite predecir cuáles son las cantidades de los coagulantes a adicionar al agua.

- ***La floculación***

La segunda etapa de la mezcla corresponde a una mezcla lenta, que tiene por objeto permitir los contactos entre los flóculos. La mezcla debe ser lo suficiente como para crear diferencias de velocidad del agua dentro de la unidad pero no muy grande, ya que los flóculos corren riesgo de romperse; aun si el tiempo es no más del tiempo óptimo de floculación.

La floculación es el proceso que sigue a la coagulación, que consiste en la agitación de la masa coagulada que sirve para permitir el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesarios para sedimentarlos con facilidad. Estos flóculos inicialmente pequeños, crean al juntarse, aglomerados mayores que son capaces de sedimentar (Lorenzo, 2006).

En ocasiones sucede que los flóculos formados por la aglomeración de varios coloides no son lo suficientemente grandes como para sedimentar con la rapidez deseada, por lo que el empleo de un floculante es necesario para reunirlos en forma de red, formando puentes de una gran superficie a otra enlazando las partículas individuales en aglomerados.

La floculación es favorecida por el mezclado lento, pues permite juntar poco a poco los flóculos; un mezclado demasiado intenso los rompe y raramente se vuelven a formar en su tamaño y fuerza óptimos. La floculación no solo incrementa el tamaño de las partículas del flóculo, sino que también aumenta su peso.

Los floculantes son polímeros o poli electrolitos con pesos moleculares muy elevados, moléculas orgánicas solubles en agua formadas por bloques denominados monómeros, repetidos en cadenas largas. Estos floculantes pueden ser de naturaleza mineral, orgánico natural y de síntesis orgánico (Andía, 2000).

Muchos estudios indican la gran efectividad de remoción del Sulfato de Aluminio y el Policloruro de Aluminio (eficiencias superiores al 93% en remoción de turbidez y arriba del 80% en remoción de materia orgánica) y su bajo costo comparados con los demás coagulantes (Guerra, Struck y Villalobos, 2008), por lo que para la toma de decisión se compara la eficiencia en el agua a tratar entre estos dos coagulantes-floculantes.

#### **4.2.1 Metodología de la Prueba de Jarras**

La “Prueba de Jarras” es un método de simulación de los procesos de coagulación y floculación que se realiza a nivel de laboratorio, que permite obtener agua de buena calidad y fácilmente separable por decantación; los flóculos formados con diferentes dosis del coagulante dan como resultado valores de turbidez diferentes.

La Norma ASTM D 2035-80 (2013), plantea de la siguiente forma los lineamientos a seguir a la hora de realizar la Prueba de Jarras:

1. Mida volúmenes iguales (1000 mL) de muestra en cada uno de los frascos o vasos de precipitado de 1500 mL. Pueden utilizarse tantas porciones simples como posiciones disponibles en el agitador múltiple. Ubique los vasos de precipitados de modo que las paletas estén descentralizadas, pero limpie la pared del vaso de precipitados en unos 6.4 mm (1/4 in). Registre la temperatura de la muestra al comienzo de la prueba.
2. Cargue los productos químicos de la prueba en los bastidores de reactivos. Utilice un estante para cada serie de adiciones químicas. Prepare cada tubo en el estante hasta un volumen final de 10 mL, con agua, antes de usar. Puede haber un momento en que se necesite un volumen mayor de reactivo. Si esta condición prevalece, llene los tubos con agua a un volumen igual al mayor volumen de reactivo en el estante de reactivos.

3. Cuando se añaden lechadas, puede ser necesario sacudir la rejilla para producir un movimiento de remolino justo antes de la transferencia.
4. Encienda el agitador múltiple funcionando a la velocidad de "flash mix" de aproximadamente 120 RPM. Añadir la solución de ensayo o las suspensiones, a niveles de dosis predeterminados y secuencia. Mezcla durante aproximadamente 1 minuto después de las adiciones de productos químicos. Registre el tiempo y la velocidad de mezcla del flash (RPM).
5. Reduzca la velocidad, según sea necesario, hasta el mínimo requerido para mantener las partículas floculares uniformemente suspendidas durante el período de "mezcla lenta". Mezcla lenta durante 20 min. Registre el tiempo para la primera formación visible de flóculos. Cada 5 min (durante el período de mezcla lenta), registre el tamaño relativo del flóculo y la velocidad del mezclador (RPM). Si se usan coadyuvantes de floculación, la velocidad de mezclado es crítica, ya que la agitación excesiva tiende a romper la formación inicial de flóculos y puede redispersar la ayuda.
6. Después del período de mezcla lenta, retire las paletas y observe la sedimentación de las partículas de flóculo. Registre el tiempo requerido para que la masa de las partículas se asiente. En la mayoría de los casos, este tiempo será el requerido para que las partículas se depositen en el fondo del vaso de precipitados. Sin embargo, en algunos casos puede haber interferencia por corrientes de convección. Si es así, el tiempo de sedimentación registrado debe ser aquel en el que las partículas no estabilizadas o residuales parecen moverse igualmente hacia arriba y hacia abajo.
7. Después de 15 min de sedimentación, registre la aparición de flóculo en el fondo del vaso. Registre la temperatura de la muestra. Mediante una pipeta o sifón, extraer un volumen simple adecuado del líquido sobrenadante del frasco en un punto de la mitad de la profundidad de la muestra, para llevar a cabo el color, la turbidez, el pH y otros análisis requeridos determinados de acuerdo con los Métodos de Ensayo D 1889 y D 1293.
8. Repita los pasos del 1-6 hasta que todas las variables pertinentes hayan sido evaluadas.
9. Los tiempos dados en 3, 4 y 6 son solo sugerencias.

De lo expuesto hasta ahora, la primera conclusión práctica es que un ensayo de tratamiento a escala de laboratorio es afectado por ciertas variables, las cuales a su vez no son técnicamente idénticas a las variables de proceso a escala industrial. Por ello, el resultado de la dosis óptima de reactivo que se obtiene al llevar a cabo la Prueba de Jarras no tiene por qué ser directamente aplicable a la explotación: de hecho, estadísticamente suelen existir diferencias. La dosis óptima de una Prueba de Jarras es una dosis orientativa que, efectivamente, servirá para ir ajustando el proceso y lograr el funcionamiento óptimo y el rendimiento máximo. El ajuste fino de las dosis será misión del explotador de la estación de tratamiento o depuración, en función de las demás variables implicadas en el proceso industrial, y de ningún modo contempladas en el ensayo de laboratorio, por más minucioso que éste sea (Marín, 2008).

### **Procedimiento experimental**

Para óptimos resultados el desarrollo de la metodología antes planteada se realiza en un equipo especializado de prueba de jarras, pero puede improvisarse a escala de laboratorio con Hot plate y vasos de precipitado, de la siguiente manera, asumiendo que la velocidad de coagulación-floculación no es dependiente de las velocidades de agitación, en este caso por la naturaleza del agua:

- Llenar para cada muestra de agua (generalmente agua cruda), seis vasos de precipitado (250 mL) con cantidades iguales de la muestra de agua.
- Colocar dentro del vaso de precipitados un agitador magnético y luego colocar el vaso de precipitados sobre un Hot Plate, regulando una velocidad de agitación rápida (ver Anexo A12).
- Se regula el pH de cada vaso de precipitados cubriendo el rango de pH en el que trabaja el coagulante-floculante a utilizar.
- Agregar una dosis fija de coagulante y determinar el pH óptimo sobre el cual actúa el coagulante. Para la práctica, se agrega 1 mL a cada vaso.
- Agitar rápidamente durante 1 minuto y luego disminuir la agitación según sea necesario, hasta el mínimo requerido para mantener las partículas floculares uniformemente suspendidas durante el período de "mezcla lenta" (durante 10 min).

- Determinar el pH óptimo para el coagulante.
- Volver a llenar con la misma cantidad que al inicio de la prueba, los vasos de precipitado.
- Regular el pH de cada vaso de precipitados hasta hacerlo llegar al óptimo obtenido anteriormente.
- Cada vaso de precipitados de la muestra de agua se trata con una dosis diferente del producto químico;
- Mediante la comparación de la calidad final del agua lograda en cada vaso, se puede determinar el efecto de los diferentes parámetros de tratamiento; y
- Medir la turbidez y el pH de cada vaso cuidando de no resuspender las partículas del sedimento de la muestra.
- Determinar la dosis óptima del coagulante.

### **Materiales y equipo**

- 6 Hot plate con agitación magnética.
- 3 Agitadores magnéticos.
- 1 balón volumétrico de 25 mL.
- 1 balón volumétrico de 100 mL.
- 1 Pera de succión.
- 2 Pipetas graduadas de 10 mL.
- 1 Espátula.
- 7 Beaker de 1,000 mL.
- 1 Balón volumétrico de 1 L.
- 1 Probeta de 100 mL.
- 1 probeta de 25 mL.
- 1 Probeta de 10 mL.
- 1 Turbidímetro.

Según Cabrera, Filleites y Contreras (2009) se evalúa de forma práctica y sencilla, la turbidez como parámetro de respuesta en cada caso, pudiendo evaluarse la eficiencia del proceso determinando el porcentaje de remoción, por la ecuación 4.9:

$$\% \text{ de remoción} = \frac{\text{turbidez}_i - \text{turbidez}_f}{\text{turbidez}_i}$$

Ecuación 4.9

La turbidez en el agua puede ser causada por la presencia de partículas suspendidas y disueltas de gases, líquidos y sólidos tanto orgánicos como inorgánicos, con un ámbito de tamaños desde el coloidal hasta partículas macroscópicas, dependiendo del grado de turbulencia. Puede ser medida con un turbidímetro del tipo nefelométrico que se basa en el efecto de Tyndall. La unidad de turbidez, es definida "como la obstrucción óptica de la luz, causada por una parte por millón de sílice en agua destilada", la unidad nefelométrica de turbidez (NTU) equivale a 7,5 ppm de SiO<sub>2</sub>.

#### 4.2.2 Resultados de Prueba de Jarras para agua cruda

La prueba se realizó no solamente para encontrar el pH y dosis óptima de coagulante sino que además, se comparó la eficiencia entre los mejores coagulantes-floculantes evaluados según investigación bibliográfica, y utilizados actualmente en plantas de tratamiento de aguas residuales. Para la regulación de pH se hace uso de Ácido Sulfúrico e Hidróxido de Sodio, ambos con una concentración de 1.0 M; el primero, es el reactivo con el cual se regularán a pH ácidos y se encuentra dentro de los procedimientos oficiales para las pruebas de coagulación floculación y el segundo, fue seleccionado debido a que al utilizar cal viva para la regulación de pH, esta afecta sustancialmente la dureza del agua (Andía, 2000); en cambio el NaOH solamente aporta los iones básicos OH<sup>-</sup> causantes del aumento del pH:

##### Resultados de la prueba, utilizando Sulfato de Aluminio (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>) al 15% p/V

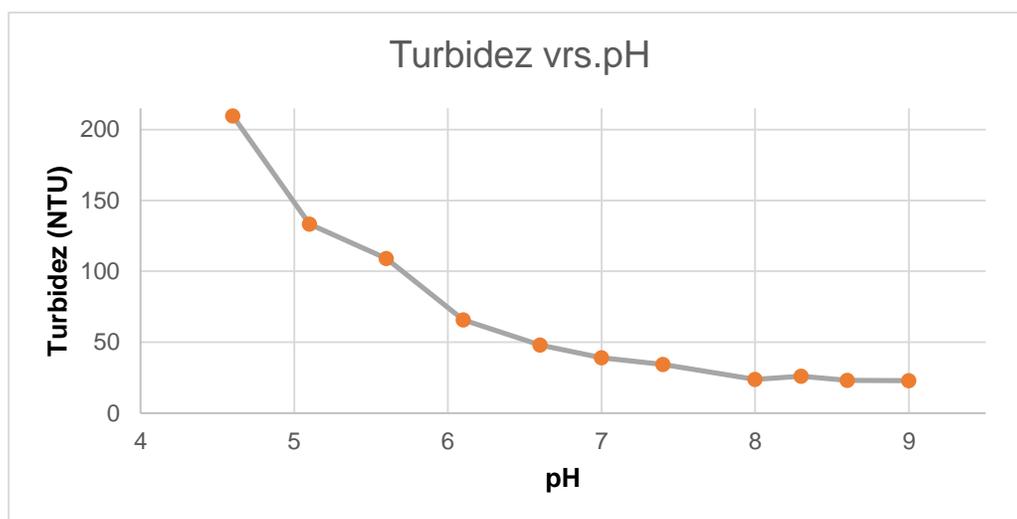
Al realizar la prueba de pH óptimo, los valores de turbidez obtenidos se presentan en la tabla 4.1:

Tabla 4.1: Valores de turbidez, debido a la variación de pH a dosis constante, Sulfato de Aluminio al 15% p/V.

pH <sub>inicial</sub>	Turbidez (NTU)	pH <sub>final</sub>
4.6	209.5	3.4
5.1	133.4	3.5
5.6	109.1	3.6
6.1	65.7	3.8
6.6	48.0	3.8
7.0	39.1	3.8
7.4	34.4	3.9
8.0	23.8	3.9
8.3	26.1	3.9
8.6	23.1	4.0
9.0	22.8	3.9

Fuente: Elaboración propia a partir de mediciones directas.

Figura 4.4: Gráfico Turbidez-pH para conocer pH óptimo, Sulfato de Aluminio al 15% p/v.



Fuente: Elaboración propia a partir de mediciones

Como se puede observar en la figura 4.4, el Sulfato de Aluminio presenta una mejor remoción a un pH de 8.6.

Seguidamente se presentan el resultado de las pruebas para obtener la dosificación óptima a un pH de 8.6:

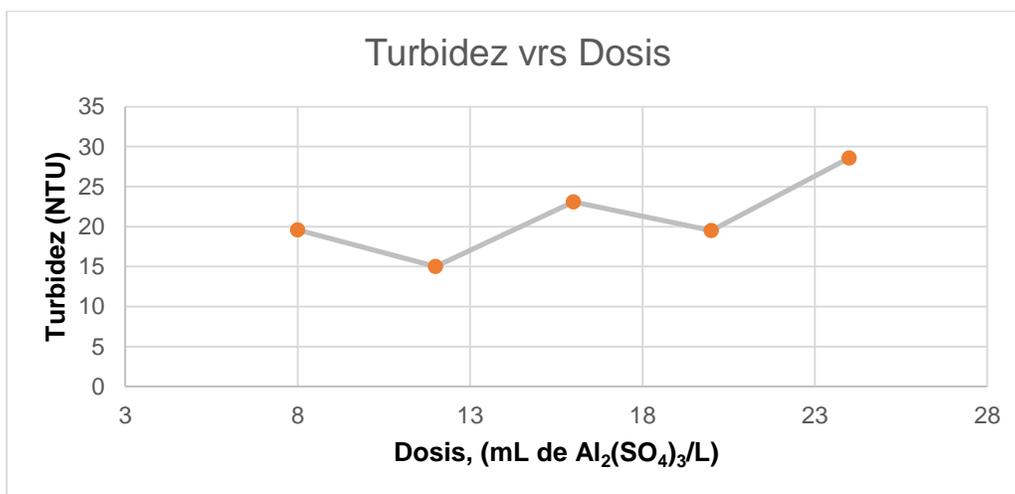
*Tabla 4.2: Valores de turbidez, debido a variación de dosis a pH óptimo, para Sulfato de aluminio al 15% p/V*

<b>Dosis (mL de Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>/L)</b>	<b>Turbidez (NTU)</b>
4	222
8	19.6
12	15.0
16	23.1
20	19.5
24	28.6

*Fuente: Elaboración propia a partir de mediciones directas*

Al analizar los resultados de la determinación de turbidez para la variación de las dosis a pH óptimo, el primer valor medido de turbidez se aleja significativamente del conjunto de datos restantes (tabla 4.2) por lo que se elimina, obteniendo así un gráfico como el mostrado en la figura 4.5.

*Figura 4.5: Gráfico Turbidez-Dosis para conocer dosis óptima de Sulfato de Aluminio al 15% p/v.*



*Fuente: Elaboración propia a partir de mediciones.*

De lo anterior, se concluye que la mejor dosis para el tratamiento del agua en estudio es igual a **12mL** de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  por litro de agua residual al **15%p/V**, con un pH de 8.6 el cual fue regulado utilizando  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y  $\text{NaOH}$ .

Calculando la eficiencia de remoción del  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , con concentración de 15% p/V, mediante la turbidez y sustituyendo en ecuación 4.9:

$$\% \text{ de remoción} = \frac{2,619.20 \text{ NTU} - 15.00 \text{ NTU}}{2,619.20 \text{ NTU}} * 100\%$$

$$\% \text{ de remoción} = 99.42\%$$

Calculando la eficiencia de remoción mediante la Demanda Química de Oxígeno (DQO), que al medirlo se obteniendo un valor de 6.75 mg/L (ver Anexo A14) y sustituyendo en la ecuación 4.10:

$$\% \text{ de remoción} = \frac{DQO_i - DQO_f}{DQO_i} * 100\%$$

*Ecuación 4.10*

$$\% \text{ de remoción} = \frac{9,620 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 6.75 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{9,620 \frac{\text{mg}}{\text{L}}} * 100\%$$

$$\% \text{ de remoción} = 99.93 \%$$

*Resultados de la prueba, utilizando Policloruro de Aluminio (PAC) al 8% p/V*

Al realizar la prueba de pH óptimo, los valores de turbidez obtenidos se presentan en la tabla 4.3:

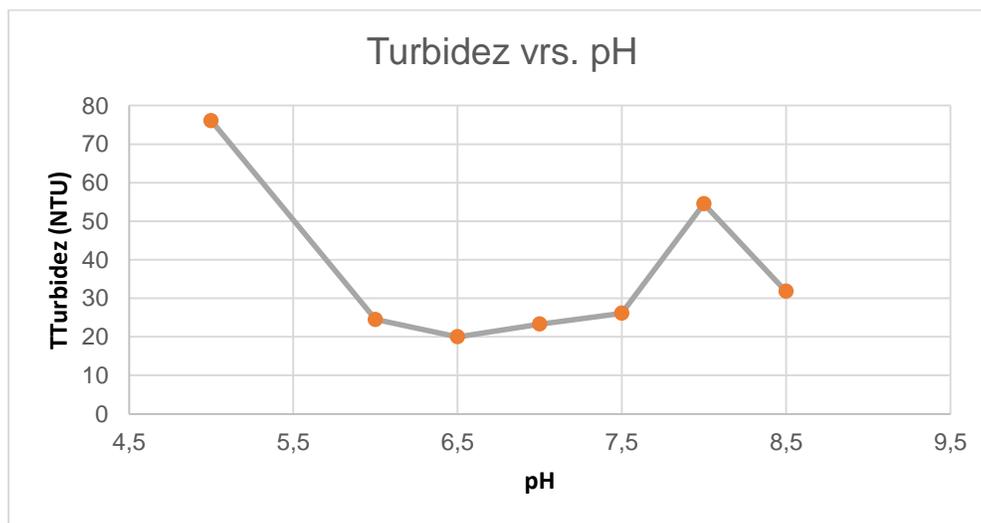
Tabla 4.3: Valores de turbidez, debido a la variación de pH a dosis constante para PAC al 8% p/v.

pH <sub>inicial</sub>	Turbidez (NTU)	pH <sub>final</sub>
5.0	76.1	7.2
6.0	24.5	7.2
6.5	20.0	7.2
7.0	23.3	7.3
7.5	26.1	7.2
8.0	54.5	7.3
8.5	31.8	7.3
9.0	474.3	7.3
9.5	1,150.5	7.4

Fuente: Elaboración propia a partir de mediciones directas.

Eliminando los últimos datos para obtener una gráfica más clara de la Figura 4.6, se obtiene:

Figura 4.6: Gráfico Turbidez-pH para conocer pH óptimo con PAC al 8% p/v.



Fuente: Elaboración propia a partir de mediciones

Como puede observarse, el Policloruro de Aluminio presenta una mejor remoción a un pH de 6.5.

Seguidamente se presentan los resultados de las pruebas para obtener la dosificación óptima a un pH de 6.5:

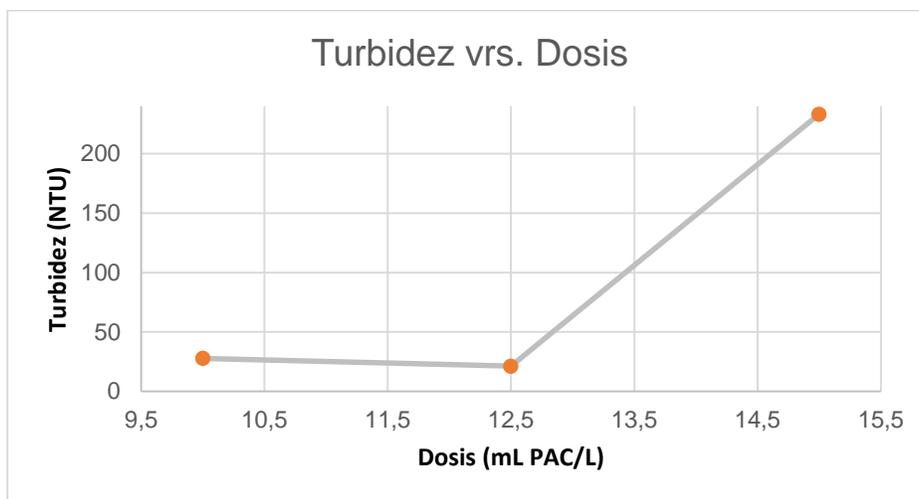
Tabla 4.4: Valores de turbidez, debido a variación de dosis a pH óptimo, PAC al 8% p/V.

Dosis (mL de PAC/L)	Turbidez (NTU)
7.5	591.0
10	27.8
12.5	21.2
15	233.3

Fuente: Elaboración propia a partir de mediciones directas

En donde al eliminar el primer dato para obtener una gráfica más clara, se obtiene:

Figura 4.7: Curva Turbidez-Dosis para conocer dosis óptima de PAC al 8% p/v.



Fuente: Elaboración propia a partir de mediciones directas.

Para un pH de 6.5, la dosis óptima de coagulante PAC al **8% p/V** de agua residual a utilizar, es **12.5 mL** por litro de agua residual.

Calculando la eficiencia de remoción del PAC, a una concentración de 8% p/V, mediante la turbidez:

$$\% \text{ de remoción} = \frac{\text{turbidez}_i - \text{turbidez}_f}{\text{turbidez}_i} * 100\%$$

$$\% \text{ de remoción} = \frac{2,619.20 \text{ NTU} - 10.2 \text{ NTU}}{2,619.20 \text{ NTU}} * 100\%$$

$$\% \text{ de remoción} = 99.61\%$$

Calculando la eficiencia de remoción mediante la Demanda Química de Oxígeno (DQO). Que al medirla arrojó un valor de 1690.0 mg/L (ver Anexo A16) y sustituyendo en la ecuación 4.10:

$$\% \text{ de remoción} = \frac{9,620 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 1,690 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{9,620 \frac{\text{mg}}{\text{L}}} * 100\%$$

$$\% \text{ de remoción} = 82.43 \%$$

### 4.3 Selección de alternativa de tratamiento

Es posible tratar las aguas residuales de origen ganadero por sistemas aeróbicos, anaeróbicos o fisicoquímicos, pero sus niveles de carga orgánica que se estiman son de 15 a 80 veces más alta con respecto a las aguas residuales domésticas (Pérez, 2010) limitan la selección y aplicación en el caso de los tratamientos aeróbicos y fisicoquímicos.

Los tratamientos aeróbicos ofrecen una manera rápida y sencilla de degradar los residuos de una manera inofensiva, por medio de la aireación; pero cargas orgánicas y sólidos suspendidos demasiado altos, requieren grandes períodos de aireación para lograr estabilizar el sistema debido a que el oxígeno es incapaz de disolverlas lo suficientemente rápido y el agua residual en dicho proceso tiende a descomponerse secuencialmente en grupos de bacterias anaeróbicas, generando olores y descomposición, significando un problema para los alrededores. Los grandes períodos de aireación implican una gran demanda energética para el suministro de aire u oxígeno, por lo que se requiere una sólida estabilidad económica que permita sufragar los gastos fijos o una fuente de energía propia.

Un tratamiento fisicoquímico de coagulación-floculación, también resultaría ser una alternativa de tratamiento primaria pues se eliminan los gastos energéticos planteados por el tratamiento aeróbico, pero la cantidad de nuevos lodos generados, de cerca del cincuenta por ciento del volumen total, como pudo observarse en la Prueba de Jarras, indica que su aplicación como única alternativa de tratamiento traería consigo un impacto ambiental significativamente alto debido a la cantidad de lodos generados, los cuales requieren tratamiento posterior.

Por tanto, la aplicación de las alternativas expuestas requiere de un tratamiento previo que permita reducir la carga orgánica a niveles dentro de los cuales sean capaces de ser digeridos por dichos tratamientos. Diversos autores (Ruiz, Álvarez y Soto, 2002; Pérez, 2010; Arango y Sanches 2009; Salamaca, 2009) coinciden que para aguas residuales que se caracterizan por altas cargas de compuestos orgánicos, sólidos suspendidos, sedimentables y un pH relativamente básico, tal como lo presentan las aguas residuales de origen ganadero, el uso de un tratamiento anaeróbico, pues representa la mejor alternativa debido a que son considerados muy eficaces y económicos inclusive cuando los valores de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) están dentro de un rango de 18 a 20 g DQO/L\*d (Arango y Sanches, 2009).

Ruiz, Álvarez y Soto (2002) indican que el proceso anaerobio permite eliminar gran parte de los Sólidos Sedimentables y de la Demanda Química Oxígeno (DQO) en una tan sola etapa, sustituyendo al decantador primario, al digestor de lodos activos (aerobio) y al proceso de estabilización de lodos. En el proceso se genera solamente un diez por ciento en volumen en lodos (Henze, Loosdrecht, Ekama y Brdjanovic, 2008), como pudo ser evidenciado en el Test de Actividad Metanogénica Específica, presentando así una ventaja sumamente significativa en comparación a un tratamiento fisicoquímico.

Lo anterior es posible debido a que el 90% de la DQO como se mencionó en capítulos anteriores, es transformado a metano que al generar un ambiente de alto contenido de este dentro de la unidad del biodigestor, esteriliza naturalmente al estiércol que se está descomponiendo matando casi el 90% de protozoos, quistes y bacterias causantes de enfermedades, tales como E. Coli, dando como resultado un efluente de alta calidad que

se puede usar con seguridad como fertilizante sobre los cultivos alimentarios, así como del metano, debido a su poder calorífico con potencial de aprovechamiento (Ortega, 2009).

Por todas estas razones anteriormente expuestas y con base a los resultados del Test de Actividad Metanogénica Específica, con un valor de AME que indica una generación óptima de metano, se propone como tratamiento primario una digestión anaeróbica, y como secundario un tratamiento fisicoquímico. Para el tratamiento secundario, se selecciona como coagulante – floculante el Policloruro de Aluminio (PAC) pues, además de presentar una alta eficiencia de remoción de turbidez y de carga orgánica, posee muchas más ventajas tanto económicas como medio ambientales (ver tabla 4.5). Al plantear este proceso de tratamiento para dicha propuesta, es necesario determinar la dosis óptima de PAC posterior a la digestión (en este caso posterior a un Test de Actividad Metanogénica Específica), ya que las propiedades fisicoquímicas se han transformado, siendo necesario una Prueba de Jarras, la que detalla en el Anexo A17, obteniendo una dosis óptima de: 13.5 mL de PAC por litro al 5% p/V a un pH de 8.5.

Tabla 4.5: Ventajas y desventaja del uso de los coagulantes Policloruro de Aluminio (PAC) y Sulfato de Aluminio.

<b>Coagulante</b>			
<b>Policloruro de Aluminio (PAC)</b>		<b>Sulfato de Aluminio</b>	
<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Un rango de trabajo de pH más amplio.			
Aluminio residual más bajo.		Conocido, con buena disponibilidad en el mercado.	El rango de trabajo de pH muy limitado.
Mejor comportamiento en aguas frías			Problemas con agua de alta turbiedad.
Mejor remoción de sustancias orgánicas.	Precio más alto por kg.	Autoridades no cuestionan su uso.	La remoción de material orgánica en el proceso limitada.
Mejor remoción de turbiedad y color.	pH demasiado alto para la coagulación	Forma flóculo blanco casi invisible.	
Produce menos lodo.	puede bajar la remoción de sustancia orgánica.	Plantas normalmente diseñadas para este.	Problemas con alto contenido de Aluminio residual.
Manejo más fácil de producto líquido y sólido.			
Menor dosis a aplicar.		Experiencia en el personal sobre su comportamiento.	Muchas veces requiere un ayudante de floculación (polímero) para flocular.
Precio compensado con una menor dosis.			
Velocidad de reacción muy alta.			

Fuente: Elaboración propia a partir de la información presentada por: Zand Daryabeigi y Hoveidi (2015), Yonge (2012), Zouboulis, Traskas, y Samaras( 2008), Peter (2005).

## CAPÍTULO 5: PROPUESTA DE TRATAMIENTO

### 5.1 Selección del tipo de biodigestor

Diversos han sido los diseños de biodigestores que se han desarrollado a lo largo del tiempo, entre ellos los biodigestores con una campana flotante o modelo indiano y el de campana fija o modelo chino que han presentado problemas por la aparición de grietas en el concreto usado para construirlos, especialmente durante los períodos largos de alta temperatura en países de América Latina, el sur este asiático y África, abonado con los altos costos de inversión implicados para construcción, diseño y transporte de concreto, hierro y tierra en especial hacia zonas rurales o de poco acceso. Con la intención de resolver estos problemas, se desarrolló un sistema de biodigestión utilizando polietileno, en lugar de concreto, como material esencial en su instalación, un material de bajo costo, fácil de encontrar y transportar que al comparar con otros modelos de digestores proporcionó más posibilidades de adopción en zonas rurales (Aguilar y Botero, 2007), por lo que organismos especializados entre ellos el Centro para la Investigación en Sistemas Sustentables de Producción Agrícola (CIPAV), actualmente recomienda los biodigestores de polietileno económico como la tecnología apropiada por permitir un mejor uso de excrementos del ganado, reduciendo así, la presión en otros recursos naturales, por ello se selecciona este diseño de biodigestor como alternativa de tratamiento.

Se han desarrollado dos tipos de biodigestores de polietileno: el biodigestor tubular o en forma de “salchicha” (ver figura 5.1 a) y el biodigestor de laguna cubierta (ver figura 5.1 b). El biodigestor tubular es una tecnología enfocada a ganaderos de pequeña escala; sus volúmenes no sobrepasan los 30 m<sup>3</sup>, con una vida útil promedio de aproximadamente 10 años (Martí et al., 2014) es un tipo de biodigestor de flujo continuo, de forma alargada o tubular donde el agua residual circula en “flujo pistón”. Este tipo de flujo permite que cada porción de materia orgánica sin digerir que ingresa por un extremo cumpla el tiempo de retención hidráulica (TRH) necesario para que las bacterias metanogénicas dentro del Biodigestores la digieran, antes de salir por el otro extremo. La producción de biogás en este tipo de biodigestores está orientada para su aprovechamiento en cocina.

El biodigestor de laguna cubierta por su parte es una tecnología más robusta orientada al manejo de desechos ganaderos a nivel industrial sus volúmenes para biodigestores pequeños es entre 15 a 1600 m<sup>3</sup> (SARGAPA y FIRCO, 2013), este tipo de biodigestores tienen una vida útil de por lo menos 20 años; implican una mayor inversión pues se requiere una agitación mecánica ya que es un biodigestor del tipo mezcla completa. La producción de biogás en este caso está orientada en su mayoría, para la generación de energía eléctrica; esto dependiendo del volumen de producción de biogás.



5.1 a)



5.1 b)

*Figura 5.1: Modelos de biodigestores polietileno. a) Biodigestor tubular. b) Biodigestor de laguna cubierta.  
Fuente: Contexto Ganadero, 2017.*

El volumen de agua residual generado proporciona la holgura para la selección de cualquiera de los dos tipos de biodigestores de polietileno, pero la selección final de uno de ellos está influenciada por la disponibilidad económica, tecnología, de personal y los intereses sociales que se deseen potenciar al momento de desarrollarse la alternativa de tratamiento, por lo que para el desarrollo de la propuesta de tratamiento se dimensionan ambos tipos de biodigestores.

## 5.2 Desarrollo de propuesta

La propuesta se conforma por todos los elementos necesarios para un pre tratamiento, la etapa de biodigestión y la alternativa para el manejo de los residuos generados en digestión anaeróbica.

La etapa de pre tratamiento se desarrolla independiente al tipo de alternativa de biodigestión que se utilice pues su dimensionamiento se realiza en base al caudal de agua residual generada, debido a que su función es acondicionar la materia antes de entrar a la siguiente etapa la cual es la digestión anaeróbica, se proponen dos tipos de biodigestor, donde la selección de una de las alternativas para su puesta en marcha y construcción será decidida en función de la conveniencia de las personas que echen a andar el proyecto. A continuación se describen estos elementos:

### 5.2.1 Determinación del caudal diario

La cantidad de agua diaria inyectada al biodigestor, comprende la suma del agua cruda descargada por el establo más el agua requerida para la dilución de esta.

Un factor determinante a la entrada de la digestión anaerobia, es la carga de sólidos volátiles (SV) hacia el biodigestor. En función de la concentración en la que se encuentra el agua descargada, así se estima la dilución necesaria a realizar. Una tasa de carga de SV típica para una digestión mesofílica que es la que se presenta en un rango de temperatura de entre 15 y 35°C, es de 1.6 – 4.8 kg/m<sup>3</sup>-día. Con una dilución de 1:1 se logra una concentración de entrada de sólidos volátiles igual a 3.94 g/L [=] 3.94 kg/m<sup>3</sup>, la cual entra en el rango antes mencionado; siempre y cuando se mantengan las condiciones de entrada determinadas en el capítulo 2.

$$Q_{salida} = 681.73 \frac{L}{día} \text{ de agua cruda} + 681.73 \frac{L}{día} \text{ agua para dilución}$$

$$Q_{salida} = 1,364 \frac{L}{día}$$

## 5.2.2 Pre tratamiento

### Rampa de carga

Se requiere construir una rampa de carga para el pozo de mezcla del biodigestor, esta facilitará el transporte del estiércol entre el corral y los pozos de mezcla la cual tendrá una distancia de 5.00 m desde la descarga directa del agua residual y un ancho de 0.50 m, con una reducción al final igual a 0.30 m y posea una pendiente de 3%; es decir 0.03 m de diferencia en altura, entre la entrada y la salida con respecto al nivel del suelo, por cada metro de longitud que posea la construcción. Construida de concreto y ladrillo.

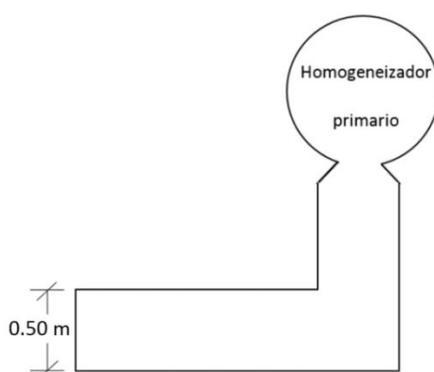


Figura 5.2: Rampa de carga para el homogeneizador primario. Fuente: Elaboración propia.

### Homogeneizador primario

El objetivo de la homogenización es el de evitar las descargas violentas, minimizando las fluctuaciones en las características del agua con el fin de proveer las condiciones óptimas para los tratamientos subsecuentes; en este caso, provee un adecuado amortiguamiento de las fluctuaciones orgánicas con el fin de prevenir choques de carga orgánica al sistema anaerobio y lo que lleva a minimizar el consumo de químicos necesarios para la neutralización creando así valores de pH más estables (Aguamarket, 2017).

Al observar las descargas realizadas a lo largo de la limpieza del establo del ganado bovino, es notorio que se vuelve necesario colocar un homogeneizador primario debido a

que durante la limpieza no se realiza una mezcla completa de excretas y agua por lo que la descarga no posee una composición uniforme. Las dimensiones del tanque homogeneizador primario se presentan en la figura 5.3 (Ver cálculos de dimensionamiento en Anexo A19).

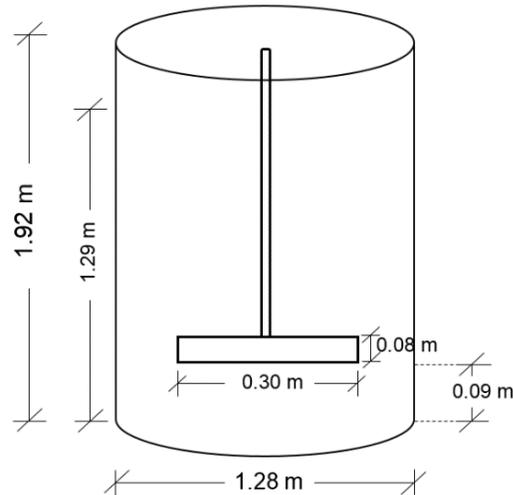


Figura 5.3: dimensiones del tanque homogeneizador. Fuente: Elaboración propia.

Debido a su altura y para facilitar la entrada del líquido auxiliándose de la gravedad, este tanque se construirá bajo tierra y el líquido dentro del homogeneizador será succionado mediante una bomba para hacerlo llegar de nuevo, al nivel de la superficie del suelo y pueda continuar con el proceso de pre tratamiento; por lo cual, se recomienda que este tanque también posea una pendiente o inclinación de 3%.

Según Geankoplis (2006) a velocidades altas es necesario incorporar al sistema de homogeneización placas deflectoras, pues sin ellos el líquido simplemente hace remolinos y en realidad no se mezcla. Castillo (2013), sugiere que es suficiente que el ancho habitual de las placas deflectoras, sea de aproximadamente  $1/8$  del diámetro del tanque y que posean una altura igual que la altura del líquido (1.28 m). Para los fines de la propuesta, se tomarán estas consideraciones para obtener los valores pertenecientes a los parámetros de dimensionamiento de las placas deflectoras. De esta forma, el ancho de éstas será:

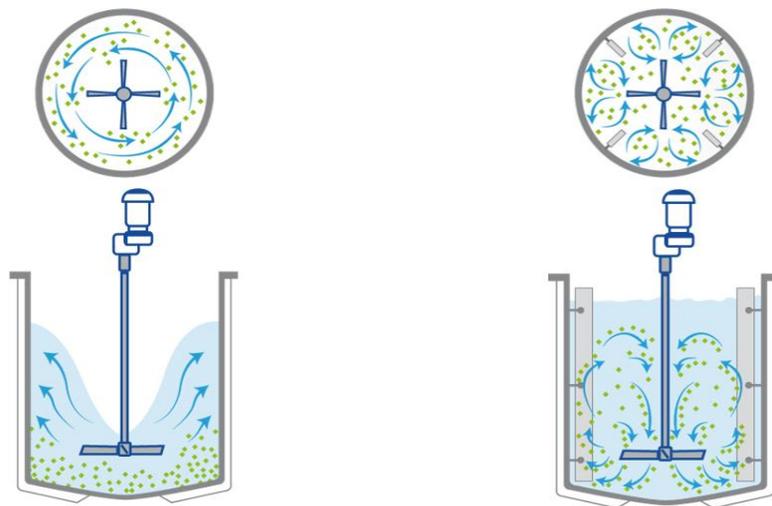
$$A_{P.D.} = \frac{1}{8} * D_t$$

Ecuación 5. 1

$$A_{P.D.} = \frac{1}{8} * 1.28 \text{ m}$$

$$A_{P.D.} = 0.16 \text{ m}$$

Además, tendrán una separación respecto a la pared del homogeneizador igual a 5 cm puesto que no es un líquido que posea viscosidad considerable, se instalará una cantidad igual a 4 placas deflectoras (Optimización de procesos y tecnología S.A.S, 2017). La figura 5.4 muestra la diferencia entre el sistema de homogeneización sin placas deflectoras y con placas deflectoras:



a) Homogeneizador sin placas deflectoras

b) Homogeneizador con placas deflectoras

Figura 5.4: Comparación de una homogeneización con y sin placas deflectoras. Fuente: Optimización de procesos y tecnología S.A.S, 2017.

**Bomba de succión de agua residual**

Se propone el uso de una bomba cinética con una potencia de ½ HP. La succión de la descarga homogeneizada se llevará a cabo mediante tubería de PVC diámetro 2 ½ pulgadas y una válvula “Check” del mismo diámetro, la cual impedirá el paso de la

descarga sin homogeneizar y se abrirá únicamente cuando la bomba comience a succionar el líquido mezclado. La figura 5.5, muestra la distribución de equipos y las alturas correspondientes a esta operación unitaria (Ver cálculos de dimensionamiento en Anexo A20).

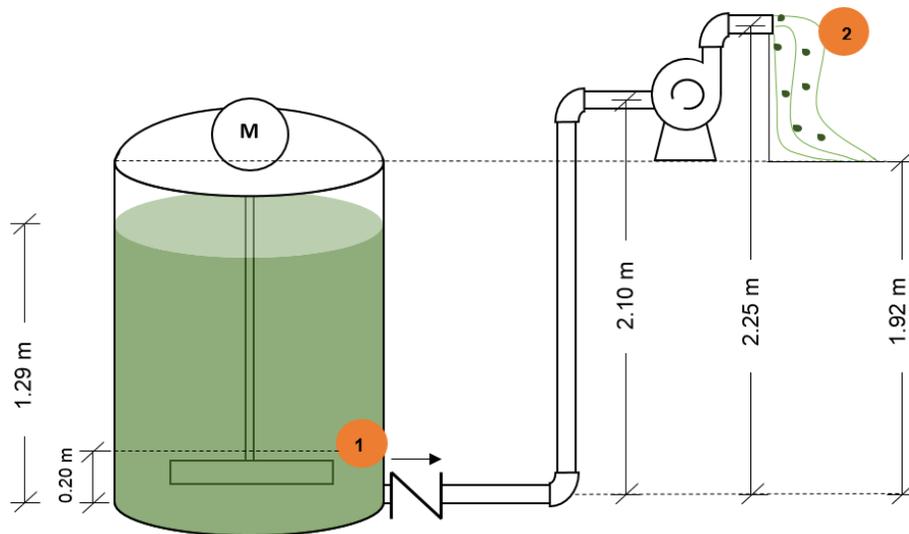


Figura 5.5: Distribución de equipos y dimensiones de homogeneizador primario. Fuente: Elaboración propia.

## Rejillas

Su función es retener los sólidos que arrastra el agua y que podrían, por su tamaño y características, entorpecer el normal funcionamiento de las plantas de tratamiento (Marcos et al., 2001). Se pueden limpiar manual o mecánicamente, cuanto menos es la abertura libre del tamiz, mayor será la cantidad de residuos eliminada (Hammeken y Romero, 2005).

En esta propuesta se recomienda la instalación de rejillas de limpieza manual y por el tamaño de los residuos que deben ser retenidos, se propone el uso de malla metálica anticorrosiva o de acero inoxidable 304 con tejido tipo cuadrado y con una abertura nominal de no más de 15 mm y una inclinación de 60° respecto a la vertical para facilitar la limpieza (ver figura 5.6).

Si las rejillas se limpian con poca frecuencia, puede causar acumulación de sólidos finalmente que se liberan por la limpieza lo que puede reducir la eficiencia de captura de sólidos los cuales pasan a las unidades de los sistemas siguientes, por lo que se debe tener control de la limpieza (Comisión Nacional del Agua, 2015).

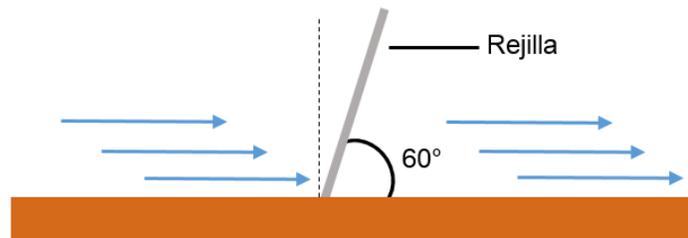


Figura 5.6: Rejilla de pretratamiento para la remoción de sólidos gruesos. Fuente: Elaboración propia.

### Caja de distribución

Su finalidad como parte de la propuesta, es poder tener un punto de muestreo antes de la entrada al biodigestor por lo que, no es necesario que tenga un volumen grande; las dimensiones de la caja de distribución a la entrada de cada biodigestor son presentadas en la figura 5.7. Al igual que todas las instalaciones antes dimensionadas, debe poseer una pendiente del 3%.

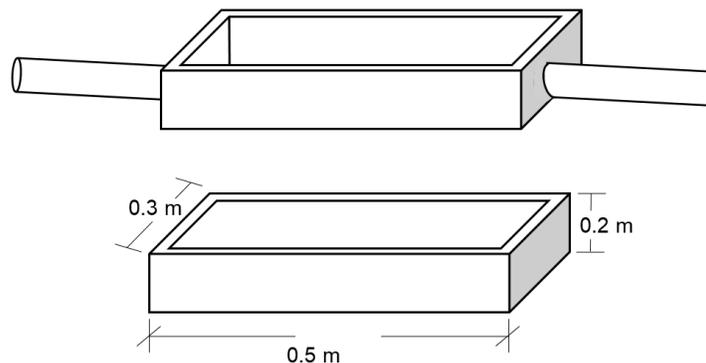


Figura 5.7: Dimensiones de la caja de distribución del biodigestor. Fuente: Elaboración Propia.

### **Tubería del influente (SEMARNAT, SAGARPA y FIRCO 2010)**

Se instala para conectar la caja de distribución con la entrada de alimentación del biodigestor. El material de la tubería es PVC tipo norma o alcantarillado. Debe contar con un registro que permita verificar el flujo y proporcione acceso al interior de la tubería en caso de taponamientos. La conexión de la tubería con la geomembrana o sistemas de soporte deberán ser impermeabilizadas con el mismo material de la geomembrana para lograr su fijación y sellado. La instalación de la tubería deberá colocarse dentro de una zanja sobre una cama de arena o tierra nivelada perfectamente, con una pendiente mínima del 3%.

Se debe proteger y rellenar la zanja con material producto de la excavación para la protección de la tubería y como acabado final con una adecuada compactación. Cuando en la instalación de la tubería, se requiera hacer cambios de dirección, no se deberá poner codos mayores a 45°. Si fuera necesario hacer giros de 90°, se deberá colocar dos codos de 45° con una separación de 50 cm como mínimo entre cada codo.

Para asegurar el sello hidráulico, el final de la tubería del influente (o entrada de alimentación del biodigestor) deberá de tener una inclinación necesaria, la cual se podrá hacer poniendo un tubo con una inclinación de 45° en la parte final, colocándolo 0.60 m por debajo del espejo del fluido. En la figura 5.8 se muestra la instalación de dicha tubería antes descrita.

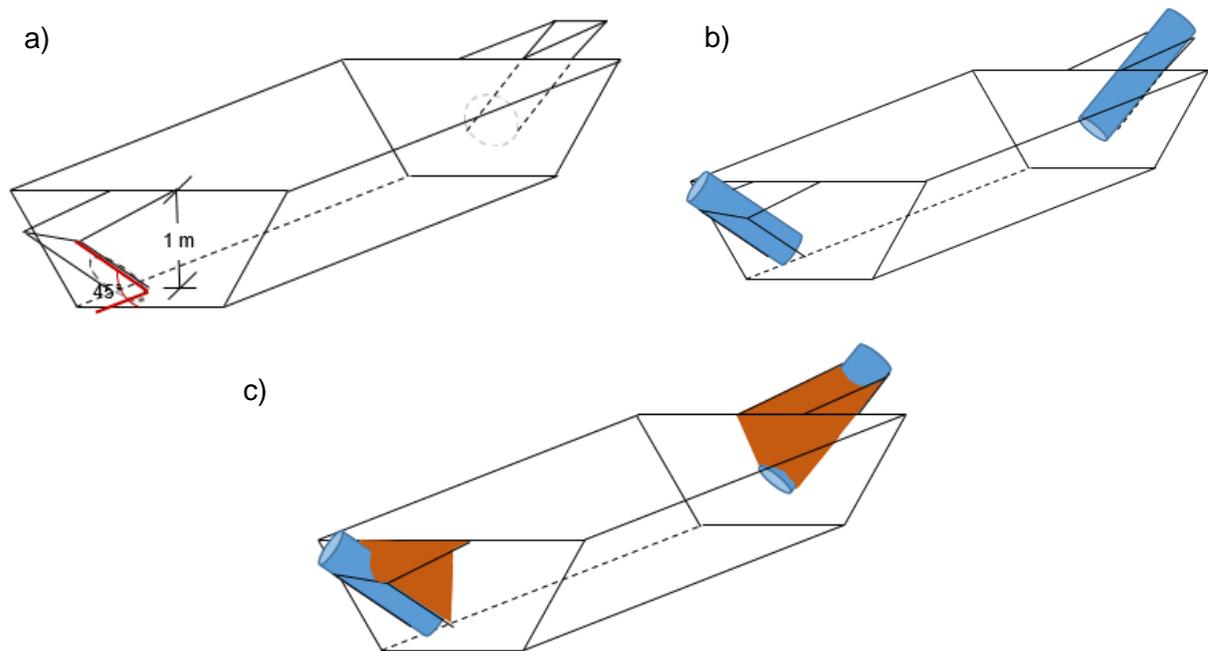


Figura 5.8: Configuración de la zanja para el sello hidráulico. a) Muestra en ángulo de inclinación entre el espejo del fluido y la abertura de la entrada. b) Posiciones de las tuberías en las aberturas de la entrada c) Protección de la tubería con relleno de excavación. Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.3 Digestión anaeróbica

Para dicha propuesta se plantea el dimensionamiento de dos alternativas de biodigestores: una de las alternativas está compuesta por dos biodigestores tubulares y la otra por un biodigestor de laguna cubierta, para los que se asumen las mismas condiciones de entrada y mismas condiciones de salida, pues la digestión anaeróbica se desarrolla independientemente del tipo de biodigestor que se seleccione.

El dimensionamiento de las dos alternativas de digestión, están en función del tiempo de retención y el caudal diario generado; es decir, al determinar estas variables, se determina el volumen del biodigestor. Para facilitar la salida de sólidos es necesario que la zanja posea una pendiente de 3%.

### **Determinación del tiempo de retención hidráulico (TRH)**

Se puede definir como el período de tiempo que permanece la materia orgánica dentro del sistema para alcanzar la degradación, dicho tiempo está directamente relacionado con la temperatura del ambiente; por lo cual, a una temperatura de 30°C, el tiempo de retención (Tr) recomendado es de 20 días (Olaya y Gonzáles, 2009).

### **Determinación del Volumen Total de biodigestor**

El volumen total del biodigestor ha de albergar una parte líquida y otra gaseosa. Normalmente se da un espacio del 75% del volumen total a la fase líquida, y del 25% restante a la fase gaseosa, tomando un valor de sobredimensionamiento que puede oscilar entre el 10 y el 20% del volumen total del biodigestor (Toscano, 2016).

#### Volumen líquido

Para que la carga diaria de entrada pueda ser digerida por las bacterias es necesario que esté en el interior del biodigestor tanto tiempo como el tiempo de retención estimado. De esta manera, si se visualiza el biodigestor vacío inicialmente y se comienza a cargarlo de forma diaria, tardará tantos días como tiempo de retención se hayan considerado en llenarse. Y así, “tiempo de retención + 1 día”, al cargar el biodigestor, se desbordará expulsando la carga del primer día ya digerida. Sustituyendo los valores en la ecuación 5.2, el volumen de la parte líquida es:

$$V_l = CD * TRH$$

*Ecuación 5. 2*

$$V_l = 1.3 \text{ m}^3 * 20$$

$$V_l = 26 \text{ m}^3$$

#### Volumen gaseoso

Dentro del biodigestor, por estar en una situación anaerobia (en ausencia de oxígeno) se va a producir biogás, y este se acumulará en la parte superior. Al ser el biodigestor de polietileno tubular se formará una campana de biogás que sirve para almacenar gas y

darle forma al biodigestor. Debido a que el volumen gaseoso debe corresponder al 25% del volumen total, el volumen gaseoso obtenido será igual a:

$$V_g = \frac{25\% * 26 \text{ m}^3}{75\%}$$
$$V_g = 8.67 \text{ m}^3$$

De esta forma, el volumen total es la suma del volumen gaseoso y el volumen líquido, multiplicado por el factor de sobredimensionamiento el cual para esta propuesta será del 20% del volumen total:

$$V_b = 1.2(V_g + V_l)$$

*Ecuación 5. 3*

$$V_b = (V_g + V_l) * 1.2$$
$$V_b = (8.67 \text{ m}^3 + 26 \text{ m}^3) * 1.2$$
$$V_b = 41.6 \text{ m}^3$$

## Dimensionamiento biodigestor tubular

El polietileno tubular se vende en el mercado mediante dimensiones de ancho y largo, por lo que es importante partir de anchos que puedan ser fácilmente vendidos o dimensionados, siendo el ancho máximo de 8 m y la longitud máxima 50 m. Este ancho de rollo equivale a la mitad de la circunferencia total del plástico, el doble de su ancho y equivalente al perímetro del cilindro, que por medio de la ecuación 5.4, es posible estimar el radio y diámetro del biodigestor tubular. En la tabla 5.1, se presenta el cálculo de radios y diámetros de diferentes anchos de rollos.

$$P_e = 2\pi r$$

Ecuación 5.4

$$r = \frac{P_e}{2\pi}$$

Tabla 5.1: parametros en función del anchos de rollo de manga de polietileno.

Ancho	Perímetro	Radio	Diámetro
1.5	3.00	0.48	0.96
2.00	4.00	0.64	1.27
2.25	4.50	0.72	1.43
2.50	5.00	0.80	1.59
2.75	5.50	0.87	1.70
3.00	6.00	0.95	1.90
3.50	7.00	1.11	2.20

Fuente: Elaboración propia.

### Relación óptima entre longitud y diámetro del biodigestor

En el dimensionamiento por tanto puede existir una variedad de longitudes y anchos de rollo para alcanzar el volumen total deseado. Los anchos de rollos más grandes exigirán menores longitudes, pero no conviene ni biodigestores demasiado cortos ni largos, y para ello existe una relación óptima entre el diámetro y la longitud que es de 1 a 7 respectivamente (Martí, 2008). Esto significa que dividiendo la longitud estimada entre el diámetro del biodigestor, habrá que seleccionar las dimensiones del biodigestor que más se acerquen a dicha relación. El manejo del agua residual total en un solo biodigestor

complicaría su manejo debido al diámetro y longitud que implicaría para este tipo de biodigestor por lo que, el volumen total de trabajo se distribuirá en dos biodigestores de igual tamaño; el volumen de cada biodigestor será: 20.88 m<sup>3</sup>.

### Dimensiones del biodigestor

Debido a que se estableció como punto de partida el ancho del rollo, que permitía obtener el perímetro y por tanto el radio, y recordando que el volumen de un cilindro es el área de un círculo multiplicado por la longitud (Ecuación 5.5):

$$V_b = \pi r^2 L$$

Ecuación 5. 5

$$L = \frac{V_b}{\pi r^2}$$

Conociendo el volumen total del biodigestor y el radio, es posible conocer la longitud. En la tabla 5.2, se presentan los resultados:

Tabla 5.2: Longitud optima entre longitud y diametro del biodigestor.

<b>Volumen del biodigestor</b>	<b>Ancho</b>	<b>Perímetro</b>	<b>Radio</b>	<b>Diámetro</b>	<b>Longitud</b>	<b>L/D</b>
20.88	1.50	3.00	0.48	0.95	29.04	30.41
20.88	2.00	4.00	0.64	1.27	16.34	12.83
20.88	2.25	4.50	0.72	1.43	12.91	9.01
20.88	2.50	5.00	0.80	1.59	10.46	6.57
20.88	2.75	5.50	0.88	1.75	8.64	4.94
20.88	3.00	6.00	0.95	1.91	7.26	3.80
20.88	3.50	7.00	1.11	2.23	5.33	2.39
20.88	3.75	7.50	1.19	2.39	4.65	1.95
20.88	4.00	8.00	1.27	2.55	4.08	1.60

Fuente: Elaboración propia.

En función de los resultados anteriores se puede observar, que el ancho de 2.50 m y la longitud de 10.46 m representan la relación óptima entre longitud y diámetro, así como dentro de los límites de espacios del lugar al ser realizado.

### Dimensionamiento de Zanja

El dimensionamiento de la zanja empieza determinándose el área transversal de la campana de gas la cual, para determinada longitud de circunferencia del biodigestor, está delimitada por la longitud de la campana de gas ( $L_{\text{campana de gas}}$ ) y la abertura superior de la zanja ( $bz$ ), de acuerdo a lo mostrado en la figura 5.9. La relación entre estos parámetros ( $f_{\text{campana gas}} = L_{\text{campana de gas}} / bz$ ) determina el valor del ángulo central  $\theta$ , para cualquier longitud de circunferencia  $C$ . Las otras dimensiones de la zanja ( $az$  y  $cz$ ), una vez determinado el lado  $bz$ , dependerán de ángulo de inclinación ( $\alpha$ ) de sus paredes.

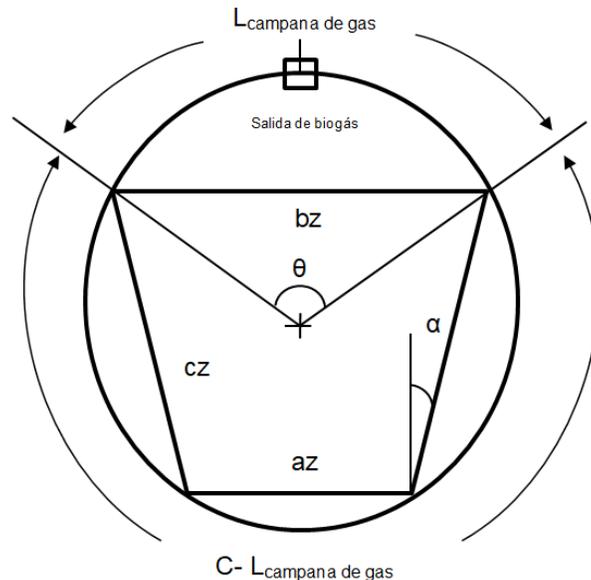


Figura 5.9: Parametros geometricos de biodigestor tubular y zanja trapezoidal. Fuente: Arrieta, 2016.

Arrieta (2016) indica que el valor más adecuado de  $f_{\text{campana gas}}$  para mantener la relación  $VG/ VT$  en un valor menor al 25% es de 1.2, al que según dicho autor le corresponde un valor de  $118^\circ$  para  $\theta$  y para el de ángulo de inclinación ( $\alpha$ ) de las paredes de las zanja se

indica que el valor optimo es de 7°, lo que permite determinar por medio de la ecuación 5.7 el valor de b.

$$L_{campana} = \pi D * \frac{\theta}{360^\circ}$$

Ecuación 5. 6

$$D = \frac{bz}{\text{sen}(\theta/2)}$$

Ecuación 5. 7

Despejando

$$bz = D \text{sen}(\theta/2)$$

Así mismo se indica que debido a que la parte líquida del biodigestor se adhiere a las paredes de la zanja, el perímetro cubierto por el líquido ( $az + 2cz$ ) se relaciona aproximadamente con el resto de la circunferencia ( $C - L$  campana de gas) mediante la ecuación (5.8). La unión de la ecuación para el lado a (ecuación 5.9) y la ecuación para el área transversal de la zanja (ecuación 5.10), permite obtener el lado c (ecuación 5.11).

$$az + 2cz = C - L_{campana \text{ de gas}} = \pi D - \theta(\text{rad}) * D/2$$

Ecuación 5. 8

$$az = bz - 2cz * \sin \alpha$$

Ecuación 5. 9

$$A_{zanja} = \frac{bz^2 - az^2}{4 \tan \alpha}$$

Ecuación 5. 10

$$cz = \frac{D \left( \pi - \frac{\theta}{2} \right) - bz}{2(1 - \sin \alpha)}$$

Ecuación 5. 11

En la tabla 5.3 se presenta un resumen de los valores de las variables, para un biodigestor tubular:

Tabla 5.3: Parametros de biodigestor tubular.

Variable	Valor
Ancho de Manga	2.5 m
Diámetro	1.59 m
Radio	0.796 m
$f_{\text{campana de gas}}$	1.20
$\theta$	180°
A	7°

Fuente: Elaboración propia.

Sustituyendo en ecuación 5.7

$$(1.5914 \text{ m}) = \frac{bz}{\sin\left(\frac{118^\circ}{2}\right)}$$

Despejando

$$bz = (1.59 \text{ m}) * \sin(118^\circ/2)$$

$$bz = 1.36 \text{ m}$$

Una vez obtenido el valor de bz y sustituyendo en la ecuación 5.11

$$cz = \frac{1.59 \text{ m} * \left(\pi - \frac{2.0}{2}\right) - 1.36}{2(1 - \sin 7)}$$

$$cz = 1.1371 \text{ m}$$

Remplazando los valores de cz, bz y  $\alpha$ , en la ecuación 5.9 el valor de az es:

$$az = 1.59\text{m} - 2 * (1.13\text{m}) * \sin(7) = 1.08 \text{ m}$$

Al sustituir en la ecuación 4.14 se obtiene como resultado el área de la zanja

$$A_{\text{zanja}} = \frac{(1.36 \text{ m})^2 - (1.08 \text{ m})^2}{4 \tan 7^\circ}$$

$$A_{\text{zanja}} = 1.38 \text{ m}^2$$

Si  $A_T$  = Área transversal del biodigestor tubular

$$A_T = \pi \frac{D^2}{4}$$

Ecuación 5. 12

$$A_T = \pi * \frac{1.59^2}{4} = 1.98m^2$$

Al realizar la relación del área de la zanja con respecto al área total se obtiene un valor de que indica que las dimensiones son correctas pues el volumen del líquido en la zanja utiliza aproximadamente el 69.66% del volumen total, lo que es muy satisfactorio. Calculado el área de la zanja por medio de la ecuación 5.13, se puede encontrar el volumen de la zanja que es la multiplicación del área de la zanja por la longitud de la zanja que será igual a la longitud del biodigestor (ver figura 5.10).

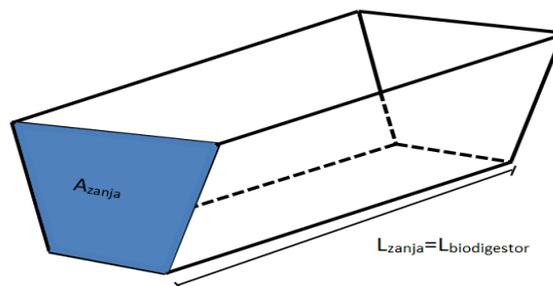


Figura 5.10: Forma de zanja de biodigestor tubular. Fuente: Elaboración propia.

$$V_{zanja} = A_{zanja} * L_{biodigestor}$$

Ecuación 5. 13

$$V_{zanja} = 1.38 m^2 * 10.45 m$$

$$V_{zanja} = 14.48 m^3$$

Además de la longitud de la zanja (10.45 m) se requiere una longitud externa adicional en cada extremo de ésta, donde se colocarán los tubos de entrada y de salida del biodigestor, tal como se muestra en la figura 5.11. La zanja debe tener una inclinación del 3% de desnivel hacia la salida del Biol y Biosol, para facilitar la evacuación del Biosol así

mismo es necesario repositonar el ángulo de las tuberías de entrada y salida, tanto que el fondo este lo suficientemente bajo del nivel del agua y así el fluido pueda fácilmente correr afuera del biodigestor.

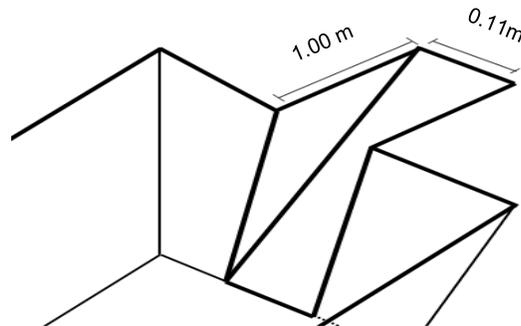


Figura 5.11: Dimensiones de entrada y salida para zanja de biodigestor tubular. Fuente: Elaboración propia

El fondo de las tuberías debería ser del mismo nivel, pero la tubería de entrada debe ser inclinada un poco más alta que la salida. La tubería de entrada debería estar inclinada hacia arriba de manera que la boca de la entrada este cerca de 6 pulgadas más arriba que el nivel del agua (ver figura 5.12), mientras que la salida, el nivel del agua está al ras con la boca de la tubería de la salida. Esto es importante para asegurar que el agua fluya en una sola dirección (Ortega, 2009).



Figura 5.12. Inclinación de la entrada y salida en el biodigestor tubular. Fuente: Maximiliano Ortega, 2009. Adaptado al español.

En el Anexo A21 se presenta el listado de materiales necesarios para la construcción de un biodigestor tubular e indicaciones.

## Dimensionamiento biodigestor Laguna Cubierta

Este biodigestor está compuesto por dos zonas claramente definidas:

La zanja, donde se almacena la parte líquida a ser digerida para la producción del biogás. Su volumen está determinado por un prismatoride del tipo “Pequeño Altar”, basado en las relaciones de dimensionamiento óptimo entre la longitud, ancho y altura tanto de la zanja como de la cúpula.

Y la cúpula, que está ubicada en la parte superior de la instalación y consta de una geomembrana donde se almacena el gas; esta puede ser de asfalto modificado (SBS) o de poliestireno reforzado; las cuales son vendidas por diferentes proveedores que solicitan su ancho, largo y espesor.

A continuación, se presentan los cálculos para el dimensionamiento de la zanja del biodigestor el cual posee cinco magnitudes principales a calcular y que deben cumplir las relaciones de dimensión óptimas.

### Dimensionamiento de la zanja

La figura 5.13 muestra la distribución de las dimensiones para la zanja:

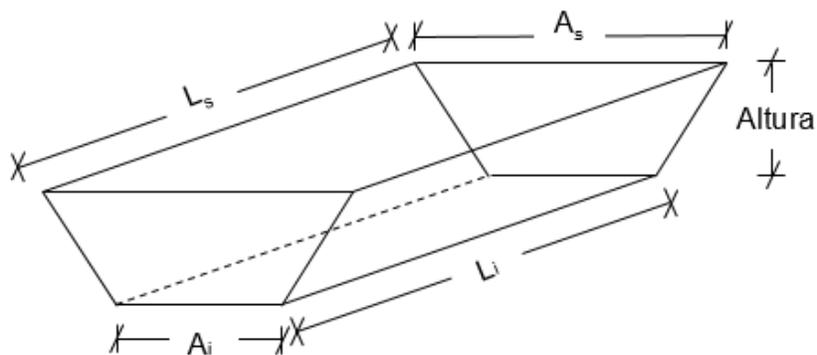


Figura 5.13: Dimensiones de la zanja del biodigestor de laguna cubierta. Fuente: Elaboración propia.

El volumen de la zanja es igual al volumen de un prismatoride del tipo “Pequeño Altar” o de un trapecoide, el cual puede observarse en la figura 5.14:

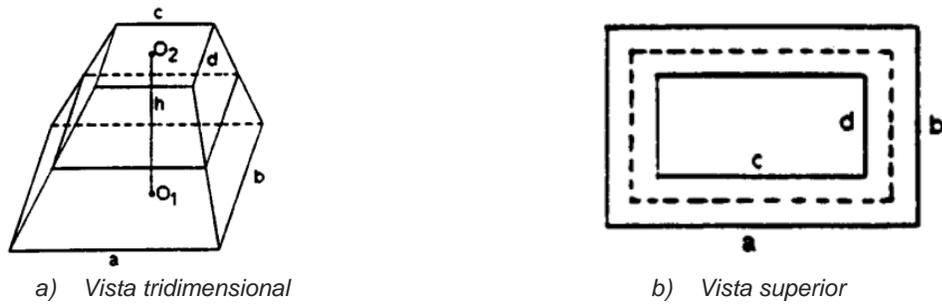


Figura 5.14: Figura prismatoride del tipo “Pequeño Altar” junto con sus magnitudes características. Fuente: José Martel Moreno (2000).

Martel Moreno (2000), indica que el volumen de esta figura puede ser calculado mediante la ecuación 5.14:

$$Vp = \frac{h}{6} \left( ab + cd + 4 \times \frac{a + c}{2} \times \frac{b + d}{2} \right)$$

$$Vp = \frac{h}{6} \{ 2(ab + cd) + ad + bc \}$$

Ecuación 5. 14

Para este tipo de estructura, se recomienda conformar el talud de las paredes del biodigestor en una relación de 1:3 y no menor de 1:1, en base a lo recomendado por la SEMARNAT, SAGARPA y FIRCO (2010) en su documento técnico “Especificaciones Técnicas para el Diseño y Construcción de Biodigestores en México”; escogiéndose para el dimensionamiento de este biodigestor, una relación de 1: 1.10.

Además, debido a que los biodigestores no deben ser muy largos o muy cortos, se recomienda que la relación entre el diámetro promedio y el largo promedio, se encuentre cercano a la relación óptima que es igual de 1:7.

Es necesario determinar de forma simplificada, debido a la relación antes establecida, las expresiones de cada una de las variables dimensionales. De esta forma, se tiene:

### Determinación de la expresión de las longitudes del biodigestor

Debido a que se debe mantener una relación de 1.10, tal como es especificado entre cada extremo superior con respecto al inferior:

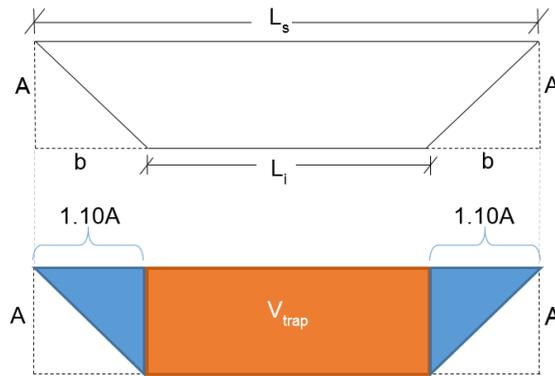


Figura 5.15: Largos de zanja del biodigestor de laguna cubierta. Fuente: Elaboración propia.

$$L_s = L_i + 1.10 A + 1.10 A = L_i + 2.20 A$$

$$L_s = L_i + 2.20 A$$

Ecuación 5. 15

Calculando para el ancho del biodigestor:

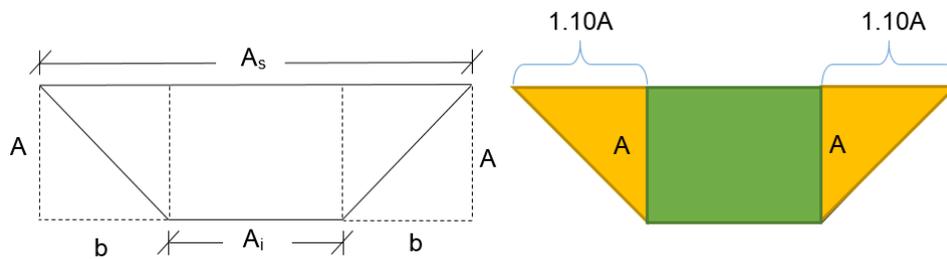


Figura 5.16. Anchos de zanja del biodigestor de laguna cubierta. Fuente: Elaboración propia.

$$A_s = A_i + 1.10 A + 1.10 A = A_i + 2.20 A$$

$$A_s = A_i + 2.20 A$$

Ecuación 5. 16

Mediante una matriz de Excel (Ver Anexo A22) se ingresaron datos de alturas y anchos para el biodigestor con los cuales se logró obtener las dimensiones adecuadas para este, respetando las relaciones óptimas recomendadas para su diseño. De esta forma, para un volumen de líquido de  $31.20 \text{ m}^3$ , las dimensiones de la zanja del biodigestor se muestran en la figura 5.17:

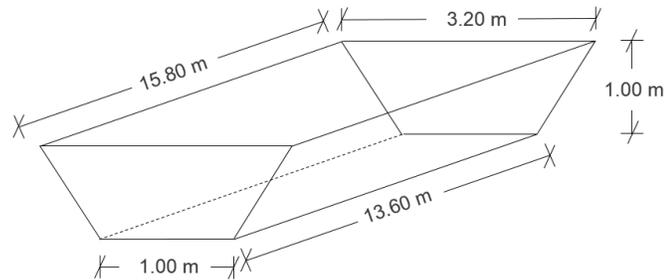


Figura 5.17. Medidas de las dimensiones para la zanja del biodigestor de laguna cubierta. Fuente: Elaboración propia.

#### Dimensionamiento de la cúpula del biodigestor:

Se puede realizar el dimensionamiento de la cúpula mediante dos formas:

La primera forma es tomando la cúpula como un volumen conformado por la mitad de un cascarón esférico en cada uno de los extremos laterales de la cúpula, y en medio de estos se encuentra un segmento de medio cilindro elíptico, y la segunda forma es tomando la cúpula como un medio cilindro elíptico.

Al desarrollar los cálculos se determina que las dimensiones entre cada una de las formas antes expuestas son aproximadamente iguales. Para comprobar dicha aseveración, revisar Anexo A23 y Anexo A24 donde muestra el procedimiento para obtener las dimensiones de la cúpula, haciendo uso de la segunda forma, se obtienen las dimensiones siguientes:

Tabla 5.4: Medida de las dimensiones de la zanja y cúpula.

Zanja	Cúpula
$A_s = 3.20 \text{ m}$	Largo = 15.80 m
$A_i = 1.00 \text{ m}$	Ancho = 3.40 m
$A = 1.00 \text{ m}$	
$L_s = 15.80 \text{ m}$	
$L_i = 13.60 \text{ m}$	

Fuente: Elaboración propia.

En el Anexo A25, se presentan las especificaciones de la geomembrana, así como el procedimiento para la instalación.

#### Sistema de agitación del biodigestor

Tanto las dispersiones de gas-líquido como las de partícula-líquido en recipientes agitados mecánicamente han sido bien estudiadas. Sin embargo, la suspensión de partículas sólidas con dispersión simultánea de un gas en un líquido, ha recibido menos atención. La finalidad de la agitación en un biodigestor es:

- Dispersar el aire en la solución de nutriente;
- Obtener una temperatura y una concentración de nutriente en todo el recipiente;
- Suspender los microorganismos y nutrientes sólidos;
- Dispersar cualquiera de los líquidos inmiscibles presentes.

Cuando están presentes sólidos, como en una fermentación, se encuentra que es útil un componente axial para mantener los sólidos en suspensión, por lo que se utiliza un sistema de agitación con un agitador del tipo hélice, con un ángulo de paleta de 45° (Scraag, 2002).

Debido a la posición que debe adoptar el agitador dentro del homogeneizador, se propone utilizar un agitador de tres hélices, las cuales deben encontrarse o bien a la mitad del diámetro de la zanja del biodigestor, o un poco más alejado de este. Para el dimensionamiento de este agitador, se recurren a las expresiones antes utilizadas para el

dimensionamiento del mezclador del homogeneizador primario. Se contó con asesoría profesional respecto al tema y se recomienda que las puntas de las hélices se encuentren por lo menos siete centímetros por debajo de la superficie del fluido y con una agitación de aproximadamente 150 RPM (Borjas, 2017).

Además, este agitador debe contar con un sistema que permita su movilización en sentido horizontal y de esta manera, poder tener una mejor agitación a lo largo de la laguna del biodigestor. Se encontrará a una altura respecto al fondo del biodigestor, de 0.43 m y con un diámetro de rodete de 0.33 m y se ubicará en la parte media del biodigestor; de aquí, se selecciona una altura de agitador igual a 2 m, considerando el ancho del talud y la pared de concreto. El motor del agitador poseerá una potencia igual a  $\frac{1}{2}$  HP. La figura 5.18 muestra la distribución de equipos (Ver cálculos de dimensionamiento en Anexo A26).

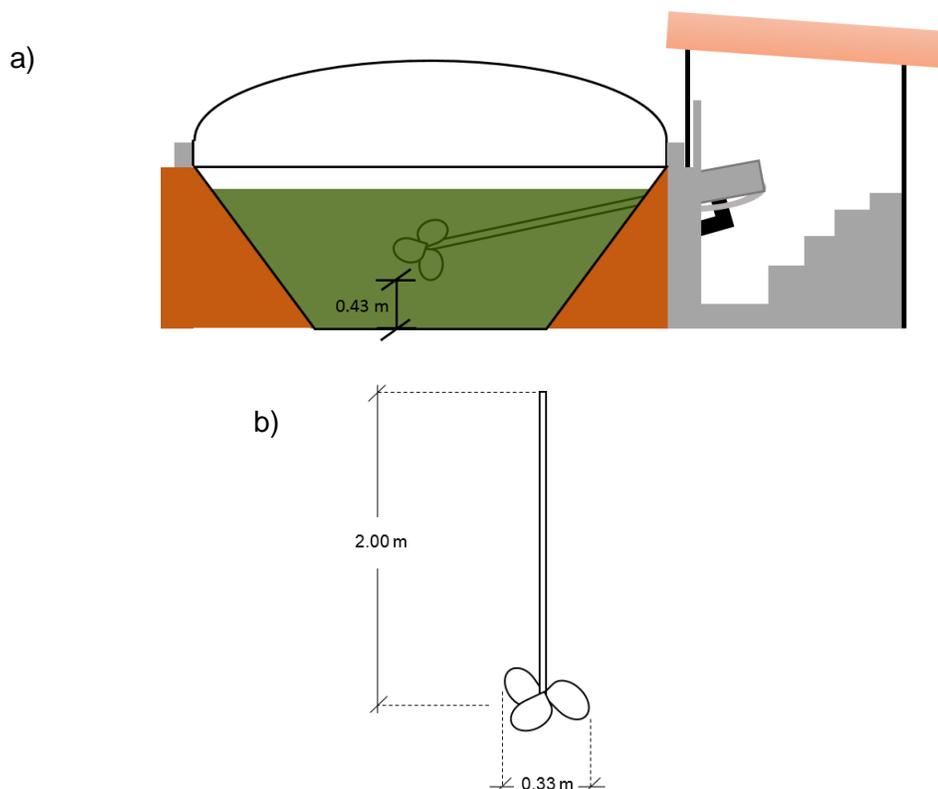


Figura 5.18: Sistema de agitación del biodigestor de laguna cubierta. a) Imagen de agitador dentro del biodigestor. b) Dimensiones del agitador de hélices. Fuente: Elaboración propia.

### Sistema de extracción de lodos

Este caso se asemeja a la extracción de la descarga homogeneizada. La figura 5.19 muestra la distribución del sistema de extracción de lodos en el biodigestor de laguna cubierta:

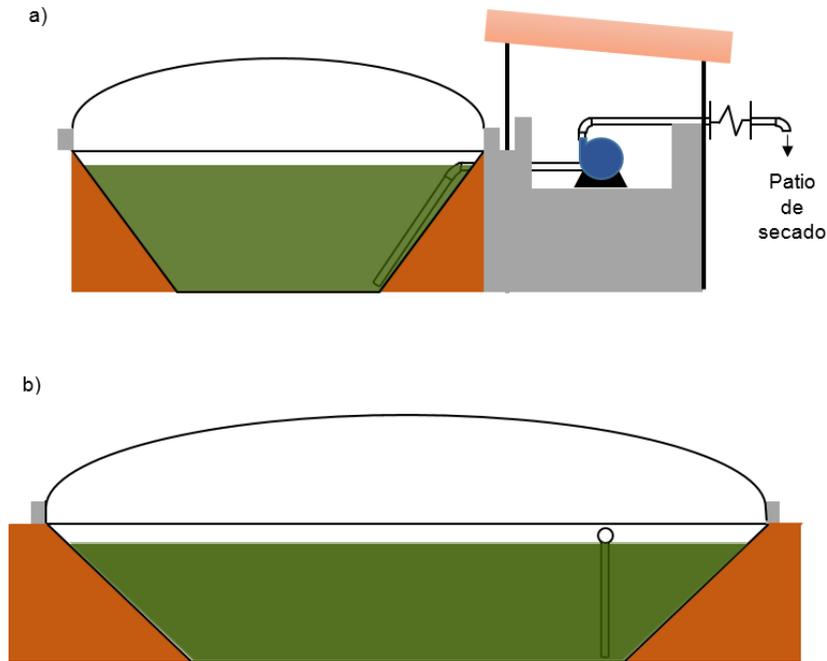


Figura 5.19: Distribución del sistema de extracción de lodos. a) Corte frontal b) Corte transversal.  
Fuente: Elaboración propia.

Se estima necesitar una bomba con una potencia de  $\frac{1}{2}$  HP y una tubería para la succión de los lodos con un diámetro de  $2 \frac{1}{2}$ " para el caso del biodigestor de laguna cubierta, y para el caso de los biodigestores tubulares también poseen la necesidad de bombas con las mismas especificaciones anteriormente descritas, una para cada biodigestor. La figura 5.20 presenta la configuración del sistema y las distancias necesarias para el biodigestor de laguna cerrada y en la figura 5.21 para los biodigestores tubulares (Ver cálculos de dimensionamiento en Anexo A27).

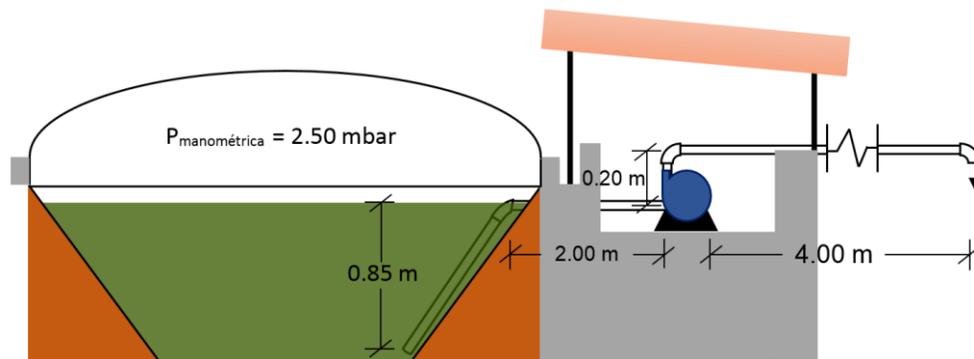


Figura 5.20: Medidas de tuberías para el sistema de extracción de lodos para biodigestor de laguna cubierta. Fuente: Elaboración propia.

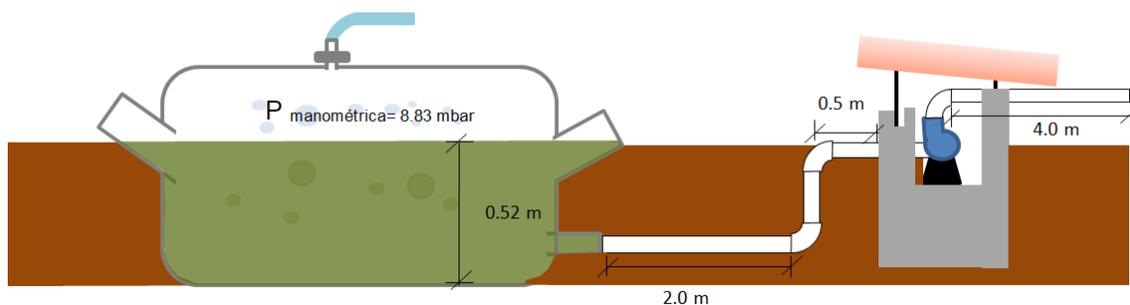


Figura 5.21: Conexión de sistema de extracción de lodos para biodigestor tubular. Fuente: Elaboración propia.

#### 5.2.4 Tratamiento secundario posterior a la biodigestor

Como resultado de la digestión anaeróbica se obtienen dos componentes, un componente líquido conocido como Biol y un componente sólido conocido como Biosol, los cuales son muy útiles para actividades de irrigación, pues son promotores y fortalecedores del crecimiento de la planta, raíces, mejorando la floración y activando el vigor y poder germinativo de las semillas, traduciéndose en un aumento significativo de las cosechas.

Guanopatín (2012) indica que el Biol puede utilizarse en hortalizas, cultivos anuales, pastos, frutales, plantas ornamentales, como encapsulador: en relación 1:1 con el plaguicida al mezclar. En mezcla con fertilizantes se utiliza 3 o 4 litros por hectárea en mezcla con la solución madre de fertilización. En huertas de dormancia se utilizan 2 litros

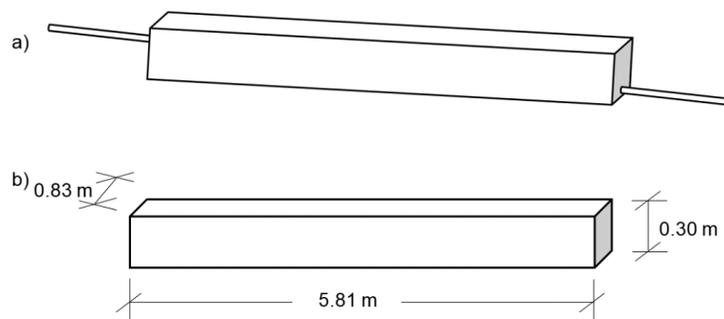
por cada 100 L de agua. El Biosol por su parte se emplea de la misma manera que se emplea el compost, sin embargo la dosificación varia, según Aparcana y Jansen (2008) dicha dosis es de 2 a 4 toneladas/ha, también se puede incluir en la preparación del suelo antes de colocar las semillas, en este caso deberá ser colocado a una profundidad entre 10-20 cm y luego de la germinación y crecimiento de la planta se puede seguir abonando utilizando el Biosol. Por tanto en períodos de siembra, cosecha y para actividades de riego desarrollados en la Estación Experimental, se puede incorporar el Biol y Biosol generado de la digestión anaeróbica.

Para el caso del Biol y Biosol en exceso o en períodos en que no se necesiten, se hace necesario la incorporación de un tratamiento secundario que permita nivelar las cargas orgánicas y características fisicoquímicas a valores permisibles para su ingreso a cuerpos receptores.

### **Laguna de Biol (tanque de descarga del biodigestor)**

La laguna se construye de concreto y tendrá una geometría rectangular. De igual forma, se recomienda que esta laguna esté cubierta tanto en la parte inferior como la superior, por geomembrana de las mismas especificaciones antes descritas para el biodigestor (Pezo, Velásquez, Acosta y Veen, 2011).

El volumen de esta laguna será de  $1.45 \text{ m}^3$  y al igual que todas las construcciones anteriores, poseerá una inclinación del 3%. Las dimensiones de esta laguna de biol se muestran en la figura 5.22 (Ver cálculos de dimensionamiento en Anexo A28).



*Figura 5.22: Dimensiones de la laguna de Biol. a) Partes de la laguna de Biol. b) Dimensiones de la laguna de Biol. Fuente: Elaboración propia.*

### Homogeneizador secundario

Tendrá una geometría cilíndrica, una relación de altura-diámetro de 1.5 (Romero, 2008) y un factor de seguridad de 20%. Debido a que el caudal que entrará en este tanque será igual al caudal de salida diario del biodigestor, su volumen corresponde al volumen almacenado en la laguna de Biol. Por lo tanto el volumen final de este homogeneizador será de  $1.45 \text{ m}^3$ .

Debido a que el agua a tratar puede corroer el tanque a medida pasa el tiempo, se propone que el material de elaboración de éste sea acero inoxidable o acero al carbón 304. El agitador será del tipo paleta con motor con potencia de 1/2 HP (Ver cálculos de dimensionamiento en Anexo A29). La figura 5.23 muestra las dimensiones del tanque homogeneizador secundario:

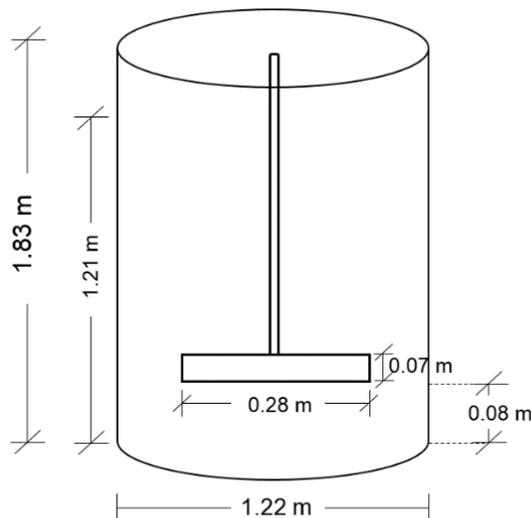


Figura 5.23: Dimensiones del tanque homogeneizador secundario. Fuente: Elaboración propia.

Este tanque al igual que el primer homogeneizador, se construirá bajo tierra y el líquido homogeneizador será succionado mediante una bomba para hacerlo llegar al nivel del tanque clarificador y se recomienda que este tanque también posea una pendiente o inclinación del 3%. Además, también se agregarán cuatro placas deflectoras que se encontrarán a una distancia de la pared del tanque de 5 cm y un ancho que se calcula mediante la ecuación 5.17.

$$A_{P.D.} = \frac{1}{8} * D_i$$

*Ecuación 5. 17*

$$A_{P.D.} = \frac{1}{8} * 1.22 \text{ m}$$

$$A_{P.D.} = 0.15 \text{ m}$$

En este homogeneizador se llevará a cabo la regulación del pH para hacer llegar el agua residual al valor de pH de trabajo óptimo del coagulante. De esta forma, se propone la instalación de un Sistema ORP (Regulador de pH Óptimo), el cual tiene como objetivo controlar el valor de pH del agua residual contenida en el tanque de homogenización logrando, según el valor de medición, introducir soluciones ácidas o alcalinas para mantener los valores dentro de un límite. La programación de los valores límite, se efectúa normalmente a través del display y teclado que se encuentran en la parte frontal del regulador de pH.

#### Bomba de succión para homogeneizador secundario

Al tener el tanque homogeneizador bajo tierra, y el tanque clarificador a un nivel superior del suelo, es necesario utilizar una bomba con una potencia de ½ HP que succione el líquido homogeneizado mediante una tubería de PVC de diámetro 2 ½ pulgadas para suministrarlo a este último. También es necesario instalar una válvula “Check” que cumpla la misma función que para el caso del homogeneizador primario. La figura 5.24 muestra la distribución de equipos que involucran el uso de esta bomba (Ver cálculos de dimensionamiento en Anexo A30).

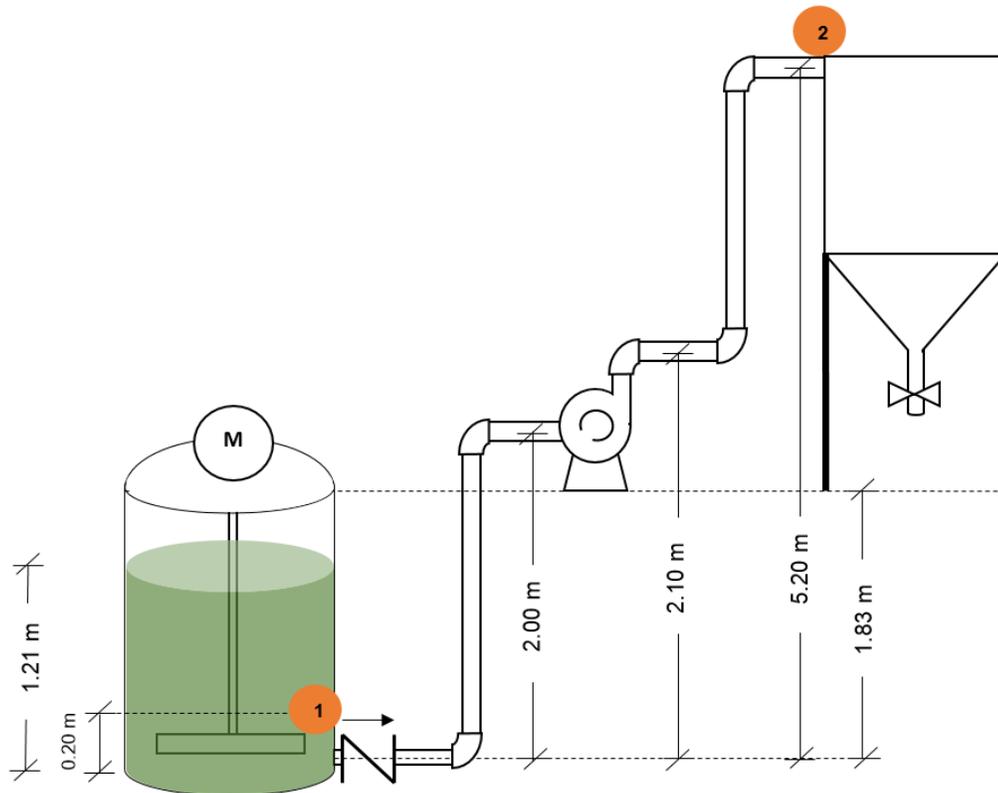


Figura 5.24: Esquema de sistema de bombeo de homogeneizador a clarificador. Fuente: Elaboración propia.

### Dosificador de coagulante

Debido a la importancia que tiene una buena dosificación del coagulante, se propone instalar un sistema de dosificación automático, donde solamente será necesario preparar el coagulante a la concentración óptima recomendada, cargar el tanque del dosificador y programar la cantidad a dosificar por carga.

### **Tanque clarificador (Tratamiento fisicoquímico)**

El clarificador es un componente clave de muchos sistemas de tratamiento de aguas residuales ya que ayuda a eliminar los contaminantes muy concentrados; es un tanque de sedimentación utilizado para la remoción de sólidos. Las dimensiones de este tanque son presentadas en la siguiente figura 5.25 (Ver cálculos de dimensionamiento en Anexo A31):

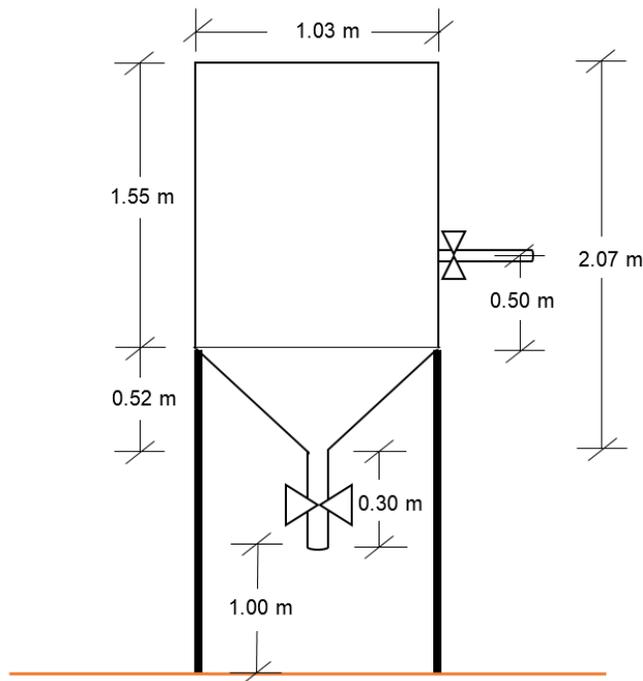


Figura 5.25: Dimensiones y accesorios de tanque clarificador. Fuente: elaboración propia.

Se propone que el motor perteneciente al agitador de este tanque sea un motor reductor con el fin de realizar la mezcla rápida durante cinco minutos, después de este tiempo se reducirá la velocidad de agitación permitiendo la reacción entre el coagulante y la materia suspendida dando como resultado la formación de los flocs y su sedimentación.

Para este tanque, se propone el uso ya sea un agitador de paleta que, por las medidas del tanque clarificador, las dimensiones de este agitador se aproximan a las mismas que el agitador del homogeneizador secundario; o un agitador de hélices cuyo diámetro será igual a 0.30 m. La altura del agitador de paletas respecto al fondo de la parte cilíndrica del tanque es 0.08 m y para el agitador de hélices es de 0.40 m.

En el anexo A32, a manera de resumen, se presenta una tabla con todos los materiales y equipos planteados para cada una de las propuestas de tratamiento, así como una estimación de costos de forma total para cada propuesta y sus etapas de tratamiento.

### **5.2.5 Patios de secado para biodigestor y para tanque clarificador.**

Se requiere la construcción de patios secado del tipo pavimentado, utilizando ladrillos con una separación entre ladrillos de 2.5 cm cubiertos con la misma arena, en lugar de concreto donde se drenarán directamente los lodos provenientes tanto del biodigestor como los del clarificador; para así obtener mejor calidad de drenaje del agua proveniente del lodo y acortar el tiempo de pertenencia en el lecho de secado, este patio estará dividido en varios segmentos de lechos y el fin de cada uno será almacenar la descarga diaria que se acumulará por semana en cada segmento de patio. Los principales componentes del patio de secado serán:

- Una losa superficial donde se reciben directamente los lodos a ser secados.
- Una losa de fondo de concreto reforzado con una pendiente mínima de 1.5% (Comisión Nacional del Agua, 2015) hacia el área de recolección del drenaje, donde una tubería de diámetro mínimo de 100 mm conduce el líquido drenado.
- Un filtro de arena.

El llamado filtro de arena, para plantas pequeñas o medianas está compuesto de:

1. Una capa uniforme de grava de 30 cm de espesor ubicada en el fondo.
2. Sobre dicha capa se coloca otra camada de arena gruesa limpia de unos 15 a 20 cm (Comisión Nacional del Agua, 2015).
3. Por debajo de estas dos capas se colocan a modo de drenaje y al final de la inclinación de la losa del fondo, tuberías abiertas de manera que se produzca un filtrado efectivo.

El espesor del lodo nunca debe sobrepasar los 30 cm (Construcplan Consultora S.A., 2002), pues con un mayor espesor, implicaría mayores tiempos de retención. Si se tienen buenas condiciones ambientales, bien digerido y con el espesor de 30 cm, el lodo seca en 3 o 4 semanas, teniendo una apariencia agrietada y esponjosa cuando se lo oprime y de fácil manipulación. El lodo mal digerido, es de olor ofensivo y se deshidrata muy lentamente.

El sistema completo tendrá su punto más bajo sobre el nivel del suelo para así, evitar el uso de bombas sobredimensionadas y gasto en equipos que pueden fácilmente reemplazarse. Además el sistema de secado de lodos, estará cubierto por un techo.

### Lecho de secado para lodos generados en el/los biodigestores

Los lodos generados en el biodigestor representan el 10% del agua que entra a este. Por lo tanto, la cantidad de lodos a diario en este tanque es  $0.1363 \text{ m}^3$  y durante una semana, se tendrá un volumen de lodos generados igual a  $0.95 \text{ m}^3$ .

Tomando en cuenta que la altura máxima que deben tener los lodos dentro del lecho, las demás dimensiones se han seleccionado a conveniencia de poseer lechos con una longitud significativamente más grande que el ancho, debido a las características que posee el terreno perteneciente al área de ganado bovino, en la Estación Experimental.

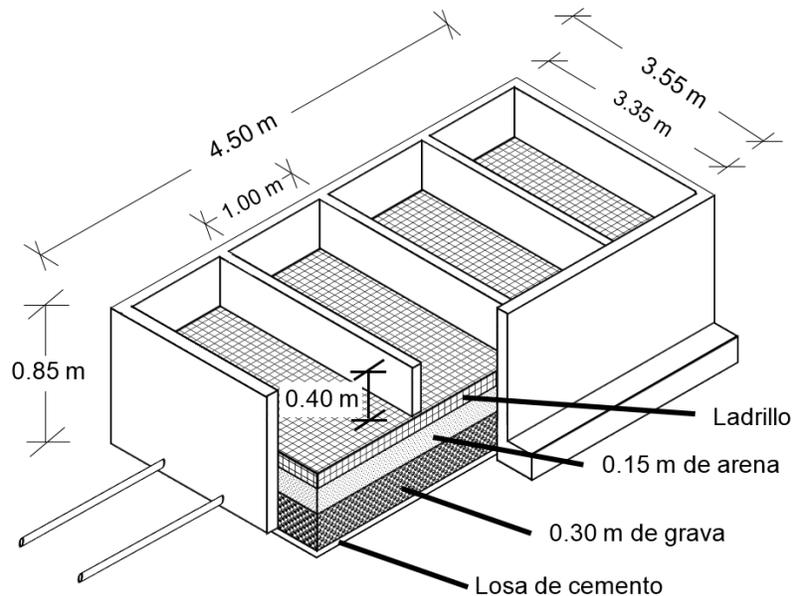


Figura 5.26: Dimensiones para patios de secados de lodos provenientes del biodigestor. Fuente elaboración propia.

### Lecho de secado para lodos generados en el clarificador:

Los lodos generados en el tanque clarificador representan el 40% del agua que entra a este, por lo tanto, la cantidad de lodos descargados a diario en este tanque es  $0.58 \text{ m}^3$  y

durante una semana, se tendrá un volumen de lodos generados igual a  $4.07 \text{ m}^3$ . Al igual que el patio de secado anterior, se tomó como requerimiento base, que los lodos no sobrepasaran los  $0.30 \text{ m}$  de altura y las demás dimensiones vienen dadas a conveniencia debido a las características del terreno.

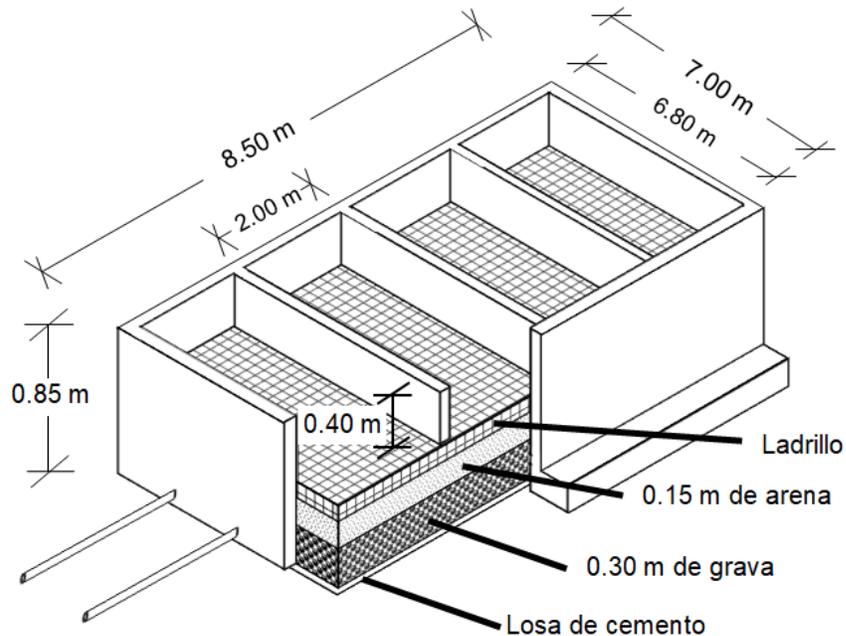


Figura 5.27: Dimensiones para patios de secado de lodos provenientes del clarificador.

De la misma forma que se dimensiona un sistema de gestión de los residuos del biodigestor es importante el dimensionamiento de un sistema de conducción de biogás para su aprovechamiento, lo cual es de suma importancia pues si este no se quema, únicamente se trasladaría el problema de reservorios de agua a la atmósfera. Se estima que si este se libera indiscriminadamente a la atmósfera se estarían emitiendo  $22.70 \text{ kg CO}_2$ , mientras que aprovechándolo únicamente se emiten  $3.12 \text{ kg CO}_2$  (Ver cálculo en Anexo A47), por lo que bajo ningún motivo debe liberarse de forma directa, sino quemarse.

El uso al que se destine el biogás depende sustancialmente de la cantidad que se espera generar lo que a su vez da paso a determinar el sistema de transporte y la selección de

equipos para el acondicionamiento del biogás, estimaciones que se presentan a continuación:

### **5.2.6 Estimación teórica de la producción de biogás generado**

El valor de producción de biogás diario asumido será igual al valor estimado de forma teórica, asumiendo que la remoción de cargas de DQO será semejante a los obtenidos en la fase experimental, obteniendo como resultado un valor de 1.86 m<sup>3</sup>/día. En el Anexo A33 se presenta la forma de cálculo.

### **5.2.7 Aprovechamiento de biogás generado**

#### **Generación de energía eléctrica**

Dentro de los usos más importantes que se le puede dar al biogás está la generación de energía eléctrica, ya que puede ser utilizado como combustible en motores de combustión interna, turbinas, o en dispositivos capaces de transformar la energía que posee el biogás a energía eléctrica, dichos dispositivos son conocidos como generadores eléctricos, que se dimensionan a partir de la potencia máximas y mínima proporcionadas por el flujo de biogás generado por hora.

Al observar los consumos de biogás para diferentes capacidades de generadores distribuidos en la región, se puede indicar que no es posible generar energía eléctrica con el flujo de 0.08 m<sup>3</sup>/h que es el esperado, lo que puede corroborarse en el Anexo A34, pues el flujo mínimo requerido es de 0.58 m<sup>3</sup>/h.

#### **Generación de energía calorífica para cocina**

En la Estación Experimental al que pertenece el establo de ganado se cuenta con el Departamento de Agroindustria, donde a diario se realizan actividades educativas y de capacitación que involucran el uso de una cocina (ver Anexo A35), ubicándose a una distancia de aproximadamente 80 m del establo.

Viéndose el potencial de aprovechamiento del biogás se procedió a la realización de un estudio de consumo de Gas Líquido Propano (GLP), con la finalidad de saber cuánto de GLP se está consumiendo y realizar los cálculos necesarios para remplazarlo con el biogás. Según la información presentada por el Departamento de Agroindustria se usan mensualmente dos cilindros de gas de 25 lb en las cocinas para el desarrollo de las jornadas diaria de 4h.

El poder calorífico del gas propano comercial por su parte es de 11.082 Kcal/Kg (tomado de: [www.minetad.gob.es/energia/glp](http://www.minetad.gob.es/energia/glp)), por lo que la demanda energética mensual es:

$$2 * 25 \text{ lbs GLP} * \frac{0.4535 \text{ kg GLP}}{1 \text{ lb GLP}} * \frac{11,082 \text{ Kcal}}{1 \text{ kg GLP}} = 251284.35 \text{ Kcal}$$

Debido a que el poder calorífico del biogás está relacionado con el porcentaje de metano que lo conforma, se tomara el valor presentado por Cunalata (2017) de 4845.09 kcal/m<sup>3</sup> que pertenece a un biogás generado por un biodigestor de desechos de ganado bovino, siendo por tanto el requerimiento de biogás (ecuación 5.18):

$$\text{Volumen de Biogas requerido por mes} = \frac{\text{Consumo energetico}}{\text{Poder Calorifico del Biogas}}$$

*Ecuación 5. 18*

$$\text{Volumen de Biogas requerido por mes} = \frac{251284.35 \text{ kcal}}{4845.08 \text{ kcal/m}^3} = 51 \text{ m}^3$$

Siendo la demanda diaria de 1.73 m<sup>3</sup> (75-90 mm de columna de agua y a 30°C) al sustituir al 100% con biogás, si la producción teórica de biogás es cerca de 1.86 m<sup>3</sup> (75-90 mm de columna de agua y a 30°C), se puede inferir que cerca del 100% de la demanda energética puede ser sustituida con biogás.

La cantidad de biogás debe ser suministrada en el período en el que se desarrollan las actividades académicas es decir 1.86 m<sup>3</sup>/4h lo que es igual a un caudal máximo requerido de 0.47 m<sup>3</sup>/h en el horario de 8:00 am a 12:00 m.

Para la sustitución del biogás en cocina puede realizarse por dos vías:

- Adaptación de la cocina comercial de propano a biogás, cambiando la relación aire-gas (Ver Anexo A36).
- Construcción de una estufa especial para biogás (Ver Anexo A37).

### **5.2.8 Sistema de conducción de biogás**

Una vez determinado el flujo de biogás generado y la aplicación a desarrollar, se procede a dimensionar el sistema que remueve el biogás desde el biodigestor y lo transporta hasta el punto donde será su uso final. Este sistema incluye: tuberías, equipos de medición, sistemas de almacenamiento, acondicionamientos que dependen de las presiones de trabajo requeridas y las proporcionadas por el biodigestor; por lo que se desarrolla un sistema de conducción para los biodigestores tubulares (Figura 5.28) y uno para el biodigestor de laguna cubierta (Figura 5.29).

#### **Material de conducción de tubería de biogás**

La selección del material de las tuberías de conducción se determina en función del tipo de gas y temperaturas de trabajo; al ser las mismas para ambas alternativas de biodigestores se utiliza el mismo material indistintamente.

La norma AS/NZS5601.1:2013 especifica los materiales aceptados para el transporte de gas, entre ellos PVC; del cual recomienda su utilización cuando la temperatura del gas a manejar es menor a los 60 °C, así mismo la Unión de Planeación Minero Energética (UPME) en su guía para la implementación de sistemas de producción de biogás recomienda el uso de PVC en el sistema de conducción, debido a que este tipo de material no es afectado por la acción del ácido sulfhídrico, resistentes a la corrosión y por su alta disponibilidad en el mercado así como de los accesorios de dicho material.

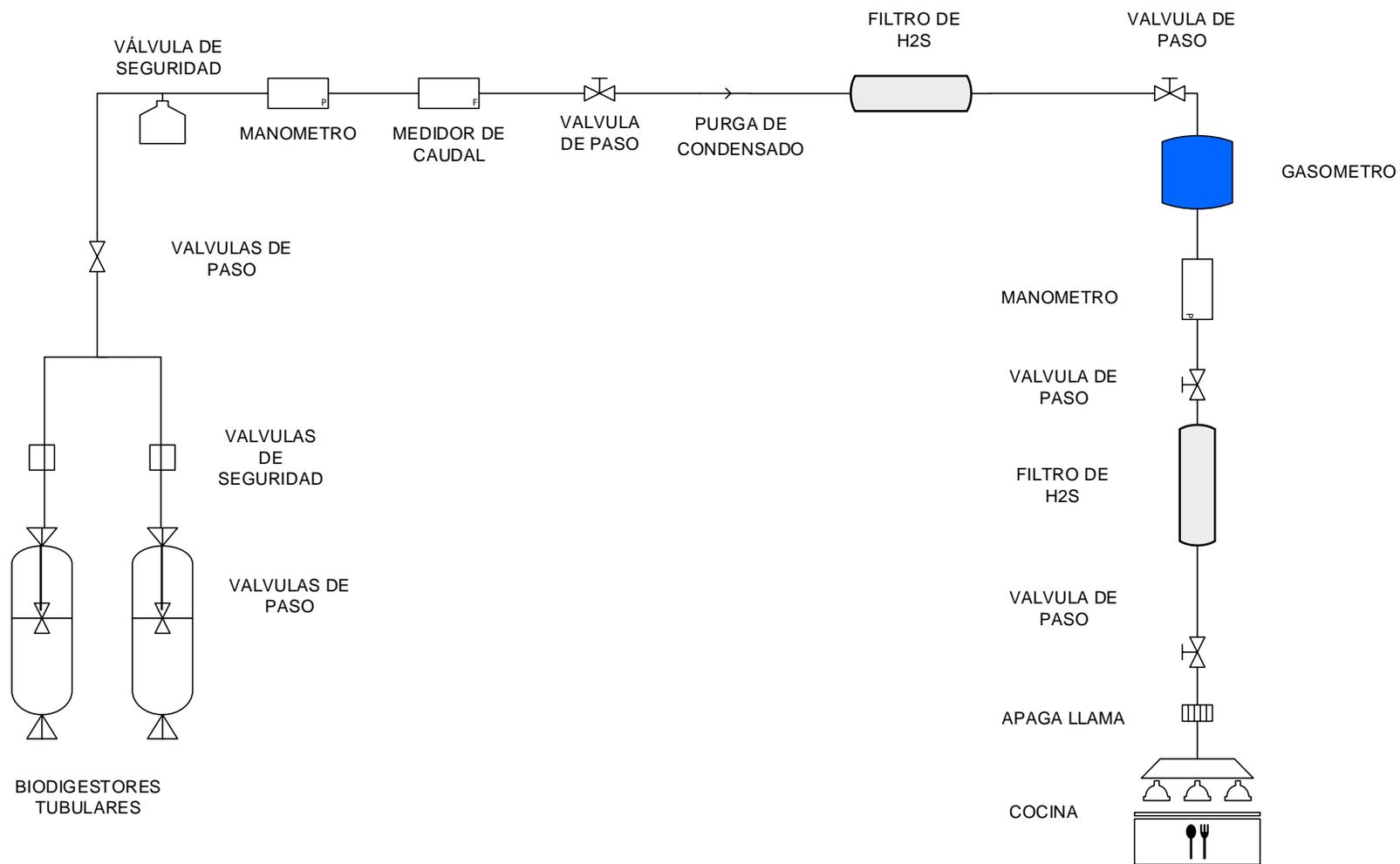


Figura 5.28: Sistema de conducción de biogás para biodigestores tubulares. Fuente: Elaboración propia.

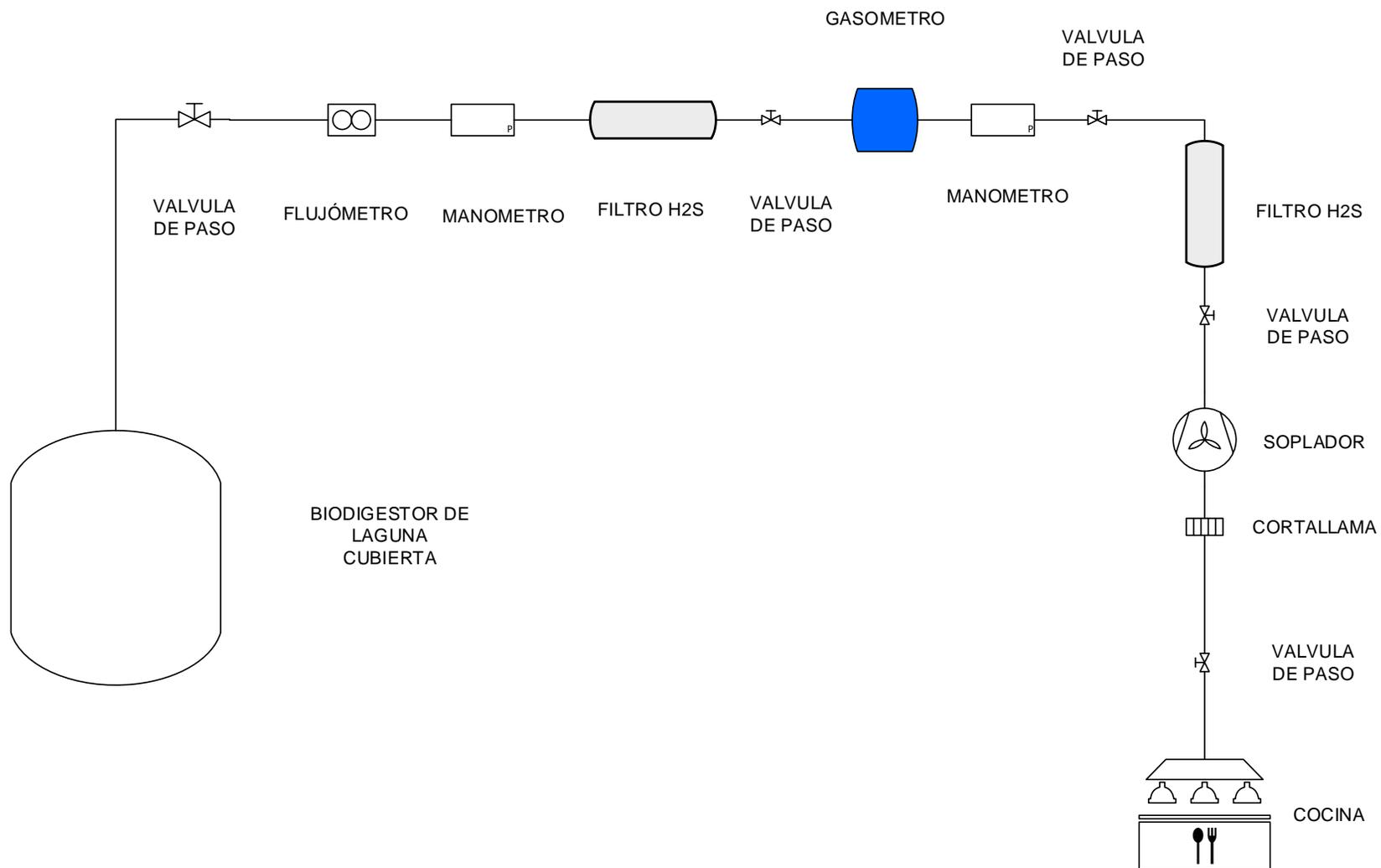


Figura 5.29: Sistema de conducción de biogás para biodigestor de laguna cubierta. Fuente: Elaboración propia

La tubería de biogás se instala de forma visible para ambos tipos de biodigestores. Toda la tubería de biogás debe pintarse de color amarillo con una flecha que indique la dirección del flujo (Bosch, 2011).

### **Diámetro de tubería para conducción de biogás**

El cálculo del diámetro de tubería estará basado en la ecuación de Weymouth (ecuación 5.19), en donde se toma en cuenta las presiones de trabajo del gas, distancia de conducción y flujo de gas manejado despreciando las posibles caídas de presión en el sistema causadas por los futuros instrumentos ubicados en la línea de transporte del biogás (Medina y Mora, 2009).

$$Q_g = 865 d^{2.67} \left[ \frac{P_1^2 - P_2^2}{L_m} \right]^{1/2}$$

*Ecuación 5. 19*

Despejando

$$d = \left( \frac{Q_g}{865 \left[ \frac{P_1^2 - P_2^2}{L_m} \right]^{1/2}} \right)^{1/2.67}$$

*Ecuación 5. 20*

### Diámetro de tubería de conducción de biogás para biodigestores tubulares

Para biodigestores tubulares, diversos autores (Escobedo,2011; Martí y Cipriano, 2012; MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, 2011) indican que la presión ronda entre los 80-130 mm de columna de agua, por lo que se toma el valor de la presión máxima que puede alcanzarse, es decir 130 mm de columna de agua como presión 1; y para la presión 2, se toma 90 mm de columna de agua debido a que en las aplicaciones de cocina la presión del gas ronda entre los 75-90 mm de columna de agua (Suntásig, 2010). En la tabla 5.5 se presenta los valores de cada variable tomados:

Tabla 5.5: Parámetros para determinación de diámetro de tubería para conducción de biogás, biodigestor tubular.

Variable	Valor	Unidades
D	Valor a determinar	In
Q <sub>P</sub> '	65.68	ft <sup>3</sup> / día
P <sub>1</sub>	0.19	psia
P <sub>2</sub>	0.12	psia
L <sub>m</sub>	0.04	millas

Fuente: Elaboración propia.

Sustituyendo en la ecuación 5.20

$$d = \left( \frac{65.68 \frac{ft^3}{día}}{865 \left[ \frac{(0.19 \text{ psia})^2 - (0.12 \text{ psia})^2}{0.04 \text{ mi}} \right]^{1/2}} \right)^{1/2.67}$$

$$d = 0.43 \text{ in}$$

El valor de diámetro de tubería mínimo para la conducción de biogás es de 0.43 in de pulgada, el cual se aproxima al diámetro comúnmente comercializado que es de ½".

#### Diámetro de tubería, conducción de biogás para biodigestor laguna cubierta

En los biodigestores de laguna cubierta se manejan presiones muy bajas, en el orden de 2 a 4 mbar (Iza, 2015) por lo que se requiere de un soplador que aumente la presión a la requerida para la conducción hasta la cocina, las presiones proporcionas son más estables pues se pueden regular; por lo que para el cálculo del diámetro de tubería se toma como presión 1 la presión de salida del soplador que ronda en los 10.0 mbar (101.9 mm de columna de agua), y como presión 2 la presión requerida en la cocina que

es entre 75-90 mm de columna de agua. En la tabla 5.6 se presenta los valores de cada variable tomados:

Tabla 5.6: Parámetros para determinación de diámetro de tubería para conducción de biogás, biodigestor laguna cubierta.

Variable	Valor	Unidades
D	Valor a determinar	In
Q <sub>P'</sub>	65.68	ft <sup>3</sup> / día
P <sub>1</sub>	0.15	psia
P <sub>2</sub>	0.11	psia
L <sub>m</sub>	0.04	millas

Fuente: Elaboración propia

Sustituyendo en la ecuación 5.20

$$d = \left( \frac{65.68 \frac{ft^3}{día}}{865 \left[ \frac{(0.15 \text{ psia})^2 - (0.11 \text{ psia})^2}{0.04 \text{ mi}} \right]^{1/2}} \right)^{1/2.67}$$

$$d = 0.49 \text{ in}$$

El diámetro de tubería mínimo es de 0.49 in, aproximándolo al valor más cercano de los que se encuentran en el mercado, se selecciona un diámetro de ½ in para el sistema de conducción.

### Medidores de Biogás

Se recomienda preferentemente la instalación de medidores de biogás entre el biodigestor y los sistemas de combustión del gas, uno de los medidores deberá cuantificar el flujo de biogás hacia los sistemas de quema y/o aprovechamiento en todo momento de operación

del digester. El medidor se seleccionará dependiendo de la cantidad de biogás que se produzca en el biodigestor. El otro medidor deberá cuantificar la presión en el sistema, se coloca uno después del gasómetro con el objetivo de conocer la presión y saber si será necesario algún dispositivo para la conducción del biogás si la presión es muy baja. En el Anexo A38 se muestran las especificaciones del medidor de flujo y manómetros recomendados.

### **Válvula de alivio o válvula de seguridad**

Esta válvula, que debe ser colocada cerca del biodigestor, permite tener un lugar dentro del sistema a donde se liberaría presión, debido a que se ha saturado el sistema o se ha sobrepasado la presión dentro del mismo. En el caso de los biodigestores tubulares se realiza con una botella plástica, se hace una abertura en la parte superior para poder ir rellenándola de agua cuando ésta se vaya evaporando. Se coloca tras la primera llave de paso, que había servido para cerrar la salida de biogás, y se coloca una te de manera que el biogás pueda seguir su recorrido, pero a la tercera salida de la te se une una pieza de tubería de  $\frac{1}{2}$ " y ésta se introduce en la botella de plástico llena de agua (en Anexo A39 se muestra la estructura del sistema), la tubería debe quedar sumergida en el agua de 8 a 13 cm (Taipa, 2016).

Cuanta mayor altura tenga el sistema de conducción, menor presión se necesita, y menos tiene que estar sumergido el tubo en el agua, Si la aplicación del biogás se desarrollara en cocina, cuanta mayor distancia a la cocina mayor presión se necesita y más sumergido ha de estar el tubo (Martí, 2008). Si es una cocina tradicional para gas (ya manipulada para funcionar con biogás) también conviene aumentar la presión. Para determinar la presión idónea es necesario ir realizando pruebas de la combustión de biogás hasta que el usuario éste conforme.

### **Purga de condensando**

Guardado (2007) indica que el gas proveniente de un biodigestor sale generalmente saturado con vapor de agua, parte del cual puede condensarse en la tubería, lo que causa

obstrucciones. Generalmente en los puntos bajos es donde se acumula dicho condensado, en dichos puntos Martí (2008) recomienda poner una te con la tercera salida tapada por un tapón de rosca (ver Anexo A40), de manera que de vez en cuando, abriendo este tapón salga el agua acumulada.

### **Filtro de H<sub>2</sub>S**

El sulfuro de hidrogeno (H<sub>2</sub>S) o ácido sulfhídrico en disolución acuosa, es un gas inflamable y se forma en el digestor por la transformación de compuestos que contienen azufre como las proteínas. Debe ser removido del biogás porque tanto éste como el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) producto de su combustión, al combinarse con vapor de agua causan la corrosión de partes metálicas, además de ser gases muy nocivos para las personas y el medio ambiente (Arellano et al., 2017); así mismo el H<sub>2</sub>S es altamente inflamable, por lo que con concentraciones en el aire mayores al 4.3% puede generar una explosión por ignición y los peligros que generan por su reactividad (Valerio, 2010).

Ante tan particulares características se requiere un proceso práctico y de bajo costo para la desulfuración del biogás generado. La alternativa propuesta se basa en el sistema de filtrado planteado por Hidalgo, Maravillas y Ramírez (2010), recomendado para el aprovechamiento de biogás en cocina domestica con volúmenes de trabajo diarios de 1 a 10 m<sup>3</sup> (75-90 mm de columna de agua y a 30°C). El filtro está formado por un tubo PVC con una longitud de 1.5 m que en su interior posee viruta o limadura de hierro (ver Anexo A41), se sugiere que el diámetro del filtro de H<sub>2</sub>S sea mayor que el de la tubería en donde se haga la toma. Es decir, si la tubería donde se transporta el biogás es de ½” a ¾” se recomienda un diámetro de tubería de 2” para el filtro, con el objetivo de poder almacenar una buena cantidad de virutas de hierro o limaduras de hierro adentro de la tubería, las cuales reaccionaran con el H<sub>2</sub>S contenido en el biogás acelerando de esta forma el proceso de oxidación en el filtro y no en los dispositivos antes mencionados. Dicha limadura de hierro debe ser previamente oxidada, la forma convencional es remojándola con pequeñas cantidades de agua, hasta que se observe una cantidad significativa de óxido, dando paso a un secado con sol.

El  $H_2S$  del biogás reacciona con el óxido de hierro de la limadura de hierro u óxidos y forma sulfuro de hierro en la capa superior de las mismas y cuando dicha limaduras o viruta oxidadas se cubren completamente con sulfuro, son removidas desde el tubo para la regeneración del sulfuro. Llanea, González y González (2010) indican que la concentración de  $H_2S$  en biogás varían de acuerdo al sustrato y van desde 1500 hasta 4000 ppm.

Para la estimación de la cantidad de  $Fe_2O_3$  necesaria se asumirá el valor más alto, es decir, si la concentración de  $H_2S$  es 4000 ppm (0.4% volumen) entonces la cantidad de  $H_2S$  que habría que removerse en el biogás generado a diario ( $1.86 m^3$ ) es de 7.44 L. Considerando la densidad del  $H_2S$  de  $1.43 kg/m^3$  (1 atm y  $25^\circ C$ ), la cantidad que debe retirarse diariamente es 10.67 g. Un kilogramo de óxido férrico puede remover 0.56 kg de  $H_2S$  (McKinsey, 2003), entonces se necesitan 19.05 g de óxido férrico (al día) al interior del filtro. Se sugiere cambiar la limadura oxidada cada 6 meses, en este período se requerirían 3.43 kg de la misma para filtrar el biogás. Debido a que no toda la limadura de hierro es óxido férrico se recomienda sobredimensionar colocando en total 5.0 kg de limadura de hierro oxidada.

Arrieta (2010), así mismo sugiere la colocación de dos filtros en los deben repartirse los 5 kg de limadura oxidada de hierro. El primer filtro debe colocarse en la tubería que conduce el biogás desde el biodigestor hasta el gasómetro, y el segundo filtro debe colocarse en la tubería que conduce el biogás hasta los puntos de consumo.

### **Gasómetro**

La producción de gas de un digestor anaeróbico es continua a lo largo de las 24 horas del día; no ocurre lo mismo con su consumo, que por lo general está concentrado en una fracción corta de tiempo. Por este motivo será necesario almacenar el gas producido durante las horas en que no se consuma. La dispersión del consumo y su intensidad determinará el volumen de almacenamiento requerido. Por lo tanto cuanto más concentrado esté el consumo en un período de tiempo corto, mayor será la necesidad de almacenaje. Por lo general el volumen de almacenamiento no baja del 50% de la producción diaria (Hilbert, 2003). De los diferentes tipos de sistemas de almacenamiento desarrollados para el biogás, para las dos alternativas se recomienda el uso un

almacenamiento de biogás de membrana de PVC de 3 m<sup>3</sup>, (ver Anexo A42 para especificaciones).

### Filtro de CO<sub>2</sub>

Por las presiones de operación y la características del CO<sub>2</sub> de ser menos soluble que el H<sub>2</sub>S, requiere mayores cantidades de agua y presión para su filtración, haciendo necesario el uso de torres de absorción o absorción de membrana, que requieren complicados sistemas de flujo (montaje de intercambiadores de calor, bombas, válvulas y energía).

En base a lo anterior y lo sugerido por Valerio (2010), en donde indica que si el uso que se le dé al biogás es para cocina, no es necesaria la remoción de este compuesto y sobre todo cuando esta no es rentable (ver tabla 5.7).

*Tabla 5.7: Requisitos de remoción de distintos compuestos gaseosos de acuerdo a la aplicación en la que se utilice el biogás.*

Uso del biogás	Componentes del biogás		
	H <sub>2</sub> S	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
Caldera (Calentador de agua)	Reducir <1000 ppm	No	No
Cocina	Si	No	No
Motor estacionario	Reducir <1000 ppm	No	Evitar condensación
Combustibles para vehículos	Si	Si	Si

*Fuente: Valerio (2010).*

### Corta llama o Apaga llama

Las cortas llamas son equipos diseñados para evitar la propagación de explosiones en tuberías y venteos de diversos equipos de planta: tanques, reactores, descarga de

cisternas, hornos, quemadores, bombas, compresores, gasómetros, etc. (Puncernau y asociados, 2015).

#### Corta llama para biodigestor tubular

Con el objetivo de evitar que al generarse una llama esta llegue a tener contacto con el gasómetro, se coloca un conjunto de virutas de metal inoxidable (Ver Anexo A43) en el interior de la tubería en la que se realiza la conducción del biogás, se coloca a una distancia de 10 cm de la válvula de la cocina cerca del quemador (Agraria, 2008).

#### Corta llamas para biodigestor de laguna cubierta

La tecnología más conveniente debido al caudal manejado a diario es una espuma contrafuego intumescente, la cual se expande cuando está expuesto al fuego, proveyendo un sellado para tuberías, pues cierra el acceso de fuego dentro de la tubería, con protección aproximadamente por 3 horas. (Ver especificaciones en Anexo A44).

#### **Soplador**

Como se mencionó anteriormente para el uso de biogás en cocinas se requieren presiones entre 8.0 y 9.0 mbar muy por encima de la presión con la que se sale del biodigestor que es alrededor de los 2.5 mbar para biodigestores de laguna cerrada. Por lo que se requiere necesariamente un soplador o extractor que aumente la presión del gas, la selección se realiza en base al caudal de biogás por hora obtenido y la presión final requerida, en este caso una presión final 9.0 mbar y un caudal de gas de 0.47 m<sup>3</sup>/h.

Por la naturaleza del gas y la carga total se selecciona como soplador la marca **Turbotron®Verdichter**, modelo **20HS**, en el Anexo A45 se detalla las características de construcción, curvas de funcionamiento y sus dimensiones. En el caso de los biodigestores tubulares, podría presentarse la necesidad de uso de un soplador si las presiones en el sistema de conducción de biogás no logran los valores esperados. De ser así, al ser la misma naturaleza del gas y la misma carga total, se usan las especificaciones planteadas para el soplador del biodigestor de laguna cerrada.

## **Recomendaciones técnicas**

### Para el pre tratamiento:

- Se recomienda instalar dos compuertas móviles en la esquina de la rampa de carga, las cuales permitan el paso del agua residual obtenida del lavado de las excretas, hacia el biodigestor y obstaculice el paso en días lluviosos; para así, evitar el uso de la bomba de extracción del homogeneizador primario. Además, acompañando las compuertas móviles, se recomienda la construcción de techo sobre esta rampa para asegurar que no entren descargas indeseadas provocadas por lluvias, al homogeneizador primario.
- Garantizar la limpieza semanalmente de las rejillas pues, a medida se saturan con los materiales retenidos, se dificulta cada vez más el paso de agua por éstas.
- Se recomienda el uso de bombas centrífugas debido a que además de ser económicas, están diseñadas para el manejo de fluidos en los cuales no se necesita ningún cuidado especial.
- En la temporada de invierno se recomienda abrir la compuerta a la entrada del sistema de homogeneizador, y abrir la válvula diseñada para el rebalse en la caja de distribución.

### Para los biodigestores

- Vallar la zona del biodigestor, para protegerlo del paso de animales.
- Cuidar que no se arrastren piedras o materias extrañas que puedan dañar la geomembrana.
- Asegurarse diariamente que la válvula de entrada al biodigestor se encuentre cerrada a excepción del momento en el que se introduce el agua residual proveniente del lavado de las excretas; y la válvula extra de salida.

- Todas las bombas y agitadores deben contar con una instalación que las resguarde del agua y el sol; además de, proporcionar seguridad para evitar posibles robos.

En el caso del biodigestor de laguna cubierta se recomienda:

- Realizar la agitación diariamente para evitar la formación de espumas, costras y endurecimiento de lodos. Además, se debe tener cuidado que las aspas del agitador no estén muy cerca de la geomembrana perteneciente ya sea a la cúpula o a la que cubre la zanja; pues si esto llega a suceder, se corre el riesgo de romper la geomembrana.
- Agregar por lo menos 5 pulgada más tanto al largo como al ancho dimensionado para la geomembrana con el objetivo de poder realizar de manera más eficiente las uniones por termofusión.

#### Conducción de Biogás

- Mientras no se necesite llevar el biogás a la cocina, debe mantenerse cerrada la válvula de cierre posterior al gasómetro para que en este periodo se esté almacenando, así mismo es importante revisar constantemente las tuberías de conducción del biogás, para detectar fugas.
- Se recomienda crear una estructura que proteja al gasómetro de la intemperie.
- Se recomienda realizar un estudio del poder calorífico del biogás generado, posterior a montar el sistema de tratamiento anaeróbico, para estimar posibles cambios en las cantidades necesarias y tiempos para la combustión con relación a las planteadas en este estudio.
- Revisar todas las mañanas el nivel de agua de la válvula de seguridad del sistema de conducción de biogás correspondiente a los biodigestores tubulares, para que nunca le falta agua, ya que de evaporarse, el biogás es escapará y después el biodigestor morirá al entrarle aire.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- La determinación de la cantidad de excretas producidas por cada cabeza de ganado, resultó ser mucho menor que la estimación teórica esperada; se cree que esto es debido a que el ganado no es alimentado en cantidades comparables con ganado cuyo interés es exclusivamente económicos.
- La caracterización de las aguas residuales procedentes del establo de la Estación Experimental, arrojó como resultado de los parámetros exigidos según la Norma salvadoreña NSO 13.49.01:06 "Aguas residuales descargadas a un cuerpo receptor": pH=8.41, DQO=9620 mg/L, DBO<sub>5</sub>=8000 mg/L, Sólidos Suspendidos=7800 mg/L, Sólidos Sedimentables= 240 mg/L, Coliformes Totales= 24000 NMP/100 mL, Aceites y Grasas= 90 mg/L, Temperatura= 30.2°C; parámetros que, exceptuando pH y temperatura, no se encuentran por debajo de los máximos establecidos por dicha norma como era de esperarse.
- La Actividad Metanogénica Específica del agua residual en estudio fue de 1.21 gDQO/gSVT\*d encontrándose dentro del rango de valores óptimos para el desarrollo de los procesos degradativos anaeróbicos.
- Con base a los resultados obtenidos en el Test de Actividad Metanogénica Específica (AME) y la Prueba de jarras, se determina que la mejor opción como tratamiento principal para aguas residuales de esta naturaleza, es una alternativa anaeróbica; cuyos parámetros de salida obtenidos a una temperatura mayor a 25°C y con agitación diaria fueron: DBO<sub>5</sub>=1588 mg/L, DQO=1320 mg/L, Sólidos Suspendidos Totales= 110 mg/L, Sólidos Sedimentables = 6.79 mg/L, Coliformes Totales= 9600 NMP/100 mL, pH= 7.1, Temperatura=27.0°C.
- Debido a que los valores de los parámetros DBO<sub>5</sub> de 1588 mg/L y DQO de 1320 mg/L posterior al tratamiento anaeróbico aún se encuentran por encima de los máximos permitidos por la norma aplicable, que para DBO<sub>5</sub> es de 800 mg/L y DQO de 300 mg/L, por tanto es necesario recurrir a un tratamiento secundario el cual es seleccionado atendiendo al costo que implicaría un tratamiento aeróbico con

respecto a un tratamiento fisicoquímico y analizando la curva de producción de biogás generado en el Test de Actividad Metanogénica (AME), observando que se llegó a un mínimo de producción de biogás, lo que implica una producción de biogás posterior poco significativa y por ende una reducción de carga orgánica igualmente baja, siendo por tanto no factible un tratamiento anaeróbico, se considera que la mejor alternativa de tratamiento secundario es un fisicoquímico, utilizando como coagulante – floculante el Policloruro de Aluminio (PAC) con una dosis óptima de: 13.5 mL/L al 5% p/V.

- Posterior al tratamiento secundario propuesto los valores de los parámetros fisicoquímicos, en condiciones óptimas, determinados mediante análisis de laboratorio (DQO y Sólidos Suspendidos Totales) y a partir de eficiencias teóricas, son: DQO= 438 mg/L, DBO<sub>5</sub>=364.24 mg/L, Sólidos Sedimentables= 6.80 mg/L, Sólidos Suspendidos Totales=14 mg/L, Aceites y Grasa=36 mg/L, Coliformes Totales= 9600 NMP/100 mL, pH=6.5 y Temperatura= 27.0 °C. Las cuales al comparar con los parámetros exigidos según la Norma salvadoreña NSO 13.49.01:06 “Aguas residuales descargadas a un cuerpo receptor” se encuentran por debajo de los máximos permitidos, lo que permite su aprovechamiento en actividades agrícolas o con las características para poder ser descargada a un cuerpo receptor de ser necesario.
- Con el sistema de tratamiento propuesto se espera remover en un 95.44% la carga de DQO y DBO<sub>5</sub>, reduciendo de forma exponencial la contaminación de los recursos suelo y agua, causado al descargarse en la quebrada con desembocadura al río Cacapa.
- La implementación del sistema de tratamiento planteado, se estima en una inversión total, incluyendo costos y materiales de construcción, de \$12,084.40 al seleccionarse el sistema de biodigestores del tipo tubular o de \$14,167.10 al seleccionarse un biodigestor del tipo laguna cubierta. Al considerar los resultados del presente estudio esto es una baja inversión de capital en comparación al potencial de aprovechamiento de los efluentes líquidos y sólidos en las actividades agrícolas, el potencial del biogás de suplir las necesidades energéticas por

sustitución del propano en la cocina en el área de Agroindustria, y lo más importante el beneficio ambiental y a la salud que traería a las comunidades aledañas al dejar de verter un agua residual altamente contaminada.

- Debido a que el metano tiene un poder de contaminación 28 veces mayor que el CO<sub>2</sub>, si el biogás generado se libera indiscriminadamente solo se transfiere el problema de los reservorios de agua a la atmosfera, contribuyendo considerablemente al efecto invernadero con la emisión de 22.7 kg de CO<sub>2</sub> al día, mientras que al aprovecharse energéticamente o quemarse solo se emiten 3.12 kg de CO<sub>2</sub> al día, por lo tanto la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera equivalen a un 86.28 % menos siempre y cuando sea aprovechado.

## CONCLUSIONES

- ✓ De acuerdo a los resultados obtenidos el tratamiento principal por excelencia para el agua residual generada en el establo de la Estación Experimental, es del tipo anaeróbico debido a la carga orgánica que posee, auxiliándose de un pre tratamiento para homogeneizar, así como para la prevención de posibles inconvenientes en la digestión anaeróbica y de un tratamiento secundario para mejorar la calidad del efluente.
- ✓ El biogás representan una externalidad positiva en el desarrollo de la propuesta presentada, siempre y cuando se garantice el aprovechamiento. Para esta propuesta la cantidad generada puede suplir el 100% de la demanda calorífica requerida en la cocina perteneciente al área de Agroindustria, disminuyendo significativamente así la cantidad de gas propano requerido.
- ✓ El Biol generado posterior a la digestión anaeróbica pueden ser aprovechados como agua de riego de los potreros y demás zonas verdes, así mismo el Biosol como fertilizantes orgánicos en las actividades agrícolas desarrolladas en la Estación Experimental.
- ✓ El tipo de biodigestor más adecuado y económico para el tratamiento anaeróbico y según el agua residual generada es de polietileno, para el cual se realizó el dimensionamiento de dos tipos de biodigestores: biodigestor de laguna cubierta y biodigestor tubular o “salchicha”, donde para este último se proponen el uso en paralelo de dos biodigestores. Los valores obtenidos mediante fórmulas establecidas y relaciones geométricas son:

<b>Biodigestor de laguna cubierta</b>		<b>Biodigestores Tubulares</b>	
Volumen de biodigestor ( $V_b$ )	41.6 m <sup>3</sup>	Volumen de biodigestor ( $V_b$ )	20.88 m <sup>3</sup>
Zanja		Diámetro biodigestor	1.59 m
Ancho inferior ( $A_i$ )	1.0 m	Longitud del biodigestor ( $L_b$ )	10.46 m
Largo Superior ( $L_s$ )	15.80 m	Ancho de manga ( $A_{manga}$ )	2.5 m
Largo inferior ( $L_i$ )	13.60 m	Zanja	
Geomembrana		Volumen ( $V_{zanja}$ )	14.48 m <sup>3</sup>
Largo	15.80 m	Largo Superior ( $L_s$ )	1.34 m
Ancho	3.40m	Largo inferior ( $L_i$ )	1.13 m

- ✓ Al evaluar la experiencia en la Estación Experimental en el uso de biodigestores, la mejor opción para implementar en un primer proyecto es el biodigestor tubular o “salchicha” y en un futuro al contarse con una mejor experiencia en el manejo de las variables de entrada y salida, es posible emprender la construcción de un biodigestor de laguna cubierta, si así se desea.
- ✓ Con el diseño de la propuesta y su posterior construcción a futuro se logrará minimizar la contaminación de los recursos suelo y agua, ya que representa una nueva alternativa de tratamiento de desechos orgánicos del establo de ganado de la Estación Experimental disminuyendo así el impacto ambiental causado al descargarse en la quebrada con desembocadura al río Cacapa.

## RECOMENDACIONES

- Al realizar el dimensionamiento de las dos formas existentes de biodigestor de polietileno, el biodigestor de laguna cubierta al compararlo con el biodigestor tubular es la opción más compleja en construcción, por lo que es recomendable la instalación de un biodigestor tubular al inicio de un proyecto, para comenzar a introducirse en el manejo del agua descargada y producción de biogás. Una vez que se tiene la experiencia suficiente se es posible proyectarse a instalar el biodigestor de laguna cubierta el cual requiere de mayor tecnología e inversión en comparación con la primera opción.
- Cuantificar de forma periódica la cantidad de estiércol generado, pues las cantidades pueden variar debido a cambios en la alimentación del ganado, disminución de animales por subastas, o aplicación de medicamento inusuales, modificando las condiciones planteadas para este estudio.
- Desarrollar un estudio para la continuidad del tratamiento del agua obtenida en el tanque clarificador, con la finalidad de mejorar su calidad; y así mismo realizar una evaluación para su posible uso en actividades domésticas.
- Realizar un estudio referente al aprovechamiento del agua obtenida en el tanque clarificador; ya que con su incorporación como parte del agua de dilución en el pre tratamiento antes de entrar al biodigestor se reduciría la cantidad de agua potable necesaria. Con este estudio de aprovechamiento se determinaría cómo esta mezcla cambiará las características fisicoquímicas a la entrada del biodigestor.
- Realizar un estudio de caracterización al volumen de lodo generado de la clarificación, posterior a la estabilización de los procesos de tratamiento para determinar la concentración de aluminio y estimar las relaciones de mezcla con otros residuos orgánicos para generar compostaje.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Acreditación y Gestión Ambiental en América Latina [AGACE]. (2010). Manual para el muestreo de aguas. Fundación Centro de Gestión Tecnológica e Informática Industrial [CEGESTI]. México.

Agraria, I. (2008). Manual de instalación de un biodigestor familiar tipo manga para zonas Alto-Andinas. Universidad Politécnica de Cataluña. España.

Aguamarket®. (2017). Catálogo de productos Aguamarket® para homogenización. Santiago de Chile. Recuperado 03 de agosto de 2017, de Diccionario: <http://www.aguamarket.com/diccionario/terminos.asp?Id=2785ytermino=homogeneizaci%F3n>

Aguilar y Botero, R. (2007). Biogás: Beneficios económicos utilizando un biodigestor de polietileno de bajo costo. Porcicultura, Ergomix. Recuperado 10 septiembre de 2017: <https://www.engormix.com/porcicultura/articulos/biogas-beneficios-economicos-utilizando-t27339.htm>

Alfaro, M., y Salazar, F. (2005). Ganadería y Contaminación Difusa, implicancias para el Sur de Chile. Agricultura Técnica. Chillán, Chile.

American Society for Testing and Materials International [ASTM]. (2008). Standard Practice for Coagulation-Flocculation Jar Test of Water. Standard ASTM D2035-08, ASTM International. West Conshohocken, USA.

Andía Cárdenas, Y. (2000). Tratamiento de agua: Coagulación y floculación. Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima [SEDAPAL]. Lima, Perú.

Andresen S., H. (2010). Introducción a la explotación lechera. Manual de Ganadería Lechera. Perú. Recuperado 12 marzo del 2017 de: <http://handresen.perulactea.com/manual-de-ganaderia-lechera/>.

Andrew D., E., Leonore S., C. y Arnold E., G. (2012). Standard Methods for the Examination of water and wastewater. United Book Press, Inc., Baltimore, Maryland. U.S.A.

Antúnez, I. B. (2015). Propuesta para el manejo de estiércol de ganado bovino lechero de la nueva sala de ordeño del rancho El Clarín. Trabajo de Grado. Universidad Veracruzana. Xalapa, México.

Aparcana Robles, S. y Jansen, A. (2008). Estudio sobre el Valor Fertilizante de los productos del proceso "Fermentación Anaeróbica", para Producción de Biogás. German PofEC. Perú.

Aqualimpia Engineering (2014). Catálogo de Generadores de biogás AQLgenset. Alemania. Recuperado el 29 julio del 2017 de: <https://www.aqualimpia.com/app/download/14576079122/generadores-man-pdf/>

Aquino F., S., Chernicharo, C., y Foresti, E. (2007). Metodologias para determinação da atividade metanogênica específica (AME) em lodos anaeróbios. Universidad Federal de Minas Gerais. Brasil.

Arango Bedoya, O., y Sanches Sousa, L. (2009). Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea en sistemas anaerobios de tipo UASB. Universidad Nariño. Colombia.

Arcos Pulido, M., Ávila de Navia, S., Estupiñán, S. y Gómez Prieto, A. (2005). Indicadores microbiológicos de contaminación de las fuentes de agua. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca. Bogotá, Colombia.

Arellano L., Dorado A., Marc F., Gamisans X., González A., Hernández S., Lafuente J., Monroy O., Mora M., Revah S. y Sierra H. (2017). Purificación y usos del biogás. Servel de Publicacions. Universidad Autónoma de Barcelona. España

Arrieta Palacios, W. (2016). Diseño de un biodigestor doméstico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado. Universidad de Piura. Perú.

Azevedo Netto, J. M., y Acosta A, G. (2005). Manual de Hidráulica. Editorial Harla Harper y Row Latinoamericana, México DF.

Barba Ho, L. (2002). Conceptos básicos de la contaminación del agua y parámetros de medición. Universidad de Valle. Santiago de Cali, Colombia.

Barrenechea Martel, A. (2004). Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente [CEPIS]. Lima, Perú.

Beltran, Castellanos, Guevara y Lombana (2010). Optimización de la Calidad Química de Lodo Orgánico a partir de Solución Buffer de Fosfatos. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.

Blanco Cobián, D. (2011). Tratamiento biológico aerobio-anaerobio-aerobio de residuos ganaderos para la obtención de biogás y compost. Universidad de León. Provincia de León, España.

Borjas, C. E. (2017). Diseño y dimensionamiento de un biodigestor de laguna cerrada. Entrevistadores: Martínez Orellana T. M. y Guevara Lozano R. C. Universidad de El Salvador. El Salvador.

Bosch Martí, A. (2011). Estudio de viabilidad de la instalación de una planta de metanización en un buque crucero. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona, España.

Brown, G. G., Shivers Foust, A., Schneidewind, R., Roy White, R., Platt Wood, W., Martin y Banchemo, J. T. (2006). Operaciones básicas de la Ingeniería Química. Editorial Marín. Barcelona, España.

Cabrera Bermúdez, X., Fleites Ramírez, M. y Contreras Moya, A. M. (2009). Estudio del proceso de coagulación-floculación de Aguas Residuales de la empresa textil "Desembarco del Granma" a escala de laboratorio. Tecnología Química. Recuperado <http://www.redalyc.org/pdf/4455/445543760009.pdf>

Canales García, M., Rivas Oliva, L. y Sorto Cruz, R. (2010). Estudio del proceso bioquímico de fermentación en digestores para la producción de biogás y biofertilizantes a partir de residuos orgánicos. Universidad de El Salvador. El Salvador.

Canto Ríos, J. D. (2013). Modelación hidráulica de un reactor de electrocoagulación. Jiutepec, Morelos. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA]. México.

Capullin, G., Nuñez, E., Etchevers, B. y Baca, C. (2001). Evaluación de extracto líquido de estiércol bovino como insumo de nutrición vegetal en hidroponía. Agrociencia. Colegio de Posgraduados. Texcoco, México.

Carbon Truct, Department for Environment Food and Rural Affairs [DEFRA] y British Standards Institution [BSI] (2008). Guide to PAS 2050. How to assess the carbon footprint of goods and services. BSI. U.K. Recuperado 30 de septiembre de 2017 de: [aggie-horticulture.tamu.edu/faculty/hall/.../PAS2050\\_Guide.pdf](http://aggie-horticulture.tamu.edu/faculty/hall/.../PAS2050_Guide.pdf)

Castellanos Vásconez, J. (2011). Caracterización y estudio del proceso de bio-digestión de excrementos de ganado bovino como alternativa para obtener biogás y abono en una hacienda de producción lechera de la Sierra Ecuatoriana. Universidad de Las Américas. Quito, Ecuador.

Castillo Uribe, V. (2013). Diseño y cálculo de un agitador de fluidos. Universidad del Bío Bío. Región del Bío Bío, Chile.

Cendales Ladino, E. (2011). Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable. Tesis de Posgrados. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, D. C. Colombia.

Cengel, Y. A. y Cimbala, J. M. (2006). Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones (1ra ed.). McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V. México, D.F.

Chen, L. y Neibling, H. (2014). Anaerobic Digestion Basics. Extension Waste Management Engineer, University of Idaho. Idaho, USA.

Comisión de Regulación de Energía y Gas [CREG] (2009). Propuesta de regulación aplicable al servicio público domiciliario de gas combustible con biogás. Colombia

Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2015). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología [CONACYT] (2009). NSO 13.49.01:09 Norma salvadoreña agua. Aguas residuales descargas a un cuerpo receptor. Diario oficial de El Salvador 11 de marzo del 2009.

Construcplan Consultora S.A. (2002). Tratamiento de lodos: Lecho de secado de lodos. Recuperado el 24 de Agosto de 2017, de Estructplan on line: <http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=1809>.

Coronel Toro, J. y Pérez-Lombard, L. (2016). Colección de Tablas, Grafica y Ecuaciones de Transmisión de Calor. Universidad de Sevilla. España.

Corporation of The City of Guelph. (2011). Introduction of wastewater treatment. CH2MHILL. Recuperado 20 mayo de 2017 de: <http://guelph.ca/wp-content/uploads/WastewaterTreatmentMasterPlan.pdf>.

Cortés, F. (2013). Manejo de residuos especiales. Universidad del Desarrollo. Región del Bío Bío, Chile. Recuperado 13 abril del 2017 de: <http://medicina.udd.cl/files/2013/07/Plan-de-Emergencia-Manejo-Residuos.pdf>

Cristancho Bello, A. J. y Noy Ortíz, A. M. (2016). Diseño conceptual de una planta de tratamiento de aguas residuales para Pelikan Colombia S.A.A. Fundación Universidad de América. Bogotá, Colombia.

Cunlata Moran, J. (2017). Diseño de un sistema de transporte de biogás para uso doméstico en la Hacienda San Francisco. Universidad de las Fuerzas Armadas Innovación para la Excelencia. Ecuador.

DeLaval. (2017). Consejos de ordeño, como convertir el estiércol de un coste en un activo. Recuperado 13 julio de 2017 de Manejo del estiércol: <http://www.delaval.es/-/Consejos-de-ordeno/Manure-handling/>

Demirel, B. y Yenigün, O. (2002). Two-phase anaerobic digestion processes. Journal of Chemical Technology y Biotechnology. Recuperado 5 junio de 2017 de: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jctb.630/abstract>

Díaz, M., Espitia, S., y Molina, F. (2002). Digestión anaeróbica. Una aproximación a la tecnología. Universidad Nacional de Colombia. Colombia.

Dietz, F., y Hoogervorst, N. (1991). Towards a sustainable and efficient use of manure in agriculture: The Dutch case. Environmental and Resource Economics. Kluwer Academic Publishers. Recuperado 12 julio de 2017 de: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00367923>

Drury, S. F. y Gates, L. E. (2001). Mixer Specification a la Spreadsheet. Chemical Engineering Process Design. Recuperado 12 mayo de 2017 de: <http://my.chemeng.queensu.ca/courses/integratedDesign/Resources/documents/CEPDtxtCh16.doc>

Eaton, A. D., Clesceri, L. S., y Greenberg, A. E. (2012). Standard Methods for the examination of water and wastewater. EPS Group, Inc., Hanover, Maryland. Washington, U.S.A.

Energía Solar en los Andes (2008). Biodigestores Familiares. Bolivia. Recuperado el 21 de junio de 2017, de: [http://wave.greenpeace.org/waveV2public/sites/default/files/attachments/9\\_manual\\_biodegistros.pdf](http://wave.greenpeace.org/waveV2public/sites/default/files/attachments/9_manual_biodegistros.pdf).

Environmental Protection Agency [EPA]. (2006). Global Anthropogenic Non-CO2 greenhouse gas emissions: 1190-2020. United States Environment Protection Agency. USA:

Escobedo de León, J. (2011). Biogás como combustible alternativo para una estufa y un motor de un cilindro ciclo Otto. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

Evans, G. y Furlong, J. (2003). Environmental Biotechnology, Theory and Application. John Wiley y Sons. San Francisco, U.S.A.

Figuroa Viramontes, U., Núñez Hernández, G., Delgado, J., Cueto Wong, J. y Flores Margez, J. (2009). Estimación de la producción de estiércol y de la excreción de nitrógeno, fósforo y potasio por bovino lechero en la comarca lagunera. Agricultura orgánica (2da ed). FAZ-UJED. Ciudad Juárez, México.

Foro centroamericano y República Dominicana de agua potable y saneamiento. (2014). Gestión de las Excretas y Aguas Residuales en Centroamérica y República Dominicana. Diagnóstico Regional. Cooperación Suiza en América Central. El Salvador.

Freese, S. D., Trollip, D. L. y Nozaic, D. J. (2003). Manual for testing of water and wastewater treatment chemicals. Recuperado 25 abril de 2017 de: <https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=568924c85e9d9774c58b4577yas&key=AS%3A313805307875329%401451828423792>

GAIKER, Centro Tecnológico. (2017). Coagulación - Floculación (JAR-TEST). Recuperado 17 septiembre de 2017 de: [http://www.gaiker.es/cas/coagulacion\\_floculacion\\_jar\\_test.aspx](http://www.gaiker.es/cas/coagulacion_floculacion_jar_test.aspx)

García Pejenautek, T. (2012). Estudio para la gestión de residuos ganaderos mediante digestión anaerobia en el polígono ganadero de Funes (Navarra) tesis de grado. Navarra. Universidad Pública de Navarra. España.

Garrido, R. (2014). Científicos quieren sacarle provecho al excremento de las vacas obteniendo agua limpia de él. Recuperado de XACATA Ciencia: <https://www.xatakaciencia.com/quimica/cientificos-quieren-sacarle-provecho-al-excremento-de-las-vacas-obteniendo-agua-limpia-de-el>.

Geankoplis, C. J. (2006). Procesos de transporte y Operaciones Unitarias (4ta ed.). Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V. Minnesota, U.S.A.

Gerber, P., Henderson, B. y Makkar, H. (2013). Mitigación de las emisiones de gases efecto invernadero en la producción ganadera. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. Roma, Italia.

Gobierno de Aragón. (2009). Plan de Gestión de los Residuos Ganaderos de la Comunidad Autónoma de Aragón. Departamento de Medio Ambiente. España.

Gobierno de Chile, Ministerio de energía [MINENERGIA], Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo [PNUD], Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], Global Environment Facility [GEF] (2001). Manual de biogás. Chile.

González Cabrera, A. (2014). Estudio técnico-económico para la producción de biogás a partir de residuos agrícolas mediante digestión anaerobia. Universidad de Sevilla. España.

Guanopatín Chicaiza, M. (2012). Aplicación de Biol en cultivo establecido en alfalfa. Universidad Técnica de Ambato. Ecuador.

Guardado Chacón, J. (2007). Manual de diseño y construcción de plantas de biogás sencillas. Editorial CUBASOLAR. Ciudad de la Habana, Cuba.

Guerra Millán, F. J., Struck Garza, A. y Villalobos Steta, S. A. (2008). Prueba de Coagulación - Floculación. Laboratorio de Ingeniería Ambiental. Universidad Iberoamericana. México D.F.

Guerra, R., González, S., Trupiano, A. y Figueroa, M. (2001). Perfiles de actividad metanogenica específica en un reactor UASB utilizado para el tratamiento de líquidos cloacales pre-sedimentados. Universidad Nacional de Salta. Argentina.

Guerrero Maxi, C., Inga Chacón, E. y Samaniego Calle, F. (2011). Optimización de un biodigestor en la depuración de agua residual con estiércol de ganado bovino. Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca, España.

Hammeken Arana, A. M., y Romero García, E. (2005). Análisis y diseño de una planta de tratamiento de agua residual para el municipio de San Andrés Cholula. Puebla, México.

Henze, M., Loosdrecht, M., Ekama, G. y Brdjanovic, D. (2008). Biological Wastewater Treatment. (1ra ed.). IWA publishing. Reino Unido.

Hernández Arizala, D. y Leal, P. (2009). Ingeniería básica para una planta de tratamiento de aguas residuales en cárnicos Rico Jamón. Fundación Universidad de América. Bogotá, Colombia.

Hernández González, F., Nolasco Tovar, E. y Salguero Sandoval, M. (2016). Determinación del índice da calidad del agua NSF y modelación del cromo Hexavalente en la parte alta del Río Suquiapa, Santa Ana, El Salvador. El Salvador.

Hernández H, A. (2007). Solidos suspendidos totales en agua secados a 103-105 °C. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Colombia.

Hidalgo Bonilla, J., Maravilla Carranza, V. y Ramírez Castro, W. (2010). Aprovechamiento energético del biogás en el salvador. Universidad José Simeón Cañas. El salvador.

Hidalgo, J. C. (2017). Diseño y dimensionamiento de un biodigestor de laguna cerrada. (Martínez Orellana T. M., y Guevara Lozano R. C., Entrevistadores).

Hilbert, J. (2003). Manual para la producción de biogás. Instituto de Ingeniería Rural [INTA]. Argentina.

Humenik, F. (2001). Lesson 25: Manure Treatment Options. North Carolina State University. North Carolina, U.S.A.

Hussain, A. y Kant Dubey, S. (2015). Specific methanogenic activity test for anaerobic degradation of influents. Applied Water Science. Recuperado 6 abril del 2017 de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13201-015-0305-z>

Ince, O., Kasapgil Ince, B. y Yenugun, O. (2001). Determination of potencial methane production capacity of a granular sludge from a pilot scale upflow anaerobic sludge blanket reactor using a specific methanogenic activity test. Istanbul. Journal of chemical Technology and Biotechnology. Turquía.

Instituto de toxicología de la defensa de España. (2016). Protocolo de toma de muestras de agua residual. España.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía [IDA]. (2007). Biomasa: Digestores Anaeróbicos. Departamento de Energía BESEL S.A. Madrid, España.

Instituto para una Alternativa Agraria [IAA]. (2008). Manual de instalación de un biodigestor familiar tipo manga para zonas alto-andinas. Universidad Politecnica de Cataluña. España.

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2013). Chapter 8: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. Climate Change The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University. U.S.A.

Iza Chiluiza, S. (2015). Sistema de conducción de biogás para generar energía eléctrica de biogás para la Hacienda San Francisco. Universidad de las Fuerzas Armadas Innovación para la Excelencia. Ecuador.

Kiely, G. (1999). Ingeniería ambiental: fundamentos, tecnologías y sistemas de gestión. MCGRAW-HILL/ Interamericana de España. España.

Kudela Henryk (2010). Hydraulic losses in pipe. Recuperado 29 septiembre de 2017 de: [http://fluid.itcmp.pwr.wroc.pl/~znmp/dydaktyka/fundam\\_FM/Lecture11\\_12.pdf](http://fluid.itcmp.pwr.wroc.pl/~znmp/dydaktyka/fundam_FM/Lecture11_12.pdf)

Lawrence, K. Wang, L., Ivanov, V., Tay, J.-h. y Hung, Y.-T. (2010). Environmental Biotechnology. Handbook of Environmental Engineering (vol 10). Humana Press. Human Press. New York, U.S.A.

Levenspiel O. (2004). Ingeniería de las Reacciones Químicas. (3ra ed.). Limusa Wiley. México.

Lizano, M., y Pérez, R. (2012). Sanidad e Inocuidad Pecuaria en Centroamérica y República Dominicana: Una agenda prioritaria de políticas e inversiones. Banco Interamericano de Desarrollo [BID] y Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria [OIRSA]. El Salvador.

Llaneza Herminio, M., González Azpíroz, L. y González, E. (2010). Caracterización, purificación y control de biogás. Desarrollo de un Sistema sostenible en la Producción y uso de Biogas Agroindustrial en España [PROBIOGAS]. España.

López I., Borzacconi L. (2009). Introducción al diseño de reactores. Facultad de Ingenierías. Universidad de la República de Uruguay. Montevideo, Uruguay.

Lorenzo Acosta, Y. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación - floculación. Instituto Cubano de investigación de los derivados de la caña de azúcar. Ciudad de La Habana, Cuba.

Lorenzo Acosta, Y. y Obaya Abreu, M. (2005). La digestión anaeróbica, Aspectos teóricos. Parte I. Instituto cubano de Investigación de los Derivados de la Caña de Azúcar. Ciudad de La Habana, Cuba.

Lorenzo Acosta, Y., Chafón Curbelo, J. M. y Pereda Reyes, I. (2013). Estudio de la digestión anaeróbica mediante el ensayo de actividad metanogénica empleando vinazas con diferentes contenidos de sulfatos. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar. Ciudad de La Habana, Cuba.

Loupasaki, E. y Diamadopoulos, E. (2013). Attached growth systems for wastewater treatment in small and rural communities: a review. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. DOI:10.1002/jctb.3967.

Lozada Torres, P. Y Pérez, A. (2010). Actividad Metanogénica Especifica; Una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaeróbico de aguas residuales. Universidad del Valle. Cali, Colombia.

Machado Borges, E., Martins Godinho, V., Oliveira Bejar, D. y De Lemos Chernicharo, C. (2009). Tratamento térmico de lodo anaeróbico com utilização do biogás gerado em reatores UASB: avaliação da autossustentabilidade do sistema e do efeito sobre a higienização e a desidratação do lodo. *Eng Sanit Ambient. Brasil*.

Maps, G. (2017). Google Maps. Recuperado 1 de mayo de 2017 de <https://www.google.es/maps/place/San+Luis+Talpa,+El+Salvador/@13.4710508,-89.0961086,15z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x8f7cb58c33d191fd:0xb81e50ec33b0a7c6!8m2!3d13.4697614!4d-89.0871808>

Marcos Hernández, A., Cuadros Blázquez, F., López Rodríguez, F., García Rodríguez, J., Martínez Salazar, E. y Moral García, F. J. (2001). Caracterización y depuración biológica anaerobia de efluentes de aguas residuales de matadero. Universidad de Extremadura, Departamento de Física, Bádajoz, España.

Marín Galvín, R. (2006). Características Físicas, Químicas y Biológicas de las aguas. Empresa Municipal de Aguas de Córdoba S.A [EMACSA]. Córdoba, España.

Marín Galvín, R. (2008). "Jar-test" en el tratamiento de aguas: Una valiosa herramienta. Empresa Municipal de Aguas de Córdoba S.A [EMACSA]. España.

Marks, R. (2001). "Cesspools of Shame: How Factory Farm Lagoons and Sprayfields Threaten Environmental and Public Health". The Natural Resources Defense Council and the Clean Water Network. Washington DC, U.S.A.

Martel Moreno, J. (2000). Fórmulas generales para la determinación de áreas y volúmenes. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. España.

Martí Herrero, J. (2008). Biodigestores Familiares guía de diseño y manual de instalación biodigestores de polietileno tubular de bajo costo para trópico, valle y altiplano. Corporación Técnica Alemana NTZ. Bolivia.

Martí Herrero, J., Chipana, M., Cuevas, C., Paco, G., Serrano, V., Zymla, B., Heising K., y Sologuren J., Gamarra A. (2014). Low cost tubular digesters as appropriate technology for widespread application: Results and lessons learned from Bolivia. Renewable Energy, ELSEVIER. Recuperado 01 de agosto de 2017 de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148114002973>.

Martí Herrero, J. y Cipriano J. (2012) Design methodology for low cost tubular. Bioresource Technology. Recuperado 05 de agosto de 2017: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852411018979>.

Martí Herrero. J. (2008). Biodigestores Familiares guía de diseño y manual de instalación biodigestores de polietileno tubular de bajo costo para trópico, valle y altiplano. Corporación Técnica Alemana NTZ. Bolivia.

Martínez, J. H. (2010). Propuesta para el Manejo sustentable de residuos sólidos de origen pecuario (excreta de bovino) mediante digester anaeróbico. Universidad Veracruzana. Xalapa, Mexico.

Mazzucchelli Jiménez, y Sánchez Peinado. (1999). Impactos ambientales de las explotaciones de ganado bovino lechero. Universidad de Complutense. Madrid, España.

Mazzucchelli, S. (2008). Impacto Ambiental de las explotaciones de bovino lechero. Ecuador.

McCabe, W. L., Smith, J. C. y Harriott, P. (2007). Operaciones Unitarias en Ingeniería Química (Séptima ed.). (R. Huerta Cevallos, ed.) McGrawHill. México.

McKinsey Zicari, S. (2003). Removal of hydrogen sulfide from biogas using cow-manure compost. Cornell University. U.S.A.

Medina Cardenas, J. y Mora Herrera, M. (2009). Evaluación del sistema de recolección de gas en el sector isla vi del campo cantagallo aplicando una software como herramienta para análisis. Universidad Industrial de Santander. Colombia.

Meler de Kreuk, N. y Yu Tao, H. (2012). CIE4485 Laboratory Experimente: SMA TEST. Delft University of Technology. Holanda.

Mendoza, F., Carval, J. y Saldarriaga, J. (2011). Determinación experimental del coeficiente de pérdidas menores (km) en accesorios de sistemas de distribución de agua potable de 2,2 1/2,3, 4,6 y 8 pulgada. Sociedad Colombiana de Ingenieros. Colombia.

Metcalf y Eddy. (1996). Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización. McGRAW-HILL México.

Metso ®. (2012). Bombas para lodos: aspectos básicos. (3º, Ed.) Sala, Suecia, Metso Minerals (Sweden) AB. Suecia.

Miner, J., Humenik, F. y Overchash, M. (2000). Managing Livestock Wastes to Preserve Environmental Quality. Environmental Quality. Iowa State Univertisy Press Ames. U.S.A.

Ming, T. T., Kim Tak , H. y Lee Myun, J. (2007). Characterizacion of livestock wastewater at varius stages of wastewater treatment plant. The Malaysian Journal of Analytical Sciencies. Korea.

Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente. (2015). Evaluación de técnicas de gestión de deyecciones en ganadería. Sectores de bovino, porcino, avicultura de carne y puesta. Secretaría General Técnica. Madrid, España.

Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (2009). IV Censo agropecuario 2007-2008. El Salvador.

Ministerio de Agronomía y Ganadería [MAG]. (2003). Diagnóstico de los recursos Zootecnicos en El Salvador. San Salvador, El Salvador.

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales [MARN] (2012) Anteproyecto de Ley General de Agua. El Salvador.

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales [MARN] (2013). 2ª Comunicación Nacional sobre Cambio Climático. El Salvador.

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales [MARN] (2016). Propuesta de ley General de Gestión Integral de Residuos de El Salvador. El Salvador.

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales [MARN]. (2013). 2a Comunicación Nacional sobre Cambio Climático. El Salvador.

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales [MARN]. Decreto No 39. Reglamento Especial de Aguas Residuales. Diario oficial de El Salvador 7 junio del 2000.

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales [MARN]. Decreto No 50. Reglamento Sobre la Calidad del Agua, el Control de Vertidos y las Zonas de Protección. Diario oficial de el salvador 23 de marzo de 1982.

Mora Castillo, A. (2014). Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales descargadas al río Coca procedente de un establo de ganado bovino aplicado en la finca los Picolines de la Parroquia San José de Guayusa en la providencia de Orellana. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Ecuador.

Moreno, J. M. (2000). Fórmulas generales para la determinación de áreas y volúmenes. Las Palmas, España., Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. España.

Motavalli, J. (2002). "The Case Against Meat: Evidence Shows that Our Meat-Based Diet is Bad for the Environment, Aggravates Global Hunger, Brutalizes Animals and Compromises Our Health". Recuperado el 08 de septiembre de 2017 de: <http://www.creationsmagazine.com/articles/C84/Motavalli.html>

Mott, R. L. (2006). Mecánica de fluidos (SEXTA ed.). (D. Yarnell, Ed.) PEARSON EDUCACIÓN. México.

Narayanan, K. (2015). Safety, Health and Environment Handbook. Mc Graw Hill. India.

National Resources Defense Council, (2005). "Pollution from Giant Livestock Farms Threatens Public Health.". Recuperado de Food. Livestocke production: <http://www.nrdc.org/water/pollution/nspills.asp>.

Navajas, M. Todo lo que se puede hacer con los excrementos de una vaca. Reuperado wl 23 de julio de 2011, de El mundo (C. Valenciana): <http://www.elmundo.es/elmundo/2011/07/22/valencia/1311320204.html>

Nidal Mahmoud, Grietje Zeeman y B. van Lier. (2008). Anaerobic Wastewater Treatment. IWA Publising. London, UK.

Olaya Arboleda, Y. y Gonzáles Salcedo, L. (2009). Fundamentos para el diseño de biodigestores. Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, Palmira, Colombia.

Oliva Enríquez, E., Flores Margez, J., Serrano Alamillo, M., Soto Mejía, E., Iglesias Olivas, J., Salazar Sosa, E. (2011). Indicadores fecales y patógenos en agua descargada a río Bravo. Sociedad Mexicana, México.

Optimización de procesos y tecnología S.A.S. (2017). Placas deflectoras - Bafles antivórtice. Recuperado el 13 de Agosto de 2017, de Equipos para la agitación, dosificación y trasvase de fluidos.: <http://equipos.opt-ing.com/el-mundo-de-la-agitaci%C3%B3n/66-placas-deflectoras>

Ortega Quintanilla, G. S. (2014). Instructivo de medición de caudal. Laboratorio de Calidad Ambiental. Perú.

Ortega, M. (2009). Installation of a Low Cost Polyethylene. Inter-American Institute for Cooperation on Agriculture (IICA). Belize.

Ortiz Jordá, V. (2011). Puesta a punto de una metodología para la determinación de la Actividad Metanogénica Especifica (AME) de un fango anaeróbico mediante el sistema Oxitop. Influencia de las principales variables experimentales. Universidad Politécnica de Valencia. España.

Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Irving, W., y Krug, T. (2006). Intergovernmental Panel of Change Climate [IPCC] guidelines for national greenhouse gas inventories. Recuperado el 16 de septiembre de 2017 de: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/index.html>.

Pérez Medel, J. (2010). Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros. Universidad de Chile. Chile.

Pérez y Lizano. (2012). Sanidad e Inocuidad Pecunaria en Centroamérica y República Dominicana. Consejo Agropecuario Centroamericano (CAC). El Salvador.

Pérez, R. M. (2005). Manual de prácticas de laboratorio de hidráulica. Medellín, Colombia.

Peter, G. (2005). a Dummy's guide to coagulants. Schweppes Centre, Australia.

Pezo Valles, A., Velásquez Piñas, J., Acosta Bedoya, F., y Veen, M. (2011). Diseño del sistema de generación de energía eléctrica en la comunidad de Santa Rosillo, a partir de la producción local de biogás. SNV Servicio Holandés de Cooperación al Desarrollo, en alianza con Soluciones Prácticas. San Martín Prácticas, Perú.

Pierre J., G., Henderson, B. y P. S. Makkar, H. (2013). Mitigación de las emisiones de gases efecto invernadero en la producción ganadera. Organización de las Naciones unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). U.S.A.

Pineda Castro, C. (2011). Evaluación de diagramas de flujo de sistemas de tratamiento de deyecciones ganaderas que incluyan codigestión anaeróbica. Barcelona, España: Universidad Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona.

Pinos Rodríguez, J., García López, J., Peña Avelino, L., Rendón Huerta, J., Gonzáles Gonzáles, C. y Tristán Patiño, F. (2012). Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América. Texcoco, Agrociencia. México.

Plan Hidrológico Nacional [PLANHIDRO] (2004). Norma para regular calidad de aguas residuales de tipo especial descargada al alcantarillado sanitario. El Salvador.

Pozuelo Campos, E., Magr Aloy, A., Illa Alibs, J., Sol Mauri, F. y Flotats Ripoll, X. (2004). Guia de los tratamientos de las deyecciones ganaderas. Lleida, Cente UdL-IRTA. España.

Puncernau y Asociados, SL. (2015). Atex® explosiones y seguridad. Recuperado el 16 de septiembre de 2017 de: [http://puncernau.net/img/pdf/A10\\_presentacion\\_2015\\_03\\_06\\_1.pdf](http://puncernau.net/img/pdf/A10_presentacion_2015_03_06_1.pdf)

Reátegui Ordoñez, J. (2015). Estimación de las emisiones de metano producidas por la gestión del estiércol proveniente de sistemas de producción de bovinos de leche. Irrigación majes, Arequipa. Universidad Católica de Santa María. Perú.

Redel, L. I. (2014). BioDigestor. Recuperado de Historia de los biodigestores. Recuperado el 03 se junio de 2017 de: <http://infodigestor.blogspot.com/2014/06/historia-de-los-biodigestores.html>.

Rodríguez, C. (2002). Residuos ganaderos. Curso de introducción a la producción animal. Córdoba, Argentina.

Rojas Bustamante, O. (2006). Manual básico para medir caudales. Quito, Ecuador.

Romero Rojas, J. A. (2006). Acuapurificacin. Diseño de sistemas de purificación de agua Escuela colombiana de Ingeniería. Bogotá, Colombia.

Romero Rojas, J. A. (2008). Tratamiento de aguas residuales - teoría y principios de diseño. Bogotá DC, Colombia.

Ros Moreno, A. (2011). El Agua. Tratamientos. Recuperado el 2017, de Capítulo 8 "Procesos químicos. Precipitación, coagulación y floculación": <http://www.mailxmail.com/curso-agua-tratamientos-1-2/procesos-quimicos-precipitacion-coagulacion-floculacion>.

Ruiz, I., lvarez, J. y Soto, M. (2002). El potencial de la digestión anaerobia en el tratamiento de aguas residuales urbanas y efluentes de baja carga orgánica. Universidad de Coruña. España.

SAGARPA y FIRCO. (2013). Curso fortalecimiento institucional: Sistemas de biodigestión. México.

Salamanca Tamayo, J. (2009). Diseño, construcción y Puesta en marcha de un biodigestor a escala piloto para la generación de biogás y fertilizante orgánico. Universidad San Francisco de Quito. Ecuador.

Santillán Saynes, Etchevers Barra, Paz Pellat y Alvarado Cádernas.(2016). Emisiones de gases efecto invernadero en sistemas agrícolas de México. México.

Skraag, A. (2002). Biotecnología para ingenieros: sistemas biológicos en procesos tecnológicos. Limusa Noruega Editores. Noruega.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SAGARPA] (2010). Especificaciones Técnicas para el Diseño y Construcción de Biodigestores en México. México.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación [SAGARPA] y el Fideicomiso de Riesgo Compartido [FIRCO], (2010). Especificaciones Técnicas para el Diseño y Construcción de Biodigestores en México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.

Serrano Sánchez, R., Ortiz Arellano, A., Dimas López, J. y Berúmen Padilla, S. (2002). Aplicación de lavado y estiércol para recuperar suelos salinos en la Comarca Lagunera, México. Leaching and Manure Treatments to Reclaim Salty Soils in Comarca Lagunera, México.

Severiche Sierra, C. A., Castillo Bertel, C. E., y Acevedo Barrios, R. L. (2013). Manual de métodos analíticos para la determinación de parámetros fisicoquímicos en aguas. Cartagena de Indias, Colombia.

Sluiter, A., Hames, B., Payne, C., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J. y Templeton, D. (2008). Determination of Total Solids in Biomass and Total Dissolved solids in liquid process samples. National Renewable Energy Laboratory. U.S.A.

Sosa, A., Galindo, J. y Bocourt, R. (2007). Metanogénesis rumial; aspectos generales y manipulación para su control. Revista Cubana de Ciencias Agrícolas. La Habana, Cuba.

STANDARDS NEW ZEALAND. (2013). AS/NZS 5601.1:2013 Gas Installations. Committee AG-006. Nueva Zelanda.

Suntásig Chuqitarco, H. (2010). Diseño de un biodigestor para el aprovechamiento energético de la excreta generada por los animales de cría (ovinos, porcinos y bovino) en la finca de autoconsumo del instituto preuniversitario vocacional de ciencias exactas "FEDERICO ENGELS". Universidad Técnica de Cotopaxi. Ecuador.

Superintendencia de Servicios Sanitarios. (2010). Manual Operativo de la Norma de muestreo de Aguas Residuales. Chile.

Tamayo Salamanca, J. (2009). Diseño, Construcción y Puesta en Marcha de un Biodigestor Escala Piloto para la Generación de Biogás y Fertilizante Orgánico. Universidad San Francisco de Quito. Ecuador.

Tapia Tapia, V. (2016). Instalación y uso de biogás, Ganadería puneña, generando energía limpia "biogás" para calefacción y cocina familiar. Care. Perú.

Tapia, M. E. y Fries, A. M. (1995). Guía de campo de los cultivos andinos. En FAO. Perú.

Teo Ming, T., Tak Hyun, K. y Myun Joo, L. (2007). Charecterization of livestock wastewater at various stage of wastewater treatment plant. Malaysian Journal of Analytical Sciences. Malasia.

The German Solar Energy Society (CGS). (2005). Planning and Installing Bioenergy Systems. James y James. London, U.K.

The Pew Charitable Trusts (2008). "Putting Meat on the table: Industrial Farm Animal Production in America. Recuperado el 21 de marzo de 2017, de The Pew Charitable Trusts:

<http://www.pewtrusts.org/~media/legacy/uploadedfiles/peg/publications/report/pcfifapfinalpdf.pdf>.

Torra, A., Valero, F., Bisbal, J. L. y Tous, J. F. (2000). Policloruro de Aluminio en el proceso de potabilización de aguas superficiales. Paper, Tecnología del Agua, Barcelona.

Torres Lozada, P. y Pérez, A. (2010). Actividad metanogénica específica: una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaeróbico de aguas residuales. Universidad del Valle. Cali, Colombia.

Toscano Sanguil, T. C. (2016). Diseño de un biodigestor anaeróbico para la obtención de biogás, a partir de las excretas de ganado bovino en el rancho Guadalupe, en el cantón Mocha Provincia de Tungurahua en el año 2015. Riobamba, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Ecuador.

Twang, J., Song, J., Lu, J. y Zhao, X. (2014). Comparison of Three Aluminum Coagulantes for Phosphorus Removal. Scientific Research Publishing Inc. Beijing, China.

U.S Agency Protection Enviromental. (1972). Aerobic treatment of livestock wastes. Chicago: University of Illinois, U.S.A.

U.S. Environmental Protection Agency. (2001). "Notes from Underground". U.S.A.

Underwood, A. L. Day. (1986). Quantitive Analysis. (5ta ed.). Hardcover. México.

Universidad de El Salvador Facultad de Ciencias Agronómicas. (s.f.). Recuperado el 21 de Febrero de 2017, de: <http://www.agronomia.ues.edu.sv/>.

Valencia López, A. E. (2013). Diseño de un sistema de tratamiento para las aguas residuales de la cabecera parroquial de San Luis - Provincia de Chimborazo. Riobamba, Ecuador.

Valerio García, M. (2010). Diseño y evaluación de un sistema para la purificacion del metano producido mediante biodigestión en el ITCR. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

Verma, S. (2002). Anaerobic Digestion of Biodegradable organics in municipal solid wastes. New York, Foundation School of Engineering y Applied Science, Columbia University. USA.

Villavicencio P., A. y Villablanca F., A. (2010). Métodos de Aforo de Caudal. INIA-URURI. Chile.

Weihs, J. P. (2011). Conceptos Básicos sobre Biogás. Asociación para el Estudio de los Residuos Sólidos. (ARS). Buenos Aires, Argentina.

Wilhelm Máximo (2013). Métodos Estándar para el Examen del Agua y Aguas Residuales. Edición 22th. U.S.A.

Yonge, D. (2012). A comparison Of Aluminum And Iron-based Coagulants For Treatment Of Surface Water In Sarasota County, Florida. University of Central Florida. U.S.A.

Zand Daryabeigi, A. y Hoveidi, H. (2015). Comparing Aluminium Sulfate and Poly-Aluminium Chloride (PAC) Performance in Turbidity Removal from Synthetic Water. Journal of Applied Biotechnology Reports. Irán.

Zane Satterfield, P. E. (2005). Tech Brief, Jarr Testing. The National Environmental Services Center. Virginia del Oeste, U.S.A.

Zhu, J. (2008). Aerobic Treatment. Extension Engineer. University of Minnesota Extension. U.S.A.

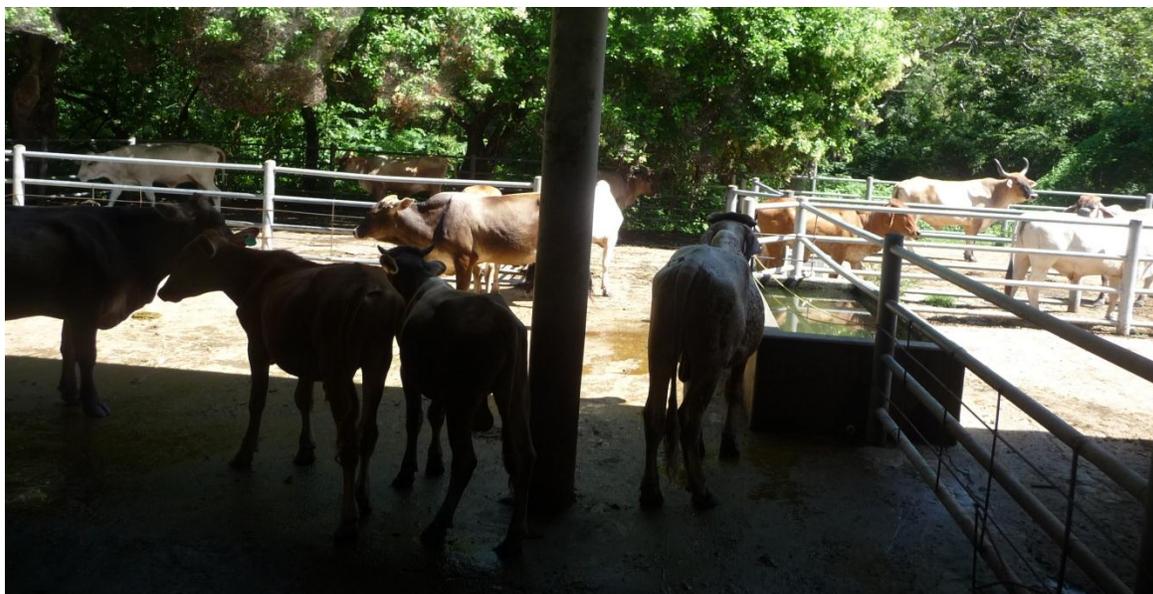
Zouboulis, A., Traskas, G. y Samaras, P. (2008). Comparison of efficiency between Poly-aluminium Chloride and Aluminium Sulphate coagulants during Full-scale experiments in a drinking water treatment Plant. Taylor y Francis. Recuperado el 23 de julio de 2017 de: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01496390801940903>.

# ANEXOS

**ANEXO A1: PLANO VISTA SUPERIOR DEL ESTABLO DE GANADO BOVINO**



## ANEXO A2: ACTIVIDADES REALIZADAS EN EL ESTABLO



*Figura A2.1: Ganado dentro del establo*



*Figura A2.2: Traslado de ganado por las mañanas*



*Figura A2.3: Actividad de ordeño*



*Figura A2.4: Preparación de alimento*



*Figura A2.5: Limpieza de establo*



*Figura A2.6: Deyecciones del ganado*



*Figura A2.7: Vista de canal de descarga*

**ANEXO A3: ESTIMACIÓN DE LA CANTIDAD DE EXCRETAS PRODUCIDAS EN EL ESTABLO DE GANADO BOVINO**



*Figura A3.1: Recogida de estiércol con pala*



*Figura A3.2: Transporte con carreta de estiércol*



*Figura A3. 3: Pesado de estiércol*



*Figura A3.4: Costales de estiércol previo a ser pesados*

## ANEXO A4: MUESTREO



*Figura A4.1: Medición de canaleta de descarga*



*Figura A4.2: vista de punto de descarga*



*Figura A4.3: Recolección de muestra*



*Figura A4.4: Preparación de muestra compuesta*

## ANEXO A5: ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS PARA AGUA CRUDA

### REPORTE DE ANALISIS

DETERMINACION FISICOQUIMICA	RESULTADO	NORMA PARA AGUAS RESIDUALES NSO 13.49.01:09**	METODO***	DICTAMEN
Demanda Química de Oxígeno (DQO)* mg/l	9,620	800	Standard Methods, APHA AWWA WEF Ed 22 2012. 5220 - D Metodo colorimetrico, reflujo cerrado	RECHAZADO
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)* mg/l	8,000	300	Standard Methods, APHA AWWA WEF Ed 22 2012. 5210 -B Metodo Titulometrico de 5 días	RECHAZADO
Sólidos Sedimentables* ml/l	240	15	Standard Methods, APHA AWWA WEF Ed 222012. 2540.F- Método Volumétrico	RECHAZADO
Sólidos Suspendedos Totales*mg/l	7,800	150	Standard Methods, APHA AWWA WEF, 22 Ed 2012.2540D Metodo Gravimetrico	RECHAZADO
Aceites y Grasas* mg/l	90	50	Standard Methods, APHA AWWA WEF Ed 22 2012. 5520D- Método de Extracción Soxhlet	RECHAZADO
Coliformes Totales* NMP/100 ml	24,000	10,000	Standard Methods, APHA AWWA WEF Ed 22 2012. 9221B-Tecnica de fermentación en tubo múltiples	RECHAZADO
pH* (Medido en laboratorio)	8.41	5.5 a 9.0 <sup>2)****</sup>	Standard Methods, APHA AWWA WEF 21Ed 2005. 4500 H+B Valor de pH Método Electrométrico.	ACEPTADO
Temperatura* °C (Medido en laboratorio)	30.2	20-35°C <sup>3)*****</sup>	Standard Methods, APHA AWWA WEF 21Ed 2005. 2550 Medición de temperatura, termómetro de sonda	ACEPTADO

\*Análisis Acreditado por OSA (Organismos Salvadoreño de Acreditación)

\*\*Norma Salvadoreña Obligatoria. Aguas Residuales. Tabla 2, Valores máximos permisibles de parámetros para verter aguas residuales de tipo especial al cuerpo receptor por tipo de actividad. Numeral I Animales vivos y productos del Reino Animal: Sección 1: Producción Agropecuaria. Tabla 3. Parametros complementarios sobre valores permisibles para aguas residuales descargadas a un cuerpo receptor.

\*\*\*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

\*\*\*\*2) El valor de pH 5.5-9.0 aplica para descargas en aguas limnias.

\*\*\*\*\*3) En todo caso la temperatura del H<sub>2</sub>O de descarga al cuerpo receptor no podrá alterar  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ , con respecto a la temperatura natural del cuerpo Hídrico receptor.

mg/l: Miligramo por litro ml/l: Mililitro por litro NMP: Numero más probable °C: Grados Celsius o Centígrados

**CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA:** Muestra de aspecto traslúcido, color amarillo claro, olor no perceptible y sin sedimentos. Recibida en frasco de vidrio ámbar, frasco de vidrio transparente y frasco de vidrio estéril.

**OBSERVACIÓN:** Los resultados de pH y temperatura cumplen con lo establecido por la norma de referencia. Los demás resultados no cumplen con lo establecido por la norma de referencia.

**Su muestra se conservará por 24 horas después de la recepción del presente informe, para atender cualquier necesidad adicional.**

Los resultados del presente reporte corresponden en procedencia y código a la muestra indicada.

Por políticas de confidencialidad y derechos de autor, la reproducción total de este reporte debe ser autorizada por el cliente; el Centro de Control de Calidad Industrial no autoriza la copia parcial del reporte.

Atentamente,

### CENTRO DE CONTROL DE CALIDAD INDUSTRIAL S.A DE C.V - CCCI

*Sulma Yanira Reyes de Serpas*  
Dra. Sulma Yanira Reyes de Serpas  
Directora Ejecutiva

El CCCI trabaja con un sistema de Calidad Implementado bajo la Norma NTS ISO /IEC 17025:2005 como parte de la garantía de la calidad de nuestros procesos dirigida a nuestros clientes.



ANALIZANDO Y ASESORANDO PARA UNA COMPETITIVIDAD SOSTENIBLE

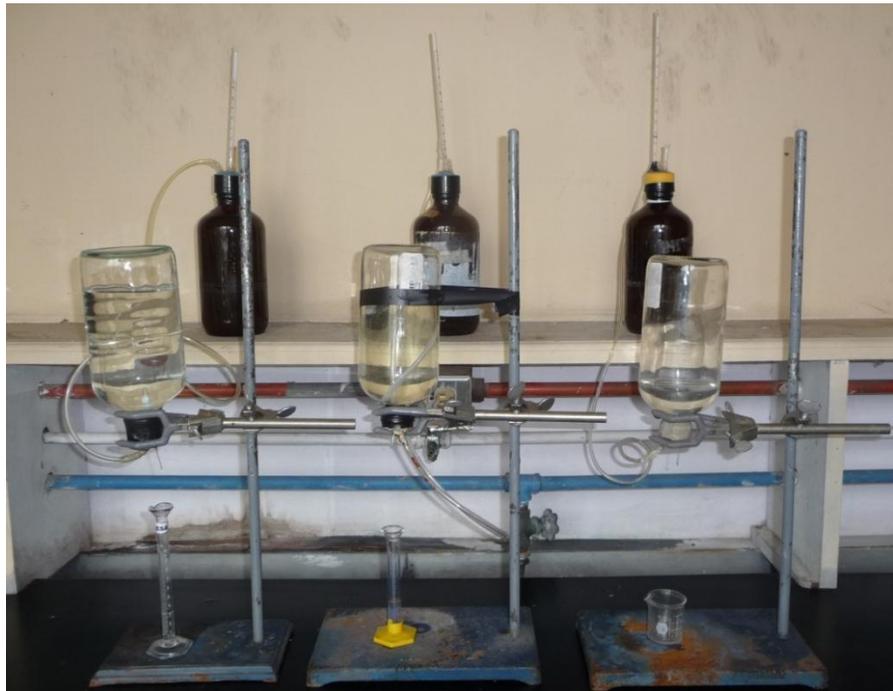
**CENTRO DE CONTROL DE CALIDAD INDUSTRIAL**

**OSA**  
ENSAYOS  
LEA-15:07  
\*Pruebas Acreditadas Bajo Norma ISO 17025:2005 en el Ambito del Alcance

Calle San Antonio Abad, Urbanización Lisboa #35,  
San Salvador, El Salvador, C.A.  
Teléfonos: (503) 2284-0888, (503) 2284-0223, Telefax:(503) 2284-5933  
E-mail: ccci@navegante.com.sv, laboratorio@ccci.com.sv  
Pagina Web: ccci.com.sv

Página 1 de 1

## ANEXO A6: MONTAJE DEL SISTEMA DEL TEST DE ACTIVIDAD METANOGÉNICA



*Figura A6.1: Configuración del sistema de Test de Actividad Metanogénica*



*Figura A6.2: Configuración de montaje del recipiente con solución de NaOH*

## ANEXO A7: PREPARACIÓN DE SOLUCIÓN TAMPÓN, TEST DE ACTIVIDAD METANOGENICA.

Para la preparación de 250 mL de una solución tampón de fosfatos de sodio, se necesita como reactivos:

- Fosfato monosódico ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ )
- Fosfato di sódico ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ )
- Agua destilada

Basándose en la ecuación de Henderson-Hasselbalch (ecuación A7.1), la cual permite calcular el pH de una mezcla amortiguadora conociendo su composición.

$$pH = pka + \log \frac{[\text{NaHPO}_4]}{[\text{NaH}_2\text{PO}_4]}$$

*Ecuación A7. 1*

Siendo el pka del fosfato 6.86 según Beltrán, Castellanos, Guevara y Lombana (2010).

Adaptando la ecuación de Henderson-Hasselbach:

$$pH = pKa + \log \frac{[A^-]}{[HA]}$$

Donde: HA = Ácido = ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ) y A<sup>-</sup> = Sal = ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ )

Debido a que las bacterias metanogénicas trabajan en un rango de pH de entre 6.8 a 7.4, se preparará una solución buffer cuyo pH sea igual a 7.3. Este valor de pH es el recomendado según bibliografía.

Según Day R. A. & Underwood A. L. en su Tabla A-1: "Constantes de disociación de ácidos y bases débiles", El valor de Ka del  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$  es  $6.2 \times 10^{-8}$

Se fija el valor de la concentración de una de las dos soluciones y se procede a calcular la concentración de la otra. En nuestro caso, se fijó una concentración de 0.2 M de  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ . Entonces, las masas a pesar de cada uno de los reactivos son:

Cálculos para la preparación de una solución 0.2 M de  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$

$$\text{Molaridad} = \frac{\text{moles}}{\text{Litro}} = \frac{\text{masa} / \text{Peso Molecular}}{\text{Litro}}$$

Ecuación A7. 2

Para preparar 250 mL de la solución buffer al 0.2 M:

$$0.2 \text{ M} = \frac{\text{masa} / 119.977 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{0.25 \text{ L}}$$

$$\text{masa}_{\text{Na}_2\text{HPO}_4} = 0.2 \text{ M} \times 0.25 \text{ L} \times 119.977 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$\text{masa}_{\text{Na}_2\text{HPO}_4} = 5.99885 \text{ gramos}$$

Cálculos para la preparación de la solución de  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$

$$\text{pH} = \text{pKa} + \log \frac{[\text{A}^-]}{[\text{HA}]}$$

Ecuación A7. 3

$$7.3 = (-\log(6.2 \times 10^{-8})) + \log \frac{[\text{A}^-]}{[0.2 \text{ M}]}$$

Despejando  $[\text{A}^-]$ :

$$7.3 - (-\log(6.2 \times 10^{-8})) = \log \frac{[\text{A}^-]}{[0.2 \text{ M}]}$$

$$10^{7.3 - (-\log(6.2 \times 10^{-8}))} = \frac{[\text{A}^-]}{[0.2 \text{ M}]}$$

$$[0.2 \text{ M}] \times 10^{7.3 - (-\log(6.2 \times 10^{-8}))} = [\text{A}^-] = 0.247413 \text{ M} = \frac{\text{masa}}{\text{Peso Molecular}} \frac{\text{Litros}}{\text{Litros}}$$

Como  $\text{A}^- = \text{Sal} = (\text{Na}_2\text{HPO}_4) \rightarrow$  Peso Molecular: 141.959 g/mol

$$0.247413 \text{ M} = \frac{\frac{\textit{masa}}{141.959 \frac{\textit{g}}{\textit{mol}}}}{0.25 \text{ L}}$$

$$0.247413 \text{ M} \times 141.959 \frac{\textit{g}}{\textit{mol}} \times 0.25 \text{ L} = \textit{masa}_{\text{Na}_2\text{HPO}_4}$$

$$\textit{masa}_{\text{Na}_2\text{HPO}_4} = 8.78061 \textit{ gramos}$$

## ANEXO A8: DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS VOLÁTILES INICIALES

Los sólidos volátiles son un parámetro importante a la entrada del biodigestor pues la disminución de estos y del valor de la DQO, conforman el mejor aproximado de la eficiencia real del biodigestor. El procedimiento seguido para la determinación de éstos, fue extraída de “Métodos Estándar para la Evaluación de Aguas y Aguas Residuales, (2013). Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla A8. 1: Determinación de las masas crisol + 40 mL de muestra

<b>Peso</b>	<b>Crisol</b>	<b>Crisol+ Muestra</b>
<b>M1</b>	58.331	98.438
<b>M2</b>	78.329	117.950
<b>M3</b>	46.509	86.088
<b>M4</b>	70.052	109.791

*Fuente: Elaboración propia*

Donde:

M1, M2, M3 y M4 representan el número de la muestra analizada

En la tabla A8.2 se muestran los datos de las masas de las muestras + crisoles luego de la evaporación total del agua en estas:

Tabla A8. 2: Masa de muestra + crisoles, posterior a la evaporación total del agua

<b>Peso</b>	<b>Muestra</b>
<b>M1</b>	58.741
<b>M2</b>	78.758
<b>M3</b>	47.099
<b>M4</b>	70.464

*Fuente: Elaboración propia*

A continuación, se procede a calcular la cantidad de sólidos totales en cada muestra, por medio de la ecuación A8.1 para luego obtener el promedio de estos valores (Ecuación A8.2):

$$ST = \frac{\text{Peso}_{110^{\circ}\text{C}} - \text{Peso}_{\text{crisol}}}{\text{Volumen}_{\text{muestra}}}$$

Ecuación A8. 1

Donde:

ST = Cantidad de Sólidos Totales expresada en gramos de Sólidos Totales por litro de muestra analizada (g ST/L)

Peso<sub>110°C</sub> = Es la masa del crisol + muestra luego de hacerlos pasar por el horno a 110°C (g).

Peso<sub>crisol</sub> = Es la masa del crisol (g).

Volumen<sub>Muestra</sub> = Es el volumen de muestra colocado y pesado en cada crisol (mL).

$$ST_{\text{muestra } 1} = \frac{58.741g - 58.331g}{40 \text{ ml}} = 0.01025 \frac{g}{\text{ml}} \times \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ lt}} = 10.25 \frac{gST}{L}$$

$$ST_{\text{muestra } 2} = \frac{78.758g - 78.329g}{40 \text{ ml}} = 0.010725 \frac{g}{\text{ml}} \times \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ lt}} = 10.72 \frac{gST}{L}$$

$$ST_{\text{muestra } 3} = \frac{47.099g - 46.509g}{40 \text{ ml}} = 0.01475 \frac{g}{\text{ml}} \times \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ lt}} = 14.75 \frac{gST}{L}$$

$$ST_{\text{muestra } 4} = \frac{70.464g - 70.052g}{40 \text{ ml}} = 0.0103 \frac{g}{\text{ml}} \times \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ lt}} = 10.30 \frac{gST}{L}$$

Calculando el valor promedio de los resultados:

$$ST_{\text{prom}} = \frac{ST_{\text{muestra } 1} + ST_{\text{muestra } 2} + ST_{\text{muestra } 3} + ST_{\text{muestra } 4}}{4}$$

Ecuación A8. 2

$$ST_{prom} = 10.25 \frac{gST}{L} + 10.72 \frac{gST}{L} + 14.75 \frac{gST}{L} + 10.30 \frac{gST}{L}$$

$$ST_{prom} = 11.51 \frac{gST}{L}$$

En la tabla A8.3 se presentan los valores resultantes, luego de medir la masa de cada muestra, después de ser calcinada a 550°C:

Tabla A8. 3: Determinación de masa posterior a los 550 °C

Peso	Muestra
M1	58.472
M2	78.467
M3	46.625
M4	70.212

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se procede a calcular la cantidad de sólidos volátiles totales en cada muestra, por medio de la ecuación A8.3 para luego obtener el promedio de estos valores (Ecuación A8.4):

$$SVT = \frac{Peso_{110^{\circ}C} - Peso_{500^{\circ}C}}{Volumen_{muestra}}$$

Ecuación A8. 3

Donde:

SVT = Cantidad de Sólidos Volátiles Totales expresada en gramos de Sólidos Volátiles Totales por litro de muestra analizada (g SVT/L)

Peso<sub>110°C</sub> = Es la masa del crisol + muestra luego de hacerlos pasar por el horno a 110°C (g).

Peso<sub>550°C</sub> = Es la masa del crisol + muestra luego de hacerlos pasar por el horno - mufla a 550°C (g).

Volumen<sub>Muestra</sub> = Es el volumen de muestra colocado y pesado en cada crisol (mL).

$$SVT_{muestra\ 1} = \frac{58.7141g - 58.472g}{40\ ml} = 0.00605 \frac{g}{ml} \times \frac{1000\ ml}{1\ L} = 6.05 \frac{gSVT}{L}$$

$$SVT_{muestra\ 2} = \frac{78.758g - 78.467g}{40\ ml} = 0.007275 \frac{g}{ml} \times \frac{1000\ ml}{1\ L} = 7.27 \frac{gSVT}{L}$$

$$SVT_{muestra\ 3} = \frac{47.099g - 46.625g}{40\ ml} = 0.011850 \frac{g}{ml} \times \frac{1000\ ml}{1\ L} = 11.85 \frac{gSVT}{L}$$

$$SVT_{muestra\ 4} = \frac{70.464g - 70.212g}{40\ ml} = 0.006300 \frac{g}{ml} \times \frac{1000\ ml}{1\ L} = 6.30 \frac{gSVT}{L}$$

Calculando el valor promedio de los resultados:

$$SVT_{prom} = \frac{SVT_{muestra\ 1} + SVT_{muestra\ 2} + SVT_{muestra\ 3} + SVT_{muestra\ 4}}{4}$$

Ecuación A8. 4

$$SVT_{prom} = \frac{6.05 \frac{gSVT}{L} + 7.27 \frac{gSVT}{L} + 11.85 \frac{gSVT}{L} + 6.30 \frac{gSVT}{L}}{4}$$

$$SVT_{prom} = 7.87 \frac{gSVT}{L}$$

## ANEXO A9: VOLUMEN DESPLAZADO EN TEST DE ACTIVIDAD METANOGÉNICA

Tabla A9.1: Resultados de monitoreo del volumen desplazado de solución al 50% de NaOH

<b>Tiempo (horas)</b>	<b>Volumen desplazado (mL)</b>
21.43	2.4
22.43	3.2
23.26	3.4
24.43	3.4
47.78	5.9
48.67	6.1
49.77	6.2
71.43	9.6
77.48	9.9
100.00	14
131.22	21.8
141.13	26.3
167.63	31.3
188.47	35.2
214.27	39.2
233.95	43.9
255.60	47.9
280.62	52.1
304.75	58.6
328.53	62.8
340.58	69.1
359.00	75.8
372.50	76.5
390.00	89.3
417.00	96.4
440.00	110.7
500.00	128.2
<b>528.67</b>	<b>139.8</b>
586.56	142.3
624.88	143.1

Fuente: Elaboración propia a partir de mediciones

Tabla A9.2: Resultados de monitoreo del volumen desplazado de la solución al 25%

<b>Tiempo (horas)</b>	<b>Volumen desplazado (mL)</b>
21.33	1.5
48.58	4.5
73.17	6.3
100.00	8.1
131.25	9.7
141.13	11.5
167.63	13.5
188.47	17.1
214.27	18.4
233.95	21.1
255.57	22.4
280.62	23.8
304.75	27.2
328.53	29.5
355.33	32
363.80	35
387.80	37.2
399.70	39.5
447.75	42.3
500.33	44.8
515.67	45.4
525.80	46.1
597.33	47.2

Fuente: Elaboración propia a partir de mediciones

## ANEXO A10: DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS VOLÁTILES AL FINALIZAR TEST DE ACTIVIDAD METANOGÉNICA

Para poder comparar la eficiencia de la digestión anaeróbica, es necesario evaluar varios parámetros; uno de ellos, es la cantidad de sólidos volátiles al terminar el tiempo de retención. La tabla A10.1, A10.2 y A10.3, muestran los resultados obtenidos:

Tabla A10.1: Determinación de las masas crisol + 30 mL de muestra

Muestra	Crisol (g)	Crisol+ Muestra (g)
M1	49.289	79.170
M2	23.680	53.562
M3	53.296	83.301
M4	29.386	59.329

Fuente: Elaboración propia

En la tabla A10.2 se muestran los datos de las masas de las muestras + crisoles luego de la evaporación total del agua a 110°C:

Tabla A10.2: masa de crisoles + muestra posterior a evaporación del agua a 110°C

Muestra	Crisol + Muestra (g)
M1	49.385
M2	23.774
M3	53.391
M4	29.484

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se procede a calcular la cantidad de sólidos totales en cada muestra, por medio de la ecuación A10.1 para luego obtener el promedio de estos valores (Ecuación A10.2):

$$ST = \frac{\text{Peso}_{110^{\circ}\text{C}} - \text{Peso}_{\text{crisol}}}{\text{Volumen}_{\text{muestra}}}$$

Ecuación A10. 1

$$ST_{muestra\ 1} = \frac{49.385g - 49.289g}{30\ ml} = 0.0032 \frac{g}{ml} \times \frac{1000\ ml}{1\ L} = 3.20 \frac{gST}{L}$$

$$ST_{muestra\ 2} = \frac{23.774g - 23.680g}{30\ ml} = 0.003133 \frac{g}{ml} \times \frac{1000\ ml}{1\ L} = 3.13 \frac{gST}{L}$$

$$ST_{muestra\ 3} = \frac{53.391g - 53.296g}{30\ ml} = 0.003167 \frac{g}{ml} \times \frac{1000\ ml}{1\ L} = 3.17 \frac{gST}{L}$$

$$ST_{muestra\ 4} = \frac{29.484g - 29.387g}{30\ ml} = 0.003233 \frac{g}{ml} \times \frac{1000\ ml}{1\ L} = 3.23 \frac{gST}{L}$$

Calculando el valor promedio de los resultados:

$$ST_{prom} = \frac{ST_{muestra\ 1} + ST_{muestra\ 2} + ST_{muestra\ 3} + ST_{muestra\ 4}}{4}$$

*Ecuación A10. 2*

$$ST_{prom} = \frac{3.20 \frac{gST}{L} + 3.13 \frac{gST}{L} + 3.17 \frac{gST}{L} + 3.23 \frac{gST}{L}}{4}$$

$$ST_{prom} = 3.18 \frac{gST}{L}$$

En la tabla A10.3 se presentan los valores resultantes, luego de medir la masa de cada muestra, después de haber sido calcinada a 550°C:

*Tabla A10.3: Determinación de masa posterior a los 550 °C*

<b>Muestra</b>	<b>Crisol + Muestra (g)</b>
<b>M1</b>	49.352
<b>M2</b>	23.740
<b>M3</b>	53.360
<b>M4</b>	29.447

*Fuente: Elaboración propia.*

A continuación, se procede a calcular la cantidad de sólidos volátiles totales en cada muestra, por medio de la ecuación A10.3 para luego obtener el promedio de estos valores (Ecuación A10.4):

$$SVT = \frac{Peso_{110^{\circ}C} - Peso_{500^{\circ}C}}{Volumen_{muestra}}$$

Ecuación A10. 3

$$SVT_{muestra\ 1} = \frac{49.385g - 49.352g}{30\ ml} = 0.0011\ \frac{g}{ml} \times \frac{1000\ ml}{1\ L} = \mathbf{1.10\ \frac{gSVT}{L}}$$

$$SVT_{muestra\ 2} = \frac{23.774g - 23.740g}{30\ ml} = 0.001133\ \frac{g}{ml} \times \frac{1000\ ml}{1\ L} = \mathbf{1.13\ \frac{gSVT}{L}}$$

$$SVT_{muestra\ 3} = \frac{53.391g - 53.358g}{30\ ml} = 0.0011\ \frac{g}{ml} \times \frac{1000\ ml}{1\ L} = \mathbf{1.10\ \frac{gSVT}{L}}$$

$$SVT_{muestra\ 4} = \frac{29.484g - 29.452g}{40\ ml} = 0.001067\ \frac{g}{ml} \times \frac{1000\ ml}{1\ L} = \mathbf{1.07\ \frac{gSVT}{L}}$$

Calculando el valor promedio de los resultados:

$$SVT_{prom} = \frac{SVT_{muestra\ 1} + SVT_{muestra\ 2} + SVT_{muestra\ 3} + SVT_{muestra\ 4}}{4}$$

Ecuación A10. 4

$$SVT_{prom} = 1.10\ \frac{gSVT}{L} + 1.13\ \frac{gSVT}{L} + 1.10\ \frac{gSVT}{L} + 1.07\ \frac{gSVT}{L}$$

$$SVT_{prom} = \mathbf{1.10\ \frac{gSVT}{Lt}}$$

# ANEXO A11: ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS POSTERIOR AL TEST DE ACTIVIDAD METANOGENICA

## REPORTE DE ANALISIS

DETERMINACION FISICOQUIMICA	RESULTADO	NORMA PARA AGUAS RESIDUALES NSO 13.49.01:09**	METODO***	DICTAMEN
Demanda Química de Oxígeno (DQO)* mg/l	1,588	800	Standard Methods, APHA AWWA WEF Ed 22 2012. 5220 - D Metodo colorimetrico, reflujo cerrado	RECHAZADO
Sólidos Suspendidos Totales*mg/l	110	150	Standard Methods, APHA AWWA WEF, 22 Ed 2012.2540D Metodo Gravimetrico	ACEPTADO

\*Análisis Acreditado por OSA (Organismos Salvadoreño de Acreditación)

\*\*Norma Salvadoreña Obligatoria. Aguas Residuales. Tabla 2, Valores máximos permisibles de parámetros para verter aguas residuales de tipo especial al cuerpo receptor por tipo de actividad. Numeral I Animales vivos y productos del Reino Animal: Sección 1: Producción Agropecuaria. Tabla 3. Parametros complementarios sobre valores permisibles para aguas residuales descargadas a un cuerpo receptor.

\*\*\*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.  
mg/l: Miligramo por litro

**CARACTERISTICAS DE LA MUESTRA:** Muestra color café oscuro de aspecto turbio escaso sedimento color café. Olor a material orgánico en descomposición. Recibido en botella plástica.

**OBSERVACIÓN:** El resultado de Demanda Bioquímica no cumple con lo establecido por la norma de referencia. Los demás resultados cumplen con lo establecido por la norma de referencia.

**Su muestra se conservará por 24 horas después de la recepción del presente informe, para atender cualquier necesidad adicional.**

Los resultados del presente reporte corresponden en procedencia y código a la muestra indicada.

Por políticas de confidencialidad y derechos de autor, la reproducción total de este reporte debe ser autorizada

Por el cliente; el Centro de Control de Calidad Industrial no autoriza la copia parcial del reporte.

Atentamente,

**CENTRO DE CONTROL DE CALIDAD INDUSTRIAL S.A DE C.V. CCCI**

Dra. Sulma Yanira Reyes de Serpas  
Directora Ejecutiva

El CCCI trabaja con un sistema de Calidad Implementado bajo la Norma NTS ISO /IEC 17025:2005 como parte de la garantía de la calidad de nuestros procesos dirigida a nuestros clientes.



ANALIZANDO Y ASESORANDO PARA UNA COMPETITIVIDAD SOSTENIBLE

**CENTRO DE CONTROL DE CALIDAD INDUSTRIAL**

Calle San Antonio Abad, Urbanización Lisboa #35,  
San Salvador, El Salvador, C.A.  
Teléfonos: (503) 2284-0888, (503) 2284-0223  
E-mail: ccci@navegante.com.sv, ventas@ccci.com.sv  
Pagina Web: ccci.com.sv



## ANEXO A12: MONTAJE DE SISTEMA PARA PRUEBA DE JARRAS



Figura A12.1: Montaje de sistema de agitación

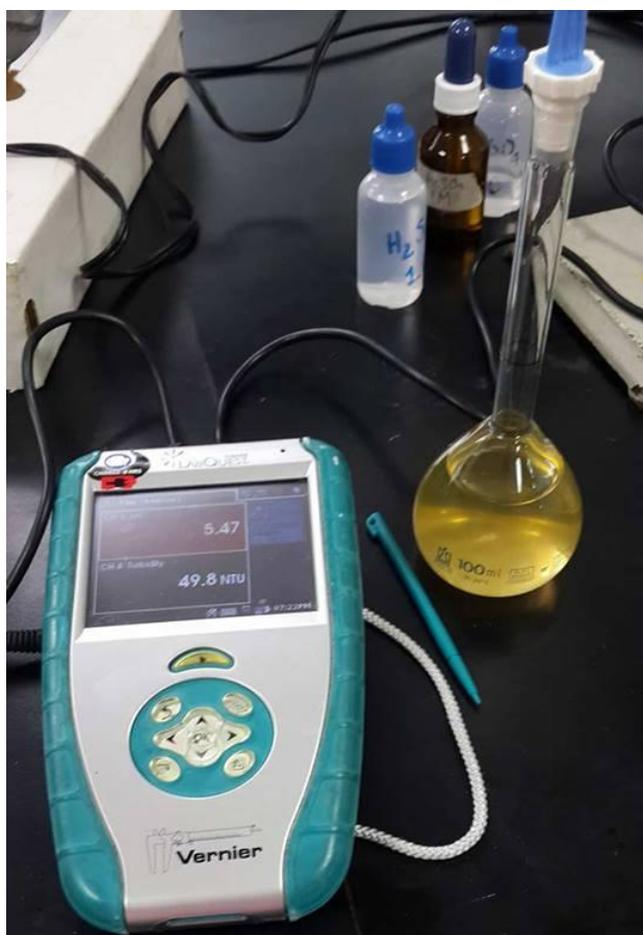


Figura A12.2: Turbidímetro



Figura A12.3: pHmetro

## ANEXO A13: PRUEBA DE JARRAS CON SULFATO DE ALUMINIO



Figura A13.1: Resultados con sulfato de aluminio determinando pH óptimo



Figura A13.2: Resultado con Sulfato de Aluminio determinando dosis óptima

**ANEXO A14: ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS POSTERIOR A PRUEBA DE JARRAS  
UTILIZANDO LA DOSIS ÓPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO**



F - 09



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA  
LABORATORIO FÍSICOQUÍMICO DE AGUAS**

CODIGO N° 23-17		INFORME DE RESULTADOS			
Nombre y dirección del cliente: TANIA MARTINEZ. COLONIA EL REFUJIO, PASAJE CORINTO, No. 27. SAN SALVADOR.					Pág. 1 de 1
Descripción de muestra: AGUA RESIDUAL. ESTABLO DE GANADO BOVINO.				N° DE MUESTRAS: 1	
Lugar de toma de muestra: CAMPO EXPERIMENTAL. FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS. SAN LUIS TALPA. LA PAZ					
Fecha de elaboración del informe: MIERCOLES, 21 DE JUNIO DE 2017					
Fecha de recepción de muestra: MIERCOLES, 14 DE JUNIO DE 2017			Fecha de Análisis: DEL 14 AL 21 DE JUNIO DE 2017		
Parámetros	Método de Análisis	Identificación de la Muestra		Resultados	Norma Salvadoreña Agua Residuales descargadas a un cuerpo receptor NSO 13.49.01:09
		CODIGO LABORATORIO	CODIGO CLIENTE		
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Fotométrico	23-17	-----	6.75 mg/L	800 mg/L
Sólidos suspendidos totales	Gravimétrico			1,106 mg/L	150 mg/L
Observaciones: - La toma de muestra estuvo a cargo del interesado.					

**Advertencia:** Los Resultados del informe solo se refieren a las muestras analizadas.

- NOTA:**
- El informe de análisis sólo puede ser reproducido parcial o totalmente con la autorización escrita del laboratorio.
  - Se especificara en observaciones, si la muestra fue tomada por el cliente o el laboratorio.
  - El Laboratorio Físicoquímico de Aguas pone a su disposición la siguiente dirección electrónica para que reporte alguna no conformidad al servicio prestado: quejas.sgc.lfqa@gmail.com.

FECHA DE ENTREGA: 06 JUL 2017



*Lic. Henry Alfredo Hernández Contreras*  
Jefe del Laboratorio Físicoquímico de Aguas  
y Analista

FIN DEL REPORTE

act

Final Avenida "Mártires Estudiantes del 30 de julio", Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador, C.A.  
Teléfono Directo: 2531-2948. Correo electrónico: labfqa\_ues@yahoo.com

## ANEXO A15: PRUEBA DE JARRAS CON POLICLORURO DE ALUMINIO (PAC)



Figura A15.1: Resultados con Policloruro de Aluminio (PAC) en determinación de pH óptimo.



Figura A15. 2: Resultados con Policloruro de Aluminio (PAC) en determinación dosis óptima.

ANEXO A16: ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS POSTERIOR A PRUEBA DE JARRAS UTILIZANDO LA DOSIS ÓPTIMA DE PAC



F - 09



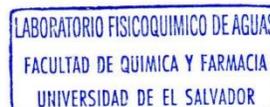
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA  
LABORATORIO FÍSICOQUÍMICO DE AGUAS

CODIGO Nº 29-17		INFORME DE RESULTADOS			
Nombre y dirección del cliente: ROCIO CORINA GUERRA LOZANO. ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA. FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.					Pág. 1 de 1
Descripción de muestra: AGUA RESIDUAL. ESTABLO DE GANADO BOVINO.				Nº DE MUESTRAS: 1	
Lugar de toma de muestra: CAMPO EXPERIMENTAL. FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS. SAN LUIS TALPA. LA PAZ					
Fecha de elaboración del informe: MIERCOLES, 12 DE JULIO DE 2017					
Fecha de recepción de muestra: VIERNES, 07 DE JULIO DE 2017			Fecha de Análisis: DEL 07 AL 12 DE JULIO DE 2017		
Parámetros	Método de Análisis	Identificación de la Muestra		Resultados	Norma Salvadoreña Agua. Agua Residuales descargadas a un cuerpo receptor NSO 13.49.01:09
		CODIGO LABORATORIO	CODIGO CLIENTE		
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Fotométrico	29-17	-----	1690 mg/L	800 mg/L
Sólidos suspendidos totales	Gravimétrico			792 mg/L	150 mg/L
Observaciones: - La toma de muestra estuvo a cargo del interesado.					

**Advertencia:** Los Resultados del informe solo se refieren a las muestras analizadas.

- NOTA:**
- El informe de análisis sólo puede ser reproducido parcial o totalmente con la autorización escrita del laboratorio.
  - Se especificara en observaciones, si la muestra fue tomada por el cliente o el laboratorio.
  - El Laboratorio Físicoquímico de Aguas pone a su disposición la siguiente dirección electrónica para que reporte alguna no conformidad al servicio prestado: quejas.sgc.lfqa@gmail.com.

FECHA DE ENTREGA: 19 JUL 2017



*Lic. Henry Alfredo Hernández Contreras*  
Jefe del Laboratorio Físicoquímico de Aguas  
y Analista

FIN DEL REPORTE

aol\*

Final Avenida "Mártires Estudiantes del 30 de julio", Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador, C.A.  
Teléfono Directo: 2531-2948. Correo electrónico: labfqa\_ues@yahoo.com

## ANEXO A17: PRUEBA DE JARRAS POSTERIOR A LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA, PARA BIOL

Debido a que la concentración de sólidos a la salida del biodigestor es menor, se utilizó una concentración menor de coagulante - floculante del 5% p/v.

Tabla A17.1: Resultados de turbidez para prueba de pH óptimo

pH <sub>inicial</sub>	Turbidez (NTU)	pH <sub>final</sub>
5.0	16.7	3.5
5.5	16.7	3.5
6.0	16.8	3.8
6.5	52.6	4.0
7.0	41.1	5.0
7.5	9.9	6.0
8.0	10.4	6.0
8.5	9.0	6.5
9.0	10.5	6.5

Fuente: Elaboración propia

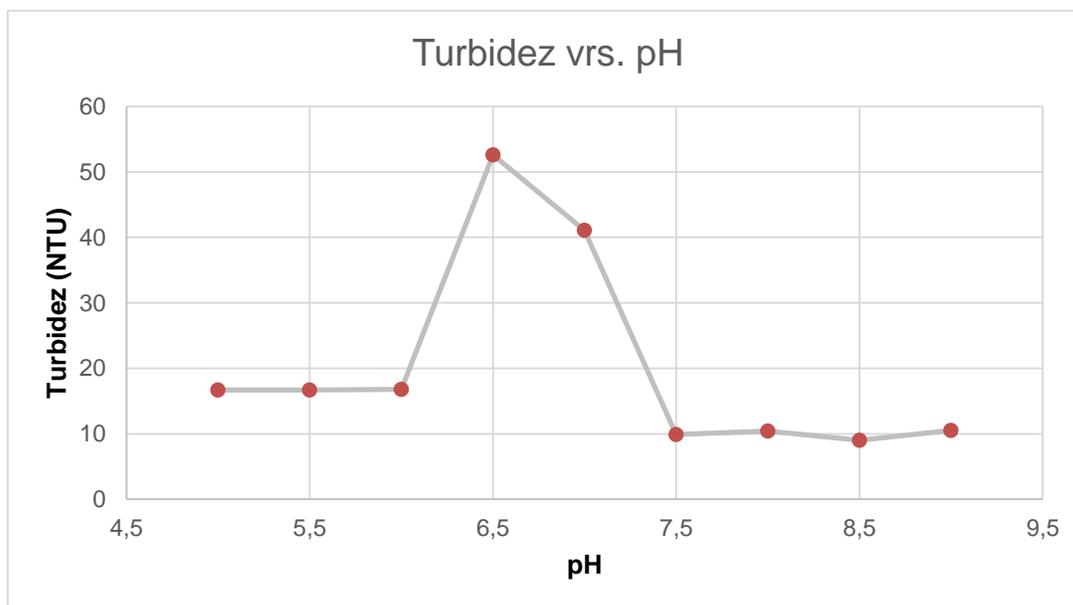




Figura A17.1: Resultados en determinación de pH con Policloruro de Aluminio (PAC) para efluente posterior a tratamiento anaeróbico

Debido a que, existen dos valores de pH óptimo, la siguiente ronda se realizó evaluando la dosis óptima a estos valores de pH y se determina el pH óptimo considerando el valor que poseerá el pH del agua clarificada obtenida al final del proceso. En la tabla A17.2 se muestran los resultados obtenidos encontrando la dosis óptima a un pH de 8.5 y la tabla A17.3 muestra los resultados a un pH de 7.5:

Tabla A17.2: Resultados de turbidez para prueba de jarras a pH 8.5

Dosis (mL de PAC/L) (pH=8.5)	Turbidez (NTU)
6.5	25.2
10	9.0
13.5	9.7
17.0	45.6

Fuente: elaboración propia

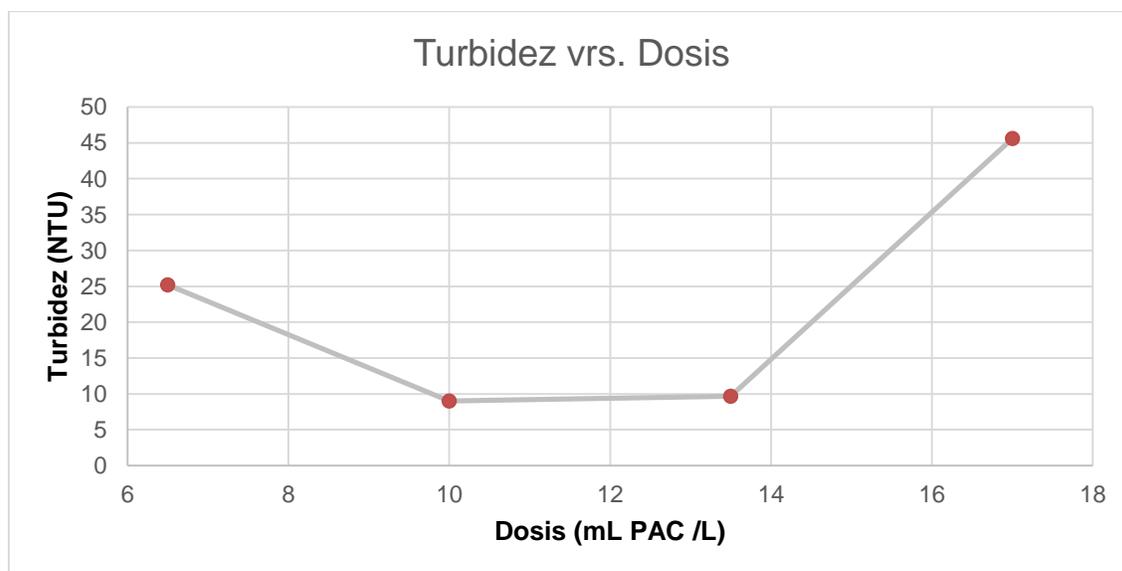
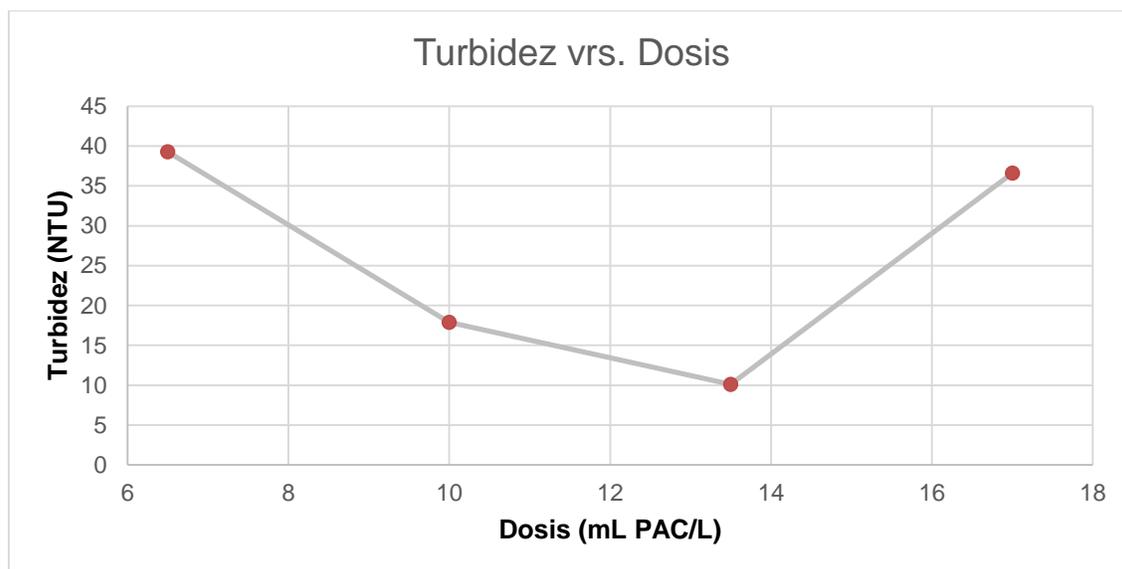


Tabla A17.3: Resultados de turbidez para prueba de jarras a pH 7.5

Dosis (mL de PAC/L) (pH=7.5)	Turbidez (NTU)
6.5	39.3
10	17.9
13.5	10.1
17.0	36.6

Fuente: elaboración propia



Puede observarse que no existe una diferencia muy marcada entre los resultados antes presentados y se procede a tomar la decisión en base al momento en el que se necesitará regular el pH del agua obtenida pues, si bien al inicio no se necesita regular en gran medida el valor del pH del agua a la entrada del tanque clarificador, los resultados de pH final demuestran que, si se selecciona un óptimo de 7.5, el valor final de acidez del agua es muy bajo y se encontrará muy cerca del límite inferior que permite la normativa, por lo que será necesario elevar el pH luego del tanque clarificador; esto implicaría el uso de otra bomba reguladora de pH y la compra de otro tanque homogeneizador. Debido a esto, se propone regular el pH de entrada al tanque homogeneizador secundario hasta hacerlo llegar a un valor de 8.5.



Figura A17.2: Resultados de determinación de dosis óptima a pH de 7.5.



Figura A17. 3: Resultados de determinación de dosis óptima a pH de 7.5.

En el gráfico se observa claramente que a un pH de 8.5, la dosis óptima de coagulante PAC al **5% p/V** a utilizar, es **13.5 mL/L** de agua residual.

Calculando la eficiencia de remoción del PAC por medio de la turbidez, mediante la ecuación A17.1:

$$\% \text{ de remoción} = \frac{\text{turbidez}_i - \text{turbidez}_f}{\text{turbidez}_i} \times 100\%$$

Ecuación A17. 1

$$\% \text{ de remoción} = \frac{1,467.3 \text{ NTU} - 9.0 \text{ NTU}}{1,467.3 \text{ NTU}} \times 100\%$$

$$\% \text{ de remoción} = 99.38\%$$

Calculando la eficiencia de remoción mediante la Demanda Química de Oxígeno. Para lo que se determinó el valor de DQO (ecuación A17.2), obteniendo un valor de 438 mg/L (ver Anexo A18):

$$\% \text{ de remoción} = \frac{DQO_i - DQO_f}{DQO_i} \times 100\%$$

Ecuación A17. 5

$$\% \text{ de remoción} = \frac{1,588 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 438 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{1,588 \frac{\text{mg}}{\text{L}}} \times 100\%$$

$$\% \text{ de remoción} = 72.41 \%$$



Figura A17.4: Resultado de tratamiento fisicoquímico a dosis optima y pH óptimo para caracterización.

# ANEXO A18: ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS POSTERIOR A PRUEBA DE JARRA PARA BIOL

**REPORTE DE ANALISIS**

DETERMINACION FISICOQUIMICA	RESULTADO	NORMA PARA AGUAS RESIDUALES NSO 13.49.01:09**	METODO***	DICTAMEN
Demanda Química de Oxígeno (DQO)* mg/l	438	800	Standard Methods, APHA AWWA WEF Ed 22 2012. 5220 - D Metodo colorimetrico, reflujó cerrado	ACEPTADO
Sólidos Suspendidos Totales*mg/l	14	150	Standard Methods, APHA AWWA WEF, 22 Ed 2012.2540D Metodo Gravimetrico	ACEPTADO

\*Análisis Acreditado por OSA (Organismos Salvadoreños de Acreditación)  
 \*\*Norma Salvadoreña Obligatoria. Aguas Residuales. Tabla 2. Valores máximos permisibles de parámetros para verter aguas residuales de tipo especial al cuerpo receptor por tipo de actividad. Numeral I Animales vivos y productos del Reino Animal. Sección 1: Producción Agropecuaria. Tabla 3. Parametros complementarios sobre valores permisibles para aguas residuales descargadas a un cuerpo receptor.  
 \*\*\*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.  
 mg/l: Miligramo por litro

**CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA:** Muestra de color amarillo claro de aspecto turbio sin sedimento olor a fluido biológico (Urea). Recibida en botella plástica.

**OBSERVACIÓN:** Los resultados cumplen con lo establecido por la norma de referencia.

Su muestra se conservará por 24 horas después de la recepción del presente informe, para atender cualquier necesidad adicional.

Los resultados del presente reporte corresponden en procedencia y código a la muestra indicada. Por políticas de confidencialidad y derechos de autor, la reproducción total de este reporte debe ser autorizada Por el cliente; el Centro de Control de Calidad Industrial no autoriza la copia parcial del reporte.

Atentamente,

**CENTRO DE CONTROL DE CALIDAD INDUSTRIAL S.A DE C.V – CCCI**

*Sulma Yanira Reyes de Serpas*  
 Dra. Sulma Yanira Reyes de Serpas  
 Directora Ejecutiva

República de El Salvador  
 C. C. C. I.  
 LABORATORIO DE ANALISIS DE ALIMENTOS  
 AGUAS Y AGUAS RESIDUALES  
 7025-2005 como parte de la garantía de la  
 Prop. SOCIEDAD CENTRO DE CONTROL  
 DE CALIDAD INDUSTRIAL, S.A. DE C.V.  
 San Salvador, Dpto. San Salvador.

El CCCI trabaja con un sistema de Calidad Implementado bajo la Norma NTS ISO /IEC 17025:2005 como parte de la garantía de la calidad de nuestros procesos dirigida a nuestros clientes.

EN SAYOS  
LEA-18-07  
ACREDITADO PARA EL ALICANCE  
DECLARADO EN WWW.OSA.GOV.SV

ANALIZANDO Y ASESORANDO PARA UNA COMPETITIVIDAD SOSTENIBLE

**CENTRO DE CONTROL DE CALIDAD INDUSTRIAL**

Calle San Antonio Abad, Urbanización Lisboa #35,  
 San Salvador, El Salvador, C.A.  
 Teléfonos: (503) 2284-0888, (503) 2284-0223  
 E-mail: ccci@navegante.com.sv, ventas@ccci.com.sv  
 Pagina Web: ccci.com.sv

Página 1 de 1

## ANEXO A19. DIMENSIONAMIENTO DEL HOMOGENEIZADOR PRIMARIO

El tanque del homogeneizador tendrá una geometría cilíndrica, una relación de altura-diámetro de 1.5 (Romero Rojas, 2008) (Drury & Gates, 2001) y un factor de seguridad de 20% y se propone un sistema de agitación conformado por un agitador o mezclador de dos paletas simples; las consideraciones de diseño del equipo para el caso del agitador para el homogeneizador son las siguientes (Romero Rojas, 2008) (Brown et al. 2006) (Drury & Gates, 2001):

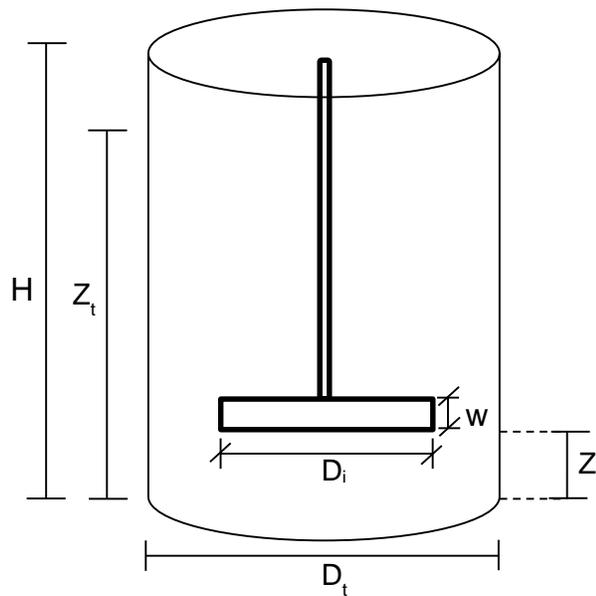


Figura A19.1: Dimensionamiento homogeneizador primario

$$\frac{D_t}{D_i} = 4.35$$

Ecuación A19. 1

$$\frac{Z_i}{D_i} = 0.29$$

Ecuación A19. 2

$$\frac{Z_t}{D_i} = 4.3$$

*Ecuación A19. 3*

$$w = 0.25 * D_i$$

*Ecuación A19. 4*

Donde:

$D_t$  = Diámetro total del tanque homogeneizador (m).

$D_i$  = Diámetro del rodete del agitador (m).

$Z_i$  = Distancia del rodete respecto al fondo del tanque homogeneizador (m).

$Z_t$  = Altura del líquido dentro del tanque homogeneizador (m).

$w$  = Ancho del rodete (m).

$H$  = Altura del tanque homogeneizador (m).

El volumen final del diseño del tanque homogeneizador está dado por la ecuación:

$$V_{Homogeneizador} = \frac{\pi}{4} * D_t^2 * H$$

*Ecuación A19. 5*

$$V_{líquido en homogeneizador} = V_{descargado} + 0.20 * V_{descargado}$$

*Ecuación A19. 6*

$$V_{líquido en homogeneizador} = 1.364 \text{ m}^3 + (1.364 \text{ m}^3 * 0.20) = 1.64 \text{ m}^3$$

Debido a que el agua a tratar puede corroer el tanque a medida pasa el tiempo, el material de elaboración de éste será de acero inoxidable o acero al carbón 304; aunque el material de construcción para este homogeneizador también puede ser de ladrillo y concreto con un revestimiento impermeabilizante para piscinas o repello con concreto para evitar las infiltraciones.

De acuerdo al volumen teórico de un tanque y teniendo en cuenta la relación geométrica altura – diámetro y las relaciones presentadas en la figura A19.1, se deja la ecuación en función del diámetro y se despeja, como se muestra a continuación:

$$V_{\text{líquido en homeogenizador}} = \frac{\pi}{4} * D_t^2 * Z_t$$

Ecuación A19. 7

Empleando la ecuación A19.1 y A19.2, se obtiene la siguiente igualdad:

$$\frac{Z_t}{D_i} = 4.3 \rightarrow \frac{Z_t}{4.3} = D_i$$

Ecuación A19. 8

Se sabe que:

$$\frac{D_t}{D_i} = 4.35$$

Entonces:

$$D_t = 4.35 * D_i$$

$$D_t = 4.35 * \frac{Z_t}{4.3}$$

$$D_t = 1.01 * Z_t$$

Teniendo en cuenta que la relación H/D<sub>t</sub> es de 1.5 la ecuación A19.7, se expresa en función del diámetro de la siguiente forma:

$$D_t = \sqrt[3]{\frac{4 * V_{\text{líquido en homogenizador}}}{1.01163 * \pi}}$$

Ecuación A19. 9

Sustituyendo

$$D_t = \sqrt[3]{\frac{4 * 1.64 m^3}{1.01163 * \pi}}$$

$$D_t = 1.2732 \text{ m} \cong 1.28 \text{ m}$$

La altura del homogeneizador es:

$$H = D_t * 1.5$$

*Ecuación A19. 10*

$$H = 1.28 * 1.5$$

$$H = 1.917 \text{ m} \cong 1.92 \text{ m}$$

Encontrando los valores de las dimensiones del agitador:

$$\frac{D_t}{D_i} = 4.35$$

$$D_i = \frac{D_t}{4.35}$$

$$D_i = \frac{1.28 \text{ m}}{4.35}$$

$$D_i = 0.2942 \text{ m} \cong 0.30 \text{ m}$$

$$\frac{Z_i}{D_i} = 0.29$$

$$Z_i = 0.29 * D_i$$

$$Z_i = 0.29 * 0.30 \text{ m}$$

$$Z_i = 0.087 \text{ m} \cong 0.09 \text{ m}$$

$$\frac{Z_t}{D_i} = 4.3$$

$$Z_t = 4.3 * D_i$$

$$Z_t = 4.3 * 0.30 \text{ m}$$

$$Z_t = 1.29 \text{ m}$$

$$w = 0.25 * D_i$$

$$w = 0.25 * 0.30 \text{ m}$$

$$w = 0.075 \text{ m} \cong 0.08 \text{ m}$$

Se propone una velocidad de rotación necesaria es de 150 RPM o superior, es decir:

$$150 \text{ rpm} \times \frac{0.0166667 \text{ rps}}{1 \text{ rpm}} = 2.50 \text{ rps}$$

Entonces, la potencia requerida es:

$$P_{teórica} = K\rho N^3 d^5$$

*Ecuación A19. 11*

Donde:

$\rho$  = Densidad del fluido (1001.962 kg/m<sup>3</sup>)

K = Constante equivalente a 6.30 (Cristancho Bello & Noy Ortíz, 2016).

N = Número de revoluciones por segundo (RPS)

D = Diámetro del impulsor o paleta (m).

Reemplazando los datos en la ecuación A19.11, la potencia sería:

$$P_{teórica} = 6.30 * 1001.962 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * (2.50 \text{ rps})^3 * (0.30)^5 = 239.67 \text{ W}$$

Con una eficiencia del mezclado del 75% (Cristancho Bello & Noy Ortíz, 2016):

$$P_{real} = \frac{K\rho N^3 d^5}{\eta} = \frac{P_{teórica}}{\eta}$$

*Ecuación A19. 12*

Dónde:

$\eta$  = Eficiencia del motor perteneciente al agitador

Sustituyendo los valores correspondientes:

$$P_{real} = \frac{239.67 W}{0.75} * \frac{1 kW}{1000 W} = 0.32 kW * \frac{1.34 HP}{1 kW} = 0.43 HP$$

La potencia mínima requerida por el agitador perteneciente al homogeneizador primario, es de 0.43 HP; por lo tanto, este se aproxima al siguiente valor más cercano de potencia ofrecida en el mercado el cual es ½ HP.

## ANEXO A20: DIMENSIONAMIENTO DE LA BOMBA DE SUCCIÓN DE AGUA RESIDUAL

La potencia de esta bomba se calcula mediante la ecuación A20.2 (Metso ®, 2012):

$$P_{teórica} = \rho_{descarga} * g * Q * H_B$$

Ecuación A20. 1

$$P_{real} = \frac{\rho_{descarga} * g * Q * H_B}{\eta}$$

Ecuación A20. 2

Dónde:

$P_{teórica}$  = potencia teórica que posee la bomba (W)

$P_{real}$  = potencia real que posee la bomba (W)

$\rho_{descarga}$  = densidad de la descarga líquida del establo (kg/m<sup>3</sup>)

$g$  = valor de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)

$Q$  = Caudal de líquido homogeneizado con el que trabajará la bomba (m<sup>3</sup>/s)

$H_B$  = Altura diferencial de la bomba (m)

$\eta$  = eficiencia de la bomba

La altura diferencial de la bomba, es la suma de la altura de elevación (energía gravitacional), altura de presión (energía de deformación) y altura de velocidad (energía cinética) más las pérdidas debido a tuberías y accesorios. Lo anterior se expresa en la ecuación A20.3:

$$H_B = h_f + \left[ \frac{P_2}{\rho * g} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right] - \left[ \frac{P_1}{\rho * g} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right]$$

Ecuación A20. 3

Donde:

$h_f$  = Sumatoria de pérdidas de carga por fricción

(Pérdidas primarias + Pérdidas secundarias) (m).

$P_2$  = Presión en el punto 2 (Pa)

$\rho$  = Densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>)

$g$	= Gravedad	(m/s <sup>2</sup> )
$Z_2$	= Altura del punto 2	(m)
$V_2$	= Velocidad de salida	(m/s)
$P_1$	= Presión en el punto 1	(Pa)
$Z_1$	= Altura del punto 1	(m)
$V_1$	= Velocidad en el punto 1	(m/s)

La sumatoria de las pérdidas de carga por fricción está comprendida por las pérdidas debidas a la tubería y accesorios utilizados antes y después de la bomba (Cengel & Cimbala, 2006).

Las pérdidas por fricción en una tubería recta varían con (Metso®, 2012):

- Diámetro
- Longitud
- Material (rugosidad)
- Caudal (velocidad)

Estas pérdidas primarias serán calculadas a partir de la fórmula semiempírica de Hazen & William. Y se empleará la forma tradicional (Cengel & Cimbala, 2006) para calcular las pérdidas por accesorios.

$$h_{fp} = 10.674 \left( \frac{Q^{1.852}}{C^{1.852} * D^{4.871}} \right) * L$$

*Ecuación A20. 4*

Donde:

$h_{fp}$  = Pérdidas primarias (m).

$Q$  = Caudal de trabajo

$C$  = constante que mide la rugosidad del material de la conducción

$D$  = diámetro de la tubería (m).

$L$  = Longitud de la tubería (m).

$$h_{LS} = \sum \frac{K_L * V^2}{2 * g}$$

Ecuación A20. 5

Donde:

$h_{LS}$  = Pérdidas secundarias (m).

$K_L$  = Coeficiente de pérdida o coeficiente de resistencia del accesorio

$V^2$  = Velocidad del fluido (m/s)

$g$  = Gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>)

Como no se conocen las condiciones en las bridas de la bomba, se debe seleccionar un punto antes y después de las bomba cubriendo así la tubería, y de esta manera ya es posible determinar las perdidas (Metso ®, 2012). La figura A20.1 muestra la distribución de equipos y las alturas correspondientes esta operación unitaria.

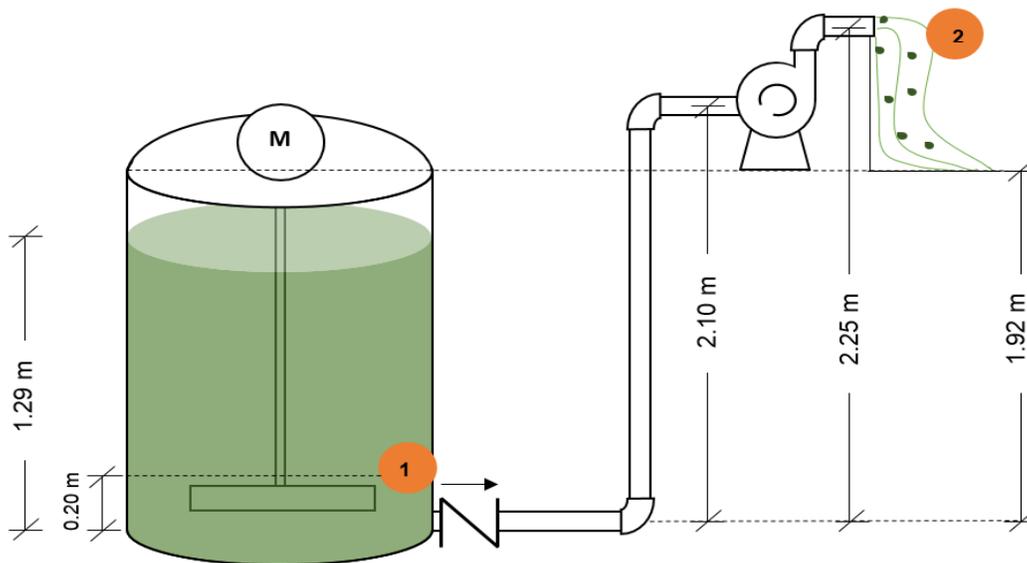


Figura A20.1: Homogeneizador primario y sistema de succión de agua residual.  
Fuente: Elaboración propia.

En el diagrama anterior, se conoce la altura total en la superficie del líquido, en el tanque de alimentación (Punto 1) y en la salida de la tubería de salida (Punto 2).

A continuación se procede a calcular la potencia de la bomba por medio del procedimiento antes descrito. Según Mac. Cabe (2006), lo aconsejable para transportar fluidos poco viscosos es que la velocidad de entrada a la bomba se encuentre dentro de 0.3 a 0.9 m/s y la salida de la bomba se encuentre entre 1.2 a 3 m/s. Se tomará como velocidad de entrada a la bomba como 0.6 m/s y debido a que el siguiente proceso es el paso del fluido por una rejilla, se selecciona la velocidad de salida de la bomba como 2.0 m/s:

**Punto 1:**

Altura de elevación = 0.20 m

Altura de presión = 0 (presión atmosférica)

Presión de velocidad = 0 (casi no existe velocidad)

**Punto 2:**

Altura de elevación = 2.25 m

Altura de presión = 0 (presión atmosférica)

Presión de velocidad =  $\frac{V_2^2}{2g}$

Donde  $V_2 = 2.0 \frac{m}{s}$

De este modo, la expresión de la altura diferencial de la bomba queda expresada de la siguiente forma:

$$H_B = h_f + \left[ Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right] - [Z_1]$$

Ecuación A20. 6

$$H_B = h_f + \left[ 2.25m + \frac{\left(2.0 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9.81 \frac{m}{s^2}} \right] - [0.20 m]$$

$$H_b = h_f + 2.25 m$$

Para el sistema antes descrito, se estima que se utilizarán aproximadamente 16 m de tubería de PVC. De acuerdo con Azevedo Netto y Acosta A. (2005), se requiere utilizar una tubería de PVC cuyo diámetro estará calculado a partir de la ecuación A20.9 partiendo de la ecuación A20.7 y tomando en cuenta que para este tipo de fluido, el caudal recomendable se encuentra entre 0.9 y 7.5 m<sup>3</sup>/h (Mott, 2006); además, para el desarrollo de la propuesta, se selecciona un caudal de 5.2 m<sup>3</sup>/h y para lograr obtener una velocidad de succión de 0.6 m/s:

$$Q = A * V$$

*Ecuación A20. 7*

Donde:

Q = Caudal (m<sup>3</sup>/h)

A = Área transversal de la tubería (m<sup>2</sup>)

V = Volumen (m<sup>3</sup>)

Debido a que la tubería posee un área transversal circular, se sustituye el área en términos del diámetro y se despeja para encontrar el valor del diámetro de la tubería:

$$Q = \frac{\pi * D_{tubería}^2}{4} * V$$

*Ecuación A20. 8*

$$D_{tubería} = \sqrt{\frac{4 * Q}{\pi * V}}$$

*Ecuación A20. 9*

Sustituyendo y encontrando el diámetro de la tubería:

$$D_{tubería} = \sqrt{\frac{4 * \frac{5.2 \text{ m}^3}{\text{h}} * \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}}}{\pi * 0.6 \frac{\text{m}}{\text{s}}}}$$

$$D_{tubería} = 0.055 \text{ m} \cong 0.06 \text{ m}$$

Según Canto Ríos (2013), el valor del coeficiente de Hazen & William para las tuberías de PVC se encuentra entre 140 y 150; por lo cual, para los cálculos se tomará el valor promedio entre los dos. De esta forma, el valor para el coeficiente de Hazen & William para tubos de PVC es 145. Se aproximará el valor del diámetro de tubería a 2 ½ " o 0.0635 m (6.35 cm).

Sustituyendo en la ecuación A20.4, se obtienen las pérdidas debido a la tubería:

$$h_f = 10.674 \left( \frac{\left( \frac{5.2 \text{ m}^3}{h} * \frac{1h}{60 \text{ min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} \right)^{1.852}}{(145)^{1.852} * (0.0635 \text{ m})^{4.871}} \right) * (16 \text{ m})$$

$$h_{fp} = 0.06325 \text{ m} \cong 6.33 \text{ cm}$$

El sistema consta de los siguientes accesorios cuyo material de fabricación es PVC: tres codos suaves de 90° y una válvula Check. Según Mendoza, Carval, & Saldarriaga (2011) el valor del coeficiente de pérdida para codos suaves de 90° PVC, es  $K_L = 1.10$  y para el caso de la válvula check el valor es de 2.0 (Kudela,2010).

- Pérdidas debido a codos:

$$h_{Lsc} = \sum \frac{K_L * V^2}{2 * g}$$

Donde:

$h_{Lsc}$  = Pérdidas secundarias generadas por los dos codos suaves de 90°

Sustituyendo los valores correspondientes a cada variable:

$$h_{Lsc} = 3 * \frac{1.10 * \left(0.6 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9.81 \frac{m}{s^2}}$$

$$h_{Lsc} = 0.06 \text{ m}$$

- Pérdida debido a válvula Check:

$$h_{LSv} = \sum \frac{K_L * V^2}{2 * g}$$
$$h_{LSv} = \frac{2.0 * \left(0.6 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9.81 \frac{m}{s^2}}$$

Donde:

$h_{LSv}$  = Pérdida secundaria generada por la válvula Check.

$$h_{LSv} = 0.037 \text{ m}$$

Entonces, las pérdidas secundarias tienen un valor de:

$$h_{fs} = h_{Lsc} + h_{LSv}$$

*Ecuación A20. 10*

$$h_{fs} = 0.06055m + 0.037 \text{ m} = 0.0976 \text{ m} \cong 9.76 \text{ cm}$$

Y el valor de las pérdidas totales es

$$h_f = h_{fp} + h_{fs}$$

*Ecuación A20. 11*

$$h_f = 0.06m + 0.0976 \text{ m} = 0.16 \text{ m}$$

Sustituyendo para encontrar la altura diferencial de la bomba:

$$H_b = h_f + 2.25 \text{ m}$$

$$H_b = 0.16 \text{ m} + 2.25 \text{ m}$$

$$H_b = 2.42 \text{ m}$$

Encontrando la potencia de la bomba por medio de la ecuación A20.2 y asumiendo una eficiencia del 40%:

$$P_{real} = \frac{1001.962 \frac{kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2} * \left( 5.2 \frac{m^3}{h} * \frac{1 h}{60 min} * \frac{1 min}{60 seg} \right) * 2.42 m}{0.40}$$

$$P_{real} = 85.89 W$$

Convirtiendo esto a HP:

$$85.89 W * \frac{1 kW}{1000 W} * \frac{1.34 HP}{1 kW} = 0.12 HP$$

La potencia mínima requerida por la bomba para la succión de la descarga homogeneizada, es de 0.12 HP. Debido a que en el mercado, la potencia trabajo más usual de las bombas es de ½ HP, la potencia de la bomba de succión de lodos se aproximará a este valor.

## ANEXOS A21: INSTRUCCIONES Y MATERIALES PARA CONSTRUCCIÓN DE UN BIODIGESTOR TUBULAR

Para indicar las instrucciones de construcción es necesario conocer que materiales son los requeridos y que función desempeñan en la construcción, lo que se indica en las observaciones detalladas para cada material presentadas a continuación:

*Tabla A21.1: Materiales e instrucciones para construcción de biodigestor tubular*

DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	OBSERVACIONES
<b>Cuerpo del biodigestor</b>			
Plástico Agrofilm tipo manga, 2.5 m de ancho, longitud	m	11.5	(1)
Tubo de PVC clase 10 agua, 4'' pulgadas de diámetro	m	2	(2)
Liga de auto	M	50	(3)
Macho roca de 1/2"	unidades	1	
Hembra de rosca de 1/2"	unidades	1	
Disco rígido de plástico diámetro mayor a 10 cm	unidades	2	
Disco livianos de plástico diámetro mayor a 10 cm	unidades	2	(4)
Codos PVC 1/2" de diámetro	unidades	1	
Sacos viejos o plástico			(5)
Paja o arena			

*Fuente: Elaboración propia.*

### ***Instrucciones para construcción de un biodigestor tubular:***

- (1) A la longitud del biodigestor se le añade un metro más, puesto que los primeros 50 cm serán para el amarre, esto tanto a la entrada como a la salida. La longitud del plástico del biodigestor debe ser el doble, pues se corta a la mitad al momento de montarse y una de las mitades se cruza al interior de la otra para tener un biodigestor de doble capa con mayor resistencia.
- (2) En la entrada y salida se colocan un tubo con 1 m de longitud respectivamente, colocando dentro de la manga 80 cm, dejando a la vista 20 cm.
- (3) Se cuenta 50 cm desde el origen del plástico, en esta longitud se realiza el amarre, lo que significa que dentro del plástico quedaran 30 cm sin amarrar. Para amarrar la liga, cada vuelta tiene que solaparse por encima con la anterior. De esta manera se va ascendiendo por el tubo poco a poco. Este amarre tiene que ser fuerte, y en caso de que se rompa la liga no deshace el camino, y se puede continuar sobre el trabajo ya hecho. Es muy importante que quede tensa la liga y solapada sobre la anterior vuelta, esto se hace tanto a la entrada como a la salida del biodigestor.
- (4) Para la salida del gas se realiza una conexión especial la cual se explica en el Anexo A46.
- (5) Es necesario rellenar la zanja, con arena, con paja y con telas de sacos viejos o plásticos esto para que el biodigestor se acomode bien cuando se esté realizando la primera carga, así mismo para proteger el biodigestor de rasgaduras.

Un procedimiento completo de instalación de un biodigestor tubular puede encontrarse en el documento presentado por Ortega y el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) denominado: "Instalación de biodigestores de polietileno de bajo costo".

## ANEXO A22: CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DEL BIODIGESTOR DE LAGUNA CUBIERTA

### Dimensionamiento de zanja:

Mediante una matriz se puede observar la varianza de relación entre las medidas propuestas para el ancho y el largo del biodigestor, a medida se aumenta el valor de la altura, la relación disminuye cada vez más.

Tabla A22.1: Matriz para cálculo de dimensiones de zanja de biodigestor de laguna cubierta

Volumen de C.F (m <sup>3</sup> )	A (m)	Ai (m)	As (m)	d (m)	Li (m)	Ls (m)	Lp (m)	Relación d:L
31.20	1.00	0.50	2.70	1.60	18.15	20.35	19.25	12.03
31.20	1.00	0.60	2.80	1.70	17.02	19.22	18.12	10.66
31.20	1.00	0.70	2.90	1.80	16.01	18.21	17.11	9.51
31.20	1.00	0.80	3.00	1.90	15.11	17.31	16.21	8.53
31.20	1.00	0.90	3.10	2.00	14.30	16.50	15.40	7.70
31.20	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>3.20</b>	<b>2.10</b>	<b>13.57</b>	<b>15.77</b>	<b>14.67</b>	<b>6.98</b>
31.20	1.00	1.10	3.30	2.20	12.90	15.10	14.00	6.36
31.20	1.00	1.20	3.40	2.30	12.29	14.49	13.39	5.82
31.20	1.00	1.30	3.50	2.40	11.73	13.93	12.83	5.35
31.20	1.00	1.40	3.60	2.50	11.22	13.42	12.32	4.93
31.20	1.00	1.50	3.70	2.60	10.74	12.94	11.84	4.56
31.20	1.00	1.60	3.80	2.70	10.31	12.51	11.41	4.22
31.20	1.00	1.70	3.90	2.80	9.90	12.10	11.00	3.93
31.20	1.00	1.80	4.00	2.90	9.52	11.72	10.62	3.66
31.20	1.00	1.90	4.10	3.00	9.17	11.37	10.27	3.42
31.20	1.00	2.00	4.20	3.10	8.83	11.03	9.93	3.20
31.20	1.10	0.50	2.92	1.71	15.09	17.51	16.30	9.53
31.20	1.10	0.60	3.02	1.81	14.19	16.61	15.40	8.51
31.20	1.10	0.70	3.12	1.91	13.38	15.80	14.59	7.64
31.20	1.10	0.80	3.22	2.01	12.66	15.08	13.87	6.90
31.20	1.10	0.90	3.32	2.11	12.00	14.42	13.21	6.26
31.20	1.10	1.00	3.42	2.21	11.40	13.82	12.61	5.71
31.20	1.10	1.10	3.52	2.31	10.86	13.28	12.07	5.22
31.20	1.10	1.20	3.62	2.41	10.36	12.78	11.57	4.80
31.20	1.10	1.30	3.72	2.51	9.90	12.32	11.11	4.42
31.20	1.10	1.40	3.82	2.61	9.47	11.89	10.68	4.09
31.20	1.10	1.50	3.92	2.71	9.08	11.50	10.29	3.80

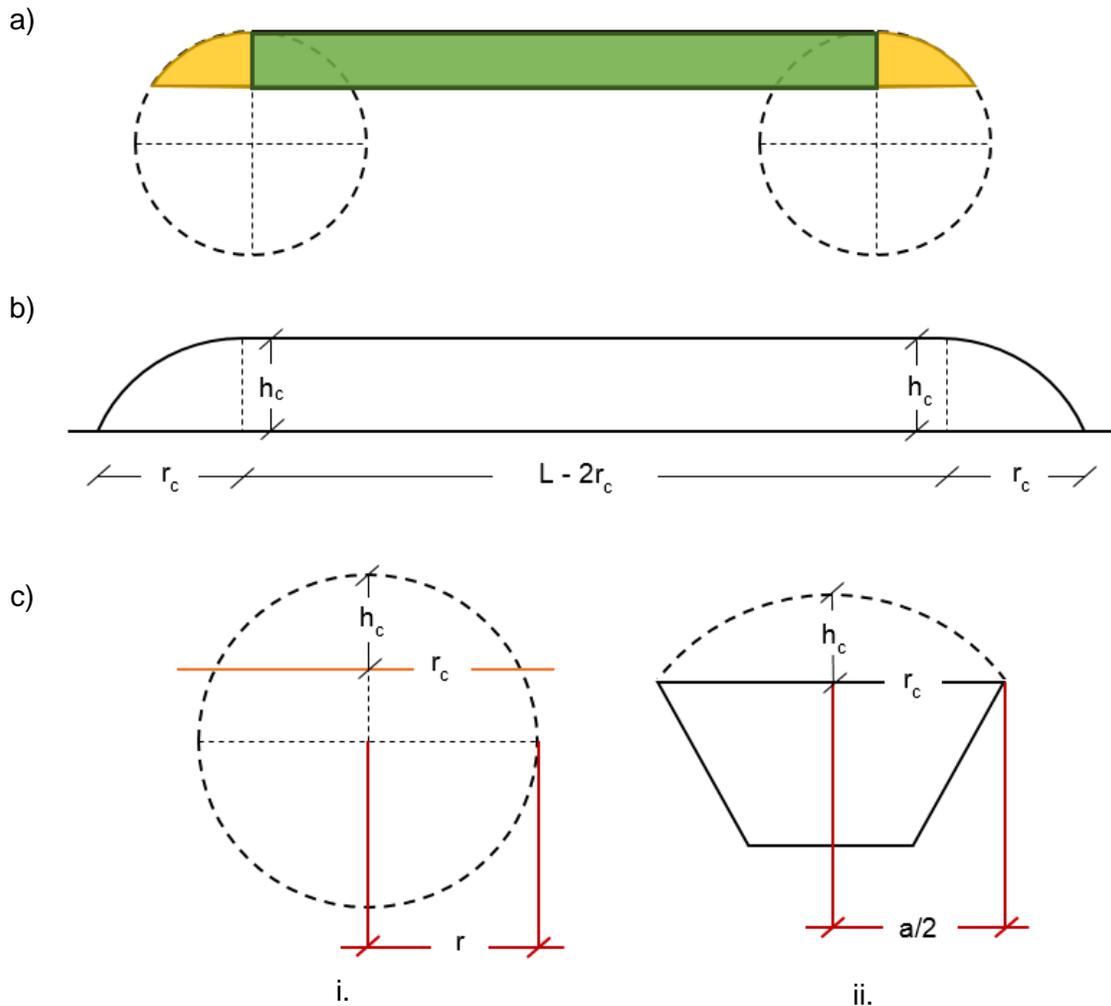
Continúa...

Tabla A22.2: Matriz para cálculo de dimensiones de zanja de biodigestor de laguna cubierta.

Volumen de C.F (m <sup>3</sup> )	A (m)	Ai (m)	As (m)	d (m)	Li (m)	Ls (m)	Lp (m)	Relación d:L
31.20	1.10	1.60	4.02	2.81	8.71	11.13	9.92	3.53
31.20	1.10	1.70	4.12	2.91	8.37	10.79	9.58	3.29
31.20	1.10	1.80	4.22	3.01	8.05	10.47	9.26	3.08
31.20	1.10	1.90	4.32	3.11	7.75	10.17	8.96	2.88
31.20	1.10	2.00	4.42	3.21	7.47	9.89	8.68	2.71
31.20	1.20	0.50	3.14	1.82	12.65	15.29	13.97	7.67
31.20	1.20	0.60	3.24	1.92	11.92	14.56	13.24	6.90
31.20	1.20	0.70	3.34	2.02	11.26	13.90	12.58	6.23
31.20	1.20	0.80	3.44	2.12	10.67	13.31	11.99	5.66
31.20	1.20	0.90	3.54	2.22	10.13	12.77	11.45	5.16
31.20	1.20	1.00	3.64	2.32	9.64	12.28	10.96	4.72
31.20	1.20	1.10	3.74	2.42	9.18	11.82	10.50	4.34
31.20	1.20	1.20	3.84	2.52	8.77	11.41	10.09	4.00
31.20	1.20	1.30	3.94	2.62	8.38	11.02	9.70	3.70
31.20	1.20	1.40	4.04	2.72	8.03	10.67	9.35	3.44
31.20	1.20	1.50	4.14	2.82	7.69	10.33	9.01	3.20
31.20	1.20	1.60	4.24	2.92	7.39	10.03	8.71	2.98
31.20	1.20	1.70	4.34	3.02	7.10	9.74	8.42	2.79
31.20	1.20	1.80	4.44	3.12	6.83	9.47	8.15	2.61
31.20	1.20	1.90	4.54	3.22	6.57	9.21	7.89	2.45
31.20	1.20	2.00	4.64	3.32	6.34	8.98	7.66	2.31
31.20	1.30	0.50	3.36	1.93	10.65	13.51	12.08	6.26
31.20	1.30	0.60	3.46	2.03	10.06	12.92	11.49	5.66
31.20	1.30	0.70	3.56	2.13	9.52	12.38	10.95	5.14
31.20	1.30	0.80	3.66	2.23	9.03	11.89	10.46	4.69
31.20	1.30	0.90	3.76	2.33	8.58	11.44	10.01	4.30
31.20	1.30	1.00	3.86	2.43	8.17	11.03	9.60	3.95
31.20	1.30	1.10	3.96	2.53	7.79	10.65	9.22	3.64
31.20	1.30	1.20	4.06	2.63	7.44	10.30	8.87	3.37
31.20	1.30	1.30	4.16	2.73	7.11	9.97	8.54	3.13
31.20	1.30	1.40	4.26	2.83	6.81	9.67	8.24	2.91
31.20	1.30	1.50	4.36	2.93	6.53	9.39	7.96	2.72

Fuente: Elaboración propia

**ANEXO A23: DIMENSIONAMIENTO DE LA CÚPULA, TOMANDO ÉSTA COMO UN VOLUMEN CONFORMADO POR LA MITAD DE UN CASCARÓN ESFÉRICO EN CADA UNO DE LOS EXTREMOS LATERALES Y EN EL MEDIO, UN SEGMENTO DE MEDIO CILINDRO ELÍPTICO.**



*Nota: a) Corte lateral: Representación geométrica de los cortes de los cascarones esféricos y el segmento cilíndrico semielíptico. b) Corte lateral: dimensiones de la cúpula, atendiendo a la distribución geométrica presentada en literal a). c) Corte frontal: i. Representación geométrica del corte frontal de la cúpula. ii. Dimensiones de la cúpula, atendiendo a la distribución geométrica presentada en i.*

*Figura A23.1: Aproximaciones de volumen de cúpula. Fuente: Elaboración propia.*

El volumen de la cúpula, como puede apreciarse en la figura A23.1 viene dado por:

$$V_t = V_{medio\ cil.elíptico} + 2 \frac{V_{cascarón\ esf.}}{2}$$

$$V_t = V_{medio\ cil.elíptico} + V_{cascarón\ esf.}$$

Ecuación A23. 1

Donde el radio del cascarón esférico, equivale a la mitad del ancho superior de la zanja del biodigestor; tal como se observa en el literal c) de la figura A23.1 encontrando la expresión de volumen para cada uno de los segmentos antes mencionados se tiene:

#### Determinación de la expresión del volumen del cascarón esférico

Según Martel Moreno (2000), el volumen de este puede ser calculado por medio de la ecuación A32.2:

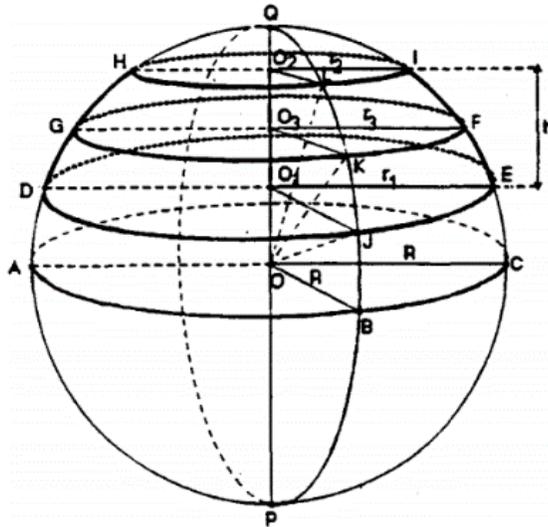


Figura A23.2: Diferentes segmentos de cascarones esféricos. Fuente: Martel Moreno (2000).

$$V_{cascarón} = \frac{1}{3} \pi h^2 (3R - h)$$

Ecuación A23. 2

Debido a que no se conoce el radio de la esfera a la que pertenece este cascarón esférico, es necesario expresar en términos conocidos el volumen, el procedimiento seguido fue el siguiente:

A partir del radio del casquete esférico se trazó un triángulo rectángulo utilizando como uno de los vértices el centro de la esfera, como se muestra en la figura A23.3:

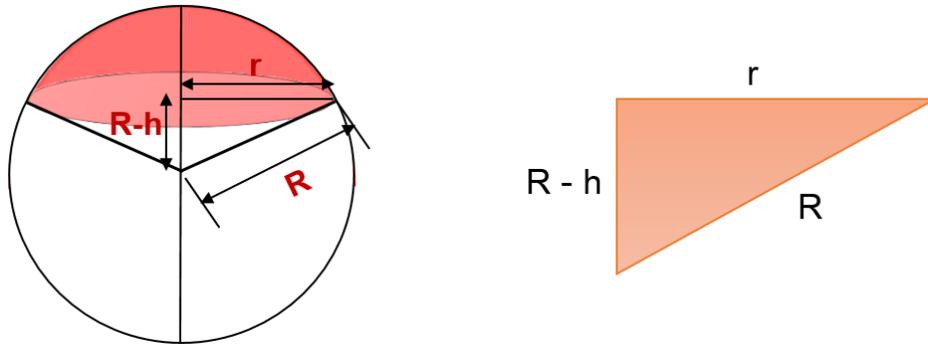


Figura A23.3: Representación de casquete esférico. Fuente: Elaboración propia.

Donde:

R = radio de la esfera

r = radio del cascarón esférico

h = altura de la cúpula del biodigestor

Seguidamente, se procede a expresar el radio de la esfera, en función de valores que son conocidos o pueden ser calculados para el dimensionamiento los cuales son el radio del cascarón y altura del cascarón. Esto se realiza, empleando el teorema de Pitágoras:

$$R^2 = r^2 + (R - h)^2$$

$$r^2 = R^2 - (R - h)^2$$

$$r^2 = R^2 - (R^2 - 2Rh + h^2)$$

$$r^2 = \cancel{R^2} - \cancel{R^2} + 2Rh - h^2$$

$$r^2 + h^2 = 2Rh$$

Ecuación A23. 3

$$R = \frac{r^2 + h^2}{2h}$$

Sustituyendo la ecuación A23.3 en la ecuación A23.2:

$$V_{cascarón} = \frac{1}{3}\pi h^2(3R - h)$$

$$V_{cascarón} = \frac{1}{3}\pi h^2\left(\frac{3r^2 + 3h^2}{2h} - h\right)$$

$$V_{cascarón} = \frac{1}{3}\pi h^2\left(\frac{3r^2 + 3h^2 - 2h^2}{2h}\right)$$

$$V_{cascarón} = \frac{1}{3}\pi h^2\left(\frac{3r^2 + h^2}{2h}\right)$$

$$V_{cascarón} = \frac{1}{6}\pi h(3r^2 + h^2)$$

Ecuación A23. 4

### Determinación de la expresión del volumen del cilindro semielíptico

Para determinar el segmento de medio cilindro elíptico se toma el área de una media elipse como:

$$A_{med.elipse} = \frac{\pi \times a \times b}{2}$$

Ecuación A23. 5

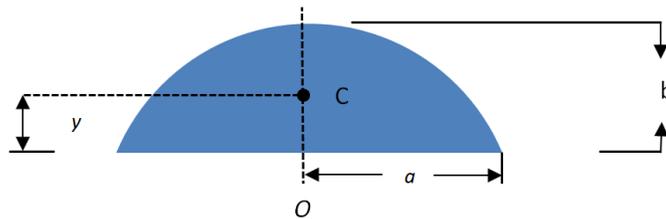


Figura A23.4: Área de una media elipse. Fuente: Elaboración propia

Al sustituir “a” y “b” por las expresiones utilizadas para el dimensionamiento del biodigestor, se tiene:

$$A_{med.elipse} = \frac{\pi \times r \times h}{2}$$

Para el cálculo del volumen, el área anterior obtenida debe multiplicarse por la longitud del segmento perteneciente al medio cilíndrico elíptico. Para esto, es necesario el cálculo de dicha longitud la cual, como se puede observar en la figura A23.4, se obtiene mediante la resta del radio que pertenece al ancho superior de la zanja, a la longitud superior. La ecuación A23.6 describe este procedimiento:

$$L_{medio\ cil.elíptico} = L_s - 2r_{sup.de\ zanja}$$

*Ecuación A23. 6*

De esta forma, la expresión para el cálculo del volumen de la cúpula del biodigestor queda expresada de la siguiente forma:

$$V_{medio\ cil.elíptico} = \frac{\pi \times r \times h}{2} (L_s - 2r_{sup.de\ zanja})$$

*Ecuación A23. 7*

Sustituyendo por:

$$r = \frac{A_s}{2}$$

$$V_{medio\ cil.elíptico} = \frac{\pi \times \frac{A_s}{2} \times h}{2} \left( L_s - 2 \frac{A_s}{2} \right)$$

$$V_{medio\ cil.elíptico} = \frac{\pi \times \frac{A_s}{2} \times h}{2} (L_s - A_s)$$

*Ecuación A23. 8*

De esta forma, el cálculo para encontrar el volumen de la cúpula del biodigestor es:

$$V_t = V_{\text{medio cil.elíptico}} + V_{\text{cascarón esf.}}$$

$$V_t = \frac{\pi \times \frac{A_s}{2} \times h}{2} (L_s - A_s) + \frac{1}{6} \pi h \left( 3 \left( \frac{A_s}{2} \right)^2 + h^2 \right)$$

Ecuación A23. 9

Sustituyendo los valores respectivos y encontrando el valor de “h”:

$$1.20 * 8.67 \text{ m}^3 = \frac{\pi \times \frac{3.20 \text{ m}}{2} \times h}{2} (15.80 \text{ m} - 3.20 \text{ m}) + \frac{1}{6} \pi h \left( 3 \left( \frac{3.20}{2} \right)^2 + h^2 \right)$$

$$h = 0.26 \text{ m}$$

Por conveniencia, este valor se aproximará a 0.30 m.

De esta forma, el valor del perímetro superior de la cúpula es:

$$p = \frac{\pi \left[ 3(r + h) - \sqrt{(3r + h)(r + 3h)} \right]}{2}$$

Dejando en función de la terminología empleada:

$$p = \frac{\pi \left[ 3 \left( \frac{A_s}{2} + h \right) - \sqrt{\left( 3 \frac{A_s}{2} + h \right) \left( \frac{A_s}{2} + 3h \right)} \right]}{2}$$

$$p = \frac{\pi \left[ 3 \left( \frac{3.20}{2} \text{ m} + 0.30 \text{ m} \right) - \sqrt{\left( 3 \left( \frac{3.20}{2} \text{ m} \right) + 0.30 \text{ m} \right) \left( \frac{3.20}{2} \text{ m} + 3(0.30 \text{ m}) \right)} \right]}{2}$$

$$p = 3.35 \text{ m}$$

Con el resultado anterior y reuniendo los siguiente se comprueba que el ancho de la geomembrana calculado mediante las dos formas descritas, resulta en valores muy cercanos (ver tabla A23.1).

*Tabla A23 1: Comparación de resultados de dimensionamientos de laguna cubierta*

<b>Zanja</b>	<b>Cúpula como un volumen conformado por dos mitades de un cascarón esférico y un segmento de medio cilindro elíptico.</b>	<b>Cúpula como un medio cilindro elíptico.</b>
$A_s = 3.20 \text{ m}$		
$A_i = 1.00 \text{ m}$	Largo = 15.80 m	Largo = 15.80 m
$A = 1.00 \text{ m}$		
$L_s = 15.80 \text{ m}$	Ancho = 3.31 m	Ancho = 3.35 m
$L_i = 13.60 \text{ m}$		

*Fuente: Elaboración propia*

## ANEXO A24: DIMENSIONAMIENTO DE CÚPULA TOMANDO ÉSTA COMO UN MEDIO CILINDRO ELÍPTICO.

Una vez identificados los valores que cumplen con esta relación óptima, se procede a calcular las dimensiones de la cúpula:

Debido a que ya se conoce el valor del ancho y largo superior; y se sabe el volumen gaseoso que estará contenido en la parte superior del biodigestor ( $8.67\text{m}^3 + 20\%$  de factor de seguridad o sobredimensionamiento), se procede a calcular la altura de la cúpula por medio de la ecuación A24.1.

Tomando el área de una media elipse como:

$$A_{med.elipse} = \frac{\pi \times a \times b}{2}$$

*Ecuación A24. 1*

Al sustituir “a” y “b” por las expresiones utilizadas para el dimensionamiento del biodigestor, se tiene:

$$A_{med.elipse} = \frac{\pi \times r \times h}{2}$$

Debido a que se considera que toda la cúpula forma un medio cilindro elíptico, la longitud de este cilindro será igual a la longitud máxima del biodigestor, como se muestra en la ecuación A24.2

$$V_{seg. semielíptico} = \frac{\pi \times \frac{A_s}{2} \times h}{2} (L_s)$$

*Ecuación A24. 2*

Donde:

$\frac{A_s}{2}$  = mitad del ancho superior del biodigestor

h = altura de la cúpula

$L_s$  = largo superior del biodigestor

Encontrando el valor de la altura

$$h = \frac{2 * V_{seg. \text{ semielíptico}}}{\pi * \frac{A_s}{2} * L_s}$$

Ecuación A24. 3

Sustituyendo

$$1.20 * 8.67 \text{ m}^3 = \frac{\pi * \frac{3.20 \text{ m}}{2} * h}{2} (15.80 \text{ m})$$

$$h = 0.262 \text{ m}$$

Cabe recordar que, si bien las ecuaciones para el dimensionamiento de las cúpulas están en función de altura y radio, el valor más importante a obtener es el valor del perímetro del segmento de la media elipse, a partir de la aproximación de Ramanujan (la ecuación A24.4), se obtiene el valor del ancho real de la geomembrana teniendo en cuenta la altura a la que se espera que llegue la cúpula. La figura A24.1 muestra lo anteriormente descrito:

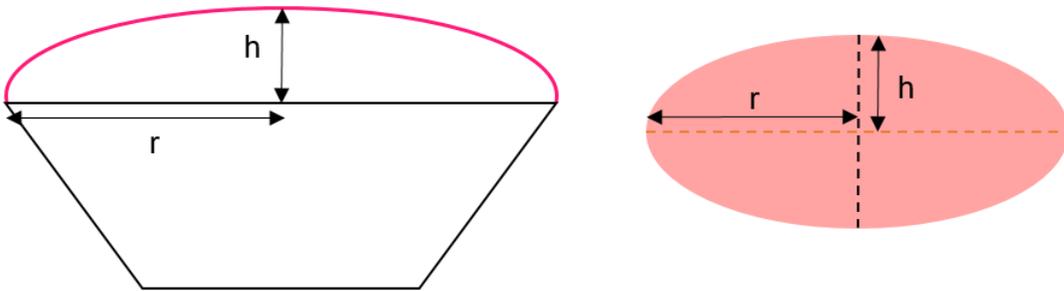


Figura A24.1: Comparación de parámetros de geometría entre la forma de cúpula y media elipse.  
Fuente: Elaboración propia.

$$p = \pi \left[ 3(r + h) - \sqrt{(3r + h)(r + 3h)} \right]$$

Ecuación A24. 4

Sustituyendo por las variables empleadas

$$p_{c\acute{u}pula} = \frac{\pi \left[ 3 \left( \frac{A_s}{2} + h \right) - \sqrt{\left( 3 \frac{A_s}{2} + h \right) \left( \frac{A_s}{2} + 3h \right)} \right]}{2}$$

*Ecuación A24. 5*

$$p_{c\acute{u}pula} = \frac{\pi \left[ 3 \left( \frac{3.20 \text{ m}}{2} + 0.26 \text{ m} \right) - \sqrt{\left( 3 * \frac{3.20 \text{ m}}{2} + 0.22 \text{ m} \right) \left( \frac{3.20 \text{ m}}{2} + 3(0.26 \text{ m}) \right)} \right]}{2}$$

$$p_{c\acute{u}pula} = 3.31 \text{ m}$$

## ANEXO A25: ESPECIFICACIONES E INSTRUCCIONES DE INSTALACIÓN DE LA GEOMEMBRANA

### Unión de geomembrana (SEMARNAT, SAGARPA, FIRCO, 2010)

Para este caso, se debe construir una zanja perimetral para anclaje de la geomembrana:

- Con una altura de medio metro de distancia desde inicio del talud.
- Construida con ladrillo y concreto de  $f'c = 150 \text{ kg/cm}^2$ , con un espesor de 0.40 m.
- Se rellenara con tierra producto de la misma excavación y se compactara con medios mecánicos.

Esto con el fin de facilitar la unión de la geomembrana de la cúpula y de la cubierta de la zanja. Para el proceso de colocación de la geomembrana:

- Se coloca la geomembrana sobre la base y taludes, bien conformados y compactados;
- Se utiliza una barra mecánica para agilizar el tendido, traslapando los lienzos adyacentes 5 pulgadas para su termofusión (Ver figura A25.1).
- Realizar dos veces la termofusión a una distancia de aproximadamente de 5 pulgadas una de otra (Ver figura A25.2).

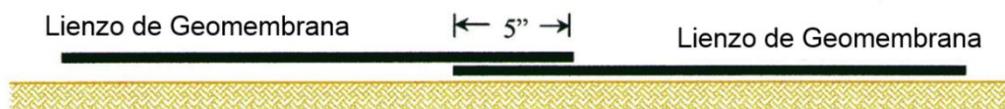


Figura A25. 1: Forma de colocar la geomembrana para asegurar una buena termofusión.  
Fuente: SEMARNAT, SAGARPA, FIRCO (2010)

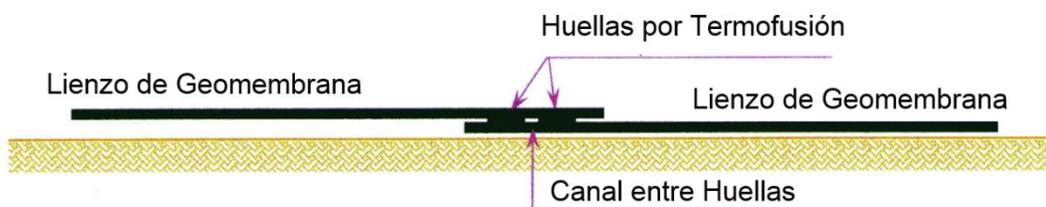


Figura A25.2: Huellas de termofusión y canal entre las Huellas.  
Fuente: SEMARNAT, SAGARPA, FIRCO (2010)

Así, la forma del biodigestor se muestra en la figura A25.3:

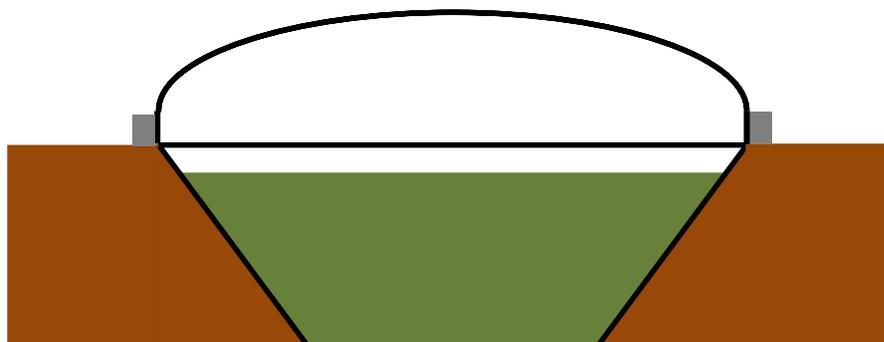


Figura A25. 3: Vista frontal biodigestor laguna cubierta. Fuente: Elaboración propia

Para los biodigestores, la membrana que se colocará para la hermeticidad del biodigestor, deberá cumplir con las normas descritas en los estándares GM13 y GM 17 del Instituto de Investigación de Geosintéticos (GRI por sus siglas en inglés). La geomembrana, que se considere utilizar para la implementación de este tipo de propuesta, deberá cumplir como mínimo con las propiedades presentadas en la tabla A25.1.

Tabla A25.1: Propiedades mínimas consideradas en la selección de geomembrana

Propiedad	Unidad	Valor Nominal
Densidad	Kg/m <sup>3</sup>	940
Resistencia al Desgaste	N	210
Resistencia al Límite Elástico	N/mm	25
Estiramiento al Límite Elástico	%	13
Resistencia a la Rotura	N/mm	43
Estiramiento a la Rotura	%	700

Fuente: SEMARNAT, SAGARPA, FIRCO (2010).

Asimismo, el proveedor debe garantizar que la geomembrana seleccionada resista a las características y presión del biogás, desgaste por radiación ultravioleta, temperaturas ambientales e internas, entre otras. El instalador deberá presentar certificados de las

pruebas de inicio, rendimiento y destructivas (presión de aire y vacío) de acuerdo con los lineamientos o estándares internacionales o en su caso, nacionales a los que sujeten estas geomembranas (estándar GRI-GM, ASTM, entre otros). El ejecutor de la propuesta deberá verificar el certificado original de calidad de cada uno de los rollos entregados por las empresas, para comprobar el origen y calidad del material a instalar. El espesor de la geomembrana que cubrirá la base del biodigestor deberá ser de al menos 60 milésimas de pulgada (1.5 mm) y debe ser igual al de la cubierta, para evitar rupturas en el material más débil, en caso de incrementos de presión por acumulación de biogás.

La vida útil de estas geomembranas es de más de 20 años, por lo que sería recomendable que las mismas se garanticen por al menos 10 años. El trabajo de instalación debe ser ejecutado por técnicos calificados (al menos el responsable del grupo de instaladores), con experiencia probada, de ser posible, certificados por la Asociación Internacional de Instaladores de Geosintéticos (IAGI por sus siglas en inglés).

Durante la instalación, se deben observar todas las recomendaciones de los fabricantes de geomembranas para el despliegue de materiales, como son: temperaturas, resistencias, condiciones climáticas adecuadas, traslape del material de al menos 5 pulgadas para la termofusión. Se deberá realizar un reporte de control de calidad al final del proyecto.

El tendido del material dependiendo de la geometría para la propuesta se deberá utilizar herramientas especializadas que prevengan daños en la geomembrana. La soldadura en los traslapes debe ser hecha por el método de termofusión. Las soldaduras perimetrales entre el revestimiento primario y la cubierta, así como las reparaciones de las soldaduras con defectos, deberán realizarse con soldadura por extrusión.

## ANEXO A26: DIMENSIONAMIENTO DEL AGITADOR DEL BIODIGESTOR DE LAGUNA CERRADA

De igual forma que para el primer sistema de mezclado, las relaciones de las dimensiones para este tipo de agitador, se encuentran establecidas y son (Brown, y otros, 2006):

$$\frac{D_t}{D_i} = 3$$

*Ecuación A26. 1*

$$\frac{Z_i}{D_i} = 1.3$$

*Ecuación A26. 2*

Tomando el ancho inferior de la laguna cubierta como diámetro de tanque, se obtiene el diámetro del agitador mediante la ecuación A26.1:

$$\begin{aligned}\frac{D_t}{D_i} &= 3 \\ \frac{D_t}{3} &= D_i \\ D_i &= \frac{1.00}{3} \\ D_i &= 0.33 \text{ m}\end{aligned}$$

Determinando la distancia respecto al fondo del biodigestor, de las hélices mediante la ecuación A26.2:

$$\begin{aligned}\frac{Z_i}{D_i} &= 1.3 \\ Z_i &= 1.3 * D_i \\ Z_i &= 0.43 \text{ m}\end{aligned}$$

Se utiliza la ecuación A26.3 para el cálculo de la potencia del agitador. Para este caso, el valor de K es 0.5 (McCabe, Smith, & Harriott, 2007) y asumiendo una eficiencia del 75%. Sustituyendo por los valores correspondientes:

$$P_{teórica} = K\rho N^3 d^5$$

Ecuación A26. 3

$$P_{real} = \frac{(0.5) \left( 1001.964 \frac{kg}{m^3} \right) \left( 200 \text{ RPM} * \frac{0.017 \text{ RPS}}{1 \text{ RPM}} \right)^3 (0.429 \text{ m})^5}{0.75}$$

$$P_{real} = 359.49 \text{ W} * \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}} = 0.36 \text{ kW}$$

$$P_{real} = 0.36 \text{ kW} * \frac{1.34 \text{ HP}}{1 \text{ kW}} = 0.48 \text{ HP}$$

El requerimiento mínimo para el motor del agitador perteneciente al biodigestor, es 0.48 HP. Este valor se aproxima al siguiente mayor debido a que se necesitan potencias ofrecidas en el mercado; de esta forma, la potencia necesaria del motor para el agitador del biodigestor de laguna cubierta es de ½ HP.

## ANEXO A27: DIMENSIONAMIENTO DE LA BOMBA DE SUCCIÓN DE LODOS

### Bomba de succión de lodos para biodigestor de laguna cubierta

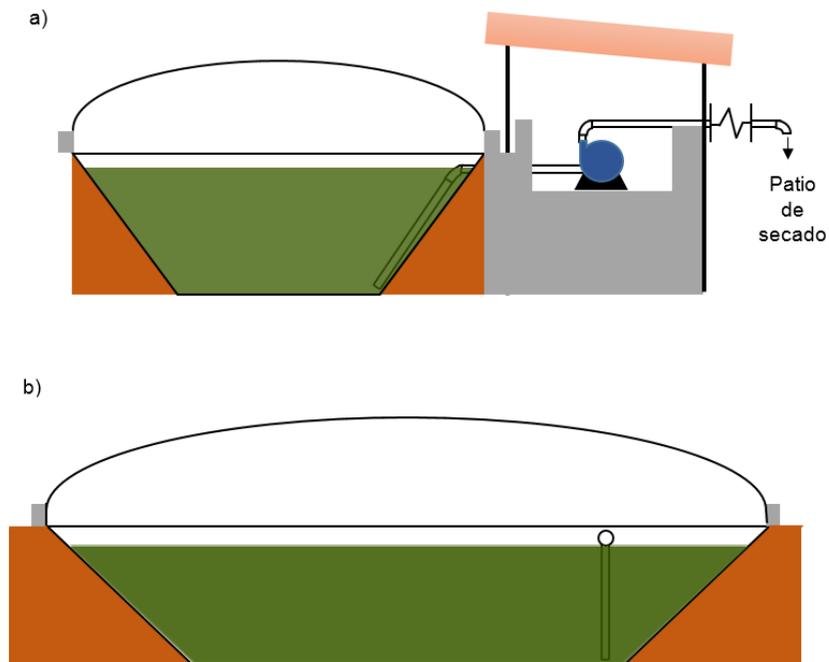


Figura A27.1: Ubicación de la bomba de succión de lodos. a) Corte frontal b) corte transversal.  
Fuente: elaboración propia.

Para determinar la potencia de la bomba del biodigestor de laguna cerrada, se recurre a la ecuación A27.1.

$$P_{real} = \frac{\rho_{descarga} * g * Q * H_B}{\eta}$$

Ecuación A27. 1

Se procede a calcular la altura diferencial de la bomba mediante el uso de la ecuación A27.2.

$$H_B = h_f + \left[ \frac{P_2}{\rho * g} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right] - \left[ \frac{P_1}{\rho * g} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right]$$

Ecuación A27. 2

**Punto 1:**

Altura de elevación = 0.20 m

Altura de presión = 1.0025 bar

Presión de velocidad = 0 (casi no existe velocidad)

**Punto 2:**

Altura de elevación = 1.05 m

Altura de presión = 1 bar (presión atmosférica)

Presión de velocidad =  $\frac{V_2^2}{2g}$   
Donde  $V_2 = 2.50 \frac{m}{s}$ 

De este modo, la expresión de la altura diferencial de la bomba queda expresada de la siguiente forma:

$$H_B = h_f + (Z_2 - Z_1) + \left( \frac{P_2}{\rho * g} - \frac{P_1}{\rho * g} \right) + \frac{V_2^2}{2g}$$

$$1.0025 \text{ bar} * \frac{0.987 \text{ atm}}{1 \text{ bar}} * \frac{101325 \text{ Pa}}{1 \text{ atm}} = 100,257.794 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ bar} * \frac{0.987 \text{ atm}}{1 \text{ bar}} * \frac{101325 \text{ Pa}}{1 \text{ atm}} = 100,007.775 \text{ Pa}$$

$$H_b = h_f + (1.65 \text{ m}) + \left( \frac{100,257.794 \text{ Pa}}{1001.964 \frac{kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2}} - \frac{100,007.775 \text{ Pa}}{1001.964 \frac{kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2}} \right) + \frac{\left( 2.50 \frac{m}{s} \right)^2}{2 * 9.81 \frac{m}{s^2}}$$

$$H_b = h_f + 1.99 \text{ m}$$

Calculando las pérdidas por medio de las ecuaciones A27.3 y A27.4:

$$h_{fp} = 10.674 \left( \frac{Q^{1.852}}{C^{1.852} * D^{4.871}} \right) * L$$

Ecuación A27.3

$$h_{Ls} = \sum \frac{K_L * V^2}{2 * g}$$

Ecuación A27.4

Para el sistema antes descrito, se estima que se utilizarán aproximadamente 7.5 m de tubería de PVC. De nuevo, el diámetro estará calculado a partir de la ecuación A27.5 tomando en cuenta que para este tipo de fluido, el caudal recomendable se encuentra entre 0.9 y 7.5 m<sup>3</sup>/h (Mott, 2006); para fines de la propuesta, se selecciona un caudal de 6.0 m<sup>3</sup>/h y para lograr obtener una velocidad de succión de 0.6 m/s.

$$D_{tubería} = \sqrt{\frac{4 * Q}{\pi * V}}$$

*Ecuación A27.5*

Sustituyendo y encontrando el diámetro de la tubería:

$$D_{tubería} = \sqrt{\frac{4 * \frac{6.0 \text{ m}^3}{\text{h}} * \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}}}{\pi * 0.6 \frac{\text{m}}{\text{s}}}}$$

$$D_{tubería} = 0.059 \text{ m} \cong 0.06 \text{ m}$$

Se determinó anteriormente que el valor del coeficiente de Hazen & William para las tuberías de PVC es 145. De nuevo, se aproxima el valor del diámetro de la tubería al valor correspondiente en pulgadas de diámetro de tubería a la venta; este valor corresponde a 2 ½ " o 0.0635 m (6.35 cm). Sustituyendo en la ecuación de Hazen & William, se obtienen las pérdidas debido a la tubería:

$$h_{fp} = 10.674 \left( \frac{Q^{1.852}}{C^{1.852} * D^{4.871}} \right) * L$$

$$h_{fp} = 10.674 \left( \frac{\left( \frac{6.0 \text{ m}^3}{\text{h}} * \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} \right)^{1.852}}{(145)^{1.852} * (0.0635 \text{ m})^{4.871}} \right) * (7.50 \text{ m})$$

$$h_{fp} = 0.0386 \cong 3.69 \text{ cm}$$

El sistema consta de un codo suave de PVC de 45° y dos codos suaves de 90°. Según Mendoza, Carval, Saldarriaga (2011), el valor del coeficiente de pérdida para codos suaves de 90° PVC, es  $K_L = 1.10$  y para codos suaves de 45° PVC, es  $K_L = 0.4$ . Encontrando el valor de las pérdidas secundarias:

$$h_{fs} = \sum \frac{K_L * V^2}{2 * g}$$

Sustituyendo los valores correspondientes a cada variable:

$$h_{fs} = 2 * \frac{1.10 * \left(0.6 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9.81 \frac{m}{s^2}} + \frac{0.4 * \left(0.6 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9.81 \frac{m}{s^2}}$$

$$h_{fs} = 0.048 m$$

Y el valor de las pérdidas totales es

$$h_f = h_{fp} + h_{fs}$$

$$h_f = 0.0386 m + 0.048 m = 0.09 m$$

Sustituyendo para encontrar la altura diferencial de la bomba:

$$H_B = h_f + 1.99 m$$

$$H_B = 0.09 m + 1.99 m$$

$$H_B = 2.08 m$$

Encontrando la eficiencia de la bomba por medio de la ecuación A27.6 y asumiendo una eficiencia del 40%

$$P_{real} = \frac{\rho_{descarga} * g * Q * H_B}{\eta}$$

*Ecuación A27.6*

$$P_{real} = \frac{1001.48 \frac{kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2} * \left(6.0 \frac{m^3}{h} * \frac{1 h}{60 min} * \frac{1 min}{60 seg}\right) * 2.08 m}{0.40}$$

$$P_{real} = 85.14 W$$

Convirtiendo esto a HP:

$$85.14 W * \frac{1 kW}{1000 W} * \frac{1.34 HP}{1 kW} = 0.11 HP$$

La potencia mínima requerida por la bomba para la succión de la descarga homogeneizada, es 0.11 HP. Debido a que en el mercado, la potencia mínima de trabajo de las bombas es de ½ HP, la potencia de la bomba de succión de lodos se aproximará a este valor.

#### Bomba de succión de lodos para biodigestores tubulares

Este tipo de biodigestores cuentan con una salida en la parte inferior para extraer los lodos, cada biodigestor contara con una bomba para extracción de lodos, con las mismas características que para un biodigestor de laguna cubierta, a continuación se estima la potencia de la bomba.

Para estimar la potencia de la bomba se recurre a la ecuación A27.2:

##### **Punto 1:**

Altura de elevación = 0 m

Altura de presión = 1.13 bar

Presión de velocidad = 0 (casi no existe velocidad)

##### **Punto 2:**

Altura de elevación = 1.23 m

Altura de presión = 1.00 bar  
(presión atmosférica)

Presión de velocidad =  $\frac{V_2^2}{2g}$

Donde  $V_2 = 2.50 \frac{m}{s}$

De este modo, la expresión de la altura diferencial de la bomba queda expresada de la siguiente forma:

$$H_B = h_f + (Z_2 - Z_1) + \left( \frac{P_2}{\rho * g} - \frac{P_1}{\rho * g} \right) + \frac{V_2^2}{2g}$$

$$1.13 \text{ bar} * \frac{0.987 \text{ atm}}{1 \text{ bar}} * \frac{101325 \text{ Pa}}{1 \text{ atm}} = 113,008.79 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ bar} * \frac{0.987 \text{ atm}}{1 \text{ bar}} * \frac{101325 \text{ Pa}}{1 \text{ atm}} = 100,007.78 \text{ Pa}$$

$$H_B = h_f + (0.20 \text{ m}) + \left( \frac{113,008.79 \text{ Pa}}{1001.964 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} - \frac{100,007.78 \text{ Pa}}{1001.964 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \right) + \frac{\left( 2.50 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2}{2 * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$$

$$H_B = h_f + 1.84 \text{ m}$$

Calculando las pérdidas por medio de las ecuaciones A27.3 y A27.4 y las mismas especificaciones que para el biodigestor de laguna cubierta de una longitud de tubería PVC aproximada de 7.5m un caudal de 6 m<sup>3</sup>/h, una velocidad de succión de 0.6 m/s dando un diámetro de tubería igualmente de 0.06 m, aproximando su valor a 2 ½" in. Sustituyendo en la ecuación de Hazen & William, se obtienen las pérdidas debido a la tubería de 3.69 cm.

El sistema consta de un codo suave de 90° y un codo suave de 45°, siendo de las perdidas secundarias de 0.028 m, tal como el cálculo realizado para el biodigestor de laguna cerrada, dando un valor de pérdidas de carga por fricción de 0.0626 m. Sustituyendo para encontrar la altura diferencial de la bomba:

$$H_B = h_f + 1.84 \text{ m}$$

$$H_B = 0.0626 \text{ m} + 1.84 \text{ m} = 1.90 \text{ m}$$

Encontrando la potencia de la bomba por medio de la ecuación A27.6 y asumiendo una eficiencia del 40%

$$P_{real} = \frac{1001.962 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * \left( 6.0 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} \right) * 1.90 \text{ m}}{0.40}$$

$$P_{real} = 77.82 \text{ W}$$

Convirtiendo esto a HP:

$$51.88 \text{ W} * \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}} * \frac{1.34 \text{ HP}}{1 \text{ kW}} = 0.10 \text{ HP}$$

La potencia mínima requerida por la bomba para la succión de la descarga homogeneizada, es de 0.10 HP. Debido a que en el mercado, la potencia mínima de trabajo de las bombas es de ½ HP, la potencia de la bomba de succión de lodos se aproximará a este valor.

## ANEXO A28: DIMENSIONAMIENTO DE LA LAGUNA DE BIOL (TANQUE DE DESCARGA DEL BIODIGESTOR)

El volumen de la laguna de Biol viene dado por la cantidad de agua de salida del biodigestor por lo que, tomando en cuenta la cantidad de sustrato que es convertida a lodos, la cantidad de agua descargada a esta laguna es determinada de la siguiente forma:

$$V_{des.l\grave{a}q.biodig.} = Q_{entrada\ del\ biodigestor} - 0.1 \times Q_{entrada\ del\ biodigestor}$$

*Ecuación A28. 1*

$$V_{des.l\grave{a}q.biodig.} = 1.346m^3 - 0.1 \times 1.346m^3$$

$$V_{des.l\grave{a}q.biodig.} = 1.2114 m^3$$

Al igual que todas las construcciones y tanques anteriores, se le asigna un factor de seguridad o sobredimensionamiento, equivalente al 20% del volumen total, debido a esto, el volumen necesario de esta laguna de Biol es igual a:

$$V_{des.l\grave{a}q.biodig.} = 1.20 \times 1.2114 m^3$$

$$V_{des.l\grave{a}q.biodig.} = 1.454 m^3$$

Por conveniencia de espacio y aprovechando el efecto de la inclinación y la gravedad, se propone una laguna de Biol que posea una profundidad de 0.30m y una geometría rectangular.

Se mantendrá la misma relación óptima ancho-largo igual a siete, que posee el biodigestor. De esta forma dejando en términos del ancho de la laguna de Biol la ecuación A28.2 la cual representa el volumen de un paralelogramo, se obtienen las dimensiones restantes de la laguna de Biol:

$$V_{L.biol} = a * L * h$$

*Ecuación A28. 2*

Donde:

$V_{L.biol}$  = Volumen de la laguna de biol

$a$  = Ancho de la laguna de biol

$L$  = Largo de laguna de biol

$h$  = Altura de laguna de biol

Como:

$$L = 7 * a$$

Ecuación A28. 3

Sustituyendo en la ecuación A28.2 y despejando para encontrar el ancho:

$$V_{L.biol} = a * L * h$$

$$V_{L.biol} = a * (7 * a) * 0.30 \text{ m}$$

$$1.454 \text{ m}^3 = 7 * a^2 * 0.30 \text{ m}$$

$$a = \sqrt{\frac{1.454 \text{ m}^3}{0.30 \text{ m} * 7}}$$

$$a = 0.83 \text{ m}$$

Entonces el largo de la laguna de Biol, sería:

$$L = 7 * a$$

$$L = 7 * 0.83$$

$$L = 5.81 \text{ m}$$

## ANEXO A29: DIMENSIONAMIENTO DE HOMOGENEIZADOR SECUNDARIO

El procedimiento seguido para el cálculo de las dimensiones tanto del tanque como del agitador es el mismo que para el caso del homogeneizador primario, pues se propone el uso de un agitador de paletas. De esta forma, el cálculo de las dimensiones del segundo homogeneizador:

$$\frac{D_t}{D_i} = 4.35$$

*Ecuación A29. 1*

$$\frac{Z_i}{D_i} = 0.29$$

*Ecuación A29. 2*

$$\frac{Z_t}{D_i} = 4.3$$

*Ecuación A29. 3*

$$w = 0.25 * D_i$$

*Ecuación A29. 4*

$$V_{\text{Líquido en homogeneizador}} = \frac{\pi}{4} * D_t^2 * Z_t$$

*Ecuación A29. 5*

Empleando la ecuación A29.1 y A29.2, se obtiene la siguiente igualdad:

$$\frac{Z_t}{D_i} = 4.3 \rightarrow \frac{Z_t}{4.3} = D_i$$

Se sabe:

$$\frac{D_t}{D_i} = 4.35$$

Entonces:

$$D_t = 4.35 * D_i$$

$$D_t = 4.35 * \frac{Z_t}{4.3}$$

$$D_t = 1.01163 * Z_t$$

Teniendo en cuenta que la relación  $H/D_t$  es de 1.5 la ecuación A29.5, se expresa en función del diámetro de la siguiente forma:

$$D_t = \sqrt[3]{\frac{4 * V_{\text{Líquido en homogeneizador}}}{1.01163 * \pi}}$$

*Ecuación A29. 6*

$$D_t = \sqrt[3]{\frac{4 * 1.454m^3}{1.01163 * \pi}}$$

$$D_t = 1.223 \text{ m} \cong 1.22 \text{ m}$$

La altura del homogeneizador es:

$$H = D_t * 1.5$$

*Ecuación A29. 7*

$$H = 1.22 * 1.5$$

$$H = 1.83 \text{ m}$$

Encontrando los valores de las dimensiones del agitador:

$$\frac{D_t}{D_i} = 4.35$$

$$D_i = \frac{D_t}{4.35}$$

$$D_i = \frac{1.22 \text{ m}}{4.35}$$

$$D_i = 0.28 \text{ m}$$

$$\frac{Z_i}{D_i} = 0.29$$

$$Z_i = 0.29 * D_i$$

$$Z_i = 0.29 * 0.28 \text{ m}$$

$$Z_i = 0.0812 \text{ m} \cong 0.08 \text{ m}$$

$$\frac{Z_t}{D_i} = 4.3$$

$$Z_t = 4.3 * D_i$$

$$Z_t = 4.3 * 0.28 \text{ m}$$

$$Z_t = 1.21 \text{ m}$$

Determinación del ancho de paleta del agitador con ecuación A29.4:

$$w = 0.25 * D_i$$

$$w = 0.25 * 0.28 \text{ m}$$

$$w = 0.07 \text{ m}$$

Se propone una velocidad de rotación necesaria es de 150 rpm o superior; decir:

$$150 \text{ RPM} \times \frac{0.0166667 \text{ RPS}}{1 \text{ RPM}} = 2.50 \text{ RPS}$$

Entonces, la potencia requerida es:

$$P_{teórica} = K\rho N^3 d^5$$

Ecuación A29.8

Donde:

$\rho$  = Densidad del fluido (997.975 kg/m<sup>3</sup>).

K = Constante equivalente a 6.30 (Cristancho Bello & Noy Ortíz, 2016).

N = Número de revoluciones por segundo.

D = Diámetro del impulsor o paleta.

Reemplazando los datos en la ecuación A29.9, la potencia sería:

$$P_{teórica} = K\rho N^3 d^5$$

Ecuación A29.9

$$P_{teórica} = 6.30 * 997.98 \frac{kg}{m^3} * (2.50RPS)^3 * (0.28m)^5 = 169.07 W$$

Con una eficiencia del mezclado del 75% (Cristancho Bello & Noy Ortíz, 2016):

$$P_{real} = \frac{K\rho N^3 d^5}{\eta} = \frac{P_{teórica}}{\eta}$$

Ecuación A29. 10

Donde:

$\eta$  = Eficiencia del motor perteneciente al agitador

Sustituyendo los valores correspondientes:

$$P_{real} = \frac{169.07 W}{0.75} * \frac{1 kW}{1000 W} = 0.23 kW * \frac{1.34 HP}{1 kW} = 0.31 HP$$

La potencia mínima requerida por el agitador perteneciente al homogeneizador secundario, es de 0.31 HP; por lo tanto, este se aproxima al siguiente valor de potencia ofrecidas en el mercado el cual es ½ HP.

## ANEXO A30: DIMENSIONAMIENTO DE LA BOMBA DE SUCCIÓN PARA HOMOGENEIZADOR SECUNDARIO

Para determinar la potencia de la bomba, se recurre de nuevo a la ecuación A30.1 y A30.2

$$P_{teórica} = \rho_{descarga} * g * Q * H_B$$

Ecuación A30. 1

$$P_{real} = \frac{\rho_{descarga} * g * Q * H_B}{\eta}$$

Ecuación A30. 2

Se procede a calcular la altura diferencial de la bomba mediante el uso de la ecuación A30.3, en donde:

### Punto 1:

Altura de elevación = 0.20 m

Altura de presión = 0 (presión atmosférica)

Presión de velocidad = 0 (casi no existe velocidad)

### Punto 2:

Altura de elevación = 5.20 m

Altura de presión = 0 (presión atmosférica)

Presión de velocidad =  $\frac{V_2^2}{2g}$

Donde  $V_2 = 2.50 \frac{m}{s}$

$$H_B = h_f + \left[ \frac{P_2}{\rho * g} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right] - \left[ \frac{P_1}{\rho * g} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right]$$

Ecuación A30. 3

De este modo, la expresión de la altura diferencial de la bomba queda expresada de la siguiente forma:

$$H_b = h_f + (Z_2 - Z_1) + \frac{V_2^2}{2g}$$

$$H_b = h_f + (5.20 \text{ m} - 0.20 \text{ m}) + \frac{\left(2.50 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$$

$$H_b = h_f + 5.32 \text{ m}$$

Para el sistema antes descrito, se estima que se utilizarán aproximadamente 8.00 m de tubería de PVC. De nuevo, el diámetro estará calculado a partir de la ecuación A20.9 tomando en cuenta que para este tipo de fluido, el caudal recomendable se encuentra entre 0.9 y 7.5 m<sup>3</sup>/h (Mott, 2006); para fines del proyecto, se selecciona un caudal de 6.0 m<sup>3</sup>/h y para lograr obtener una velocidad de succión de 0.6 m/s. Sustituyendo en la ecuación A20.9 y encontrando el diámetro de tubería se tiene:

$$D_{tubería} = \sqrt{\frac{4 * \frac{6.0 \text{ m}^3}{\text{h}} * \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}}}{\pi * 0.6 \frac{\text{m}}{\text{s}}}}$$

$$D_{tubería} = 0.059 \text{ m} \cong 0.06 \text{ m}$$

Se determinó anteriormente que el valor del coeficiente de Hazen & William para las tuberías de PVC es 145. De nuevo, se aproxima el valor del diámetro de la tubería a 2 ½ " o 0.0635 m (6.35 cm) y sustituyendo en la ecuación A30.4, se obtienen las pérdidas debido a la tubería:

$$h_{fp} = 10.674 \left( \frac{Q^{1.852}}{C^{1.852} * D^{4.871}} \right) * L$$

*Ecuación A30.4*

$$h_{fp} = 10.674 \left( \frac{\left(\frac{6.0 \text{ m}^3}{\text{h}} * \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}}\right)^{1.852}}{(150)^{1.852} * (0.0635 \text{ m})^{4.871}} \right) * (8.00 \text{ m})$$

$$h_{fp} = 0.0387 \text{ m} \cong 3.87 \text{ cm}$$

El sistema cuenta con cinco codos suaves de 90° ( $K_L = 1.10$ ) y una válvula “Check” ( $K_L=2.0$ ); el procedimiento a seguir para calcular las pérdidas de estos accesorios es el mismo que para la bomba de succión del homogeneizador primario. Encontrando el valor de las pérdidas secundarias:

$$h_{fs} = \sum \frac{K_L * V^2}{2 * g}$$

*Ecuación A30.5*

Donde:

$h_{fs}$  = Pérdidas secundarias

Sustituyendo los valores correspondientes a cada variable:

$$h_{fs} = 5 * \frac{1.1 * \left(0.6 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9.81 \frac{m}{s^2}} + \frac{2.0 * \left(0.6 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9.81 \frac{m}{s^2}}$$

$$h_{fs} = 0.1376 m \cong 13.76 cm$$

Entonces, las pérdidas totales tienen un valor de:

$$h_f = h_{fp} + h_{fs}$$

$$h_f = 0.0387 m + 0.1376 = 0.1763 m \cong 17.63 cm$$

Sustituyendo para encontrar la altura diferencial de la bomba:

$$H_B = h_f + 5.32 m$$

$$H_B = 0.1763 m + 5.32 m$$

$$H_B = 5.49 m \cong 5.50 m$$

Encontrando la potencia de la bomba por medio de la ecuación A30.6 y asumiendo una eficiencia de 40%:

$$P_{real} = \frac{\rho_{descarga} * g * Q * H_B}{\eta}$$

*Ecuación A30.6*

$$P_{real} = \frac{997.975 \frac{kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2} * \left(6.0 \frac{m^3}{h} * \frac{1 h}{60 min} * \frac{1 min}{60 seg}\right) * 5.50 m}{0.40}$$

$$P_{real} = 224.38 W$$

Convirtiendo esto a HP:

$$224.38 W * \frac{1 kW}{1000 W} * \frac{1.34 HP}{1 kW} = 0.30 HP$$

La potencia mínima requerida por la bomba para la succión de la descarga homogeneizada, es de 0.30 HP. Debido a que en el mercado, la potencia mínima de trabajo de las bombas es de ½ HP, la potencia de la bomba de succión de lodos se aproximará a este valor.

## ANEXO A31: DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE CLARIFICADOR.

Su diseño se expresa a continuación considerando una relación h/D igual a 1.5, y un volumen igual al homogeneizador secundario debido a que el líquido que recibirá, provendrá de este último. A continuación se presenta el procedimiento para el cálculo de las dimensiones de este tanque clarificador:

$$V_{\text{Líquido en tanque clarificador}} = 1.454 \text{ m}^3$$

Teniendo en cuenta la relación h/D mencionada anteriormente, la ecuación de la sección cilíndrica del volumen del tanque en función del diámetro, se calcula de la siguiente forma:

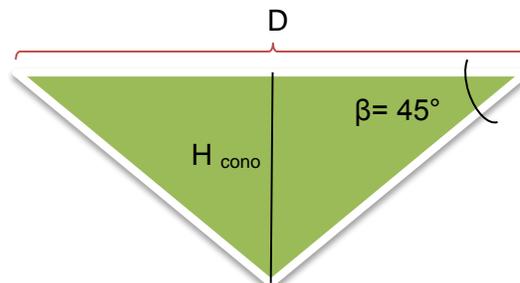
$$V_{\text{Sec.cilíndrica}} = \frac{\pi}{4} * D^2 * 1.5D$$

*Ecuación A31. 1*

$$V_{\text{Sec.cilíndrica}} = 1.5 \frac{\pi}{4} * D^3$$

*Ecuación A31. 2*

Para el cálculo de la sección cónica del tanque de clarificación donde se lleva a cabo la sedimentación de sólidos para garantizar un mayor tiempo de retención de estos, se define un ángulo de 45° respecto a la horizontal (Hernández Arizala & Leal, 2009) como está representado en la figura A31:



*Figura A31.1: Sección cónica del tanque clarificador*

Según la prueba de coagulación - floculación realizada, por cada litro de muestra se forman 400 mL de lodos, durante un tiempo de sedimentación de 1 hora aproximadamente. Esto indica que la producción de sólidos será igual a 40% del volumen total de agua residual.

Partiendo del diámetro general del tanque se determinan las demás dimensiones de la sección cónica de la siguiente forma:

$$\text{Tangente } \beta = \frac{\text{cateto opuesto}}{\text{cateto adyacente}}$$

*Ecuación A31. 3*

Donde:

$$\text{Cateto opuesto} = H_{\text{cono}} = (\text{tangente } (\beta)) * \left(\frac{D}{2}\right)$$

Convirtiendo los grados a radianes se obtiene:

$$45 * e^{(2\pi/360^\circ)} = 0.79 \text{ radianes}$$

Al reemplazar los datos obtenidos en la ecuación A31.2 despejada para calcular la altura:

$$\text{Cateto opuesto} = H_{\text{cono}} = (\text{tangente } (0.79)) * \left(\frac{D}{2}\right)$$

*Ecuación A31. 4*

Encontrando el volumen de la parte inferior del tanque, a partir de la ecuación para calcular el volumen del cono:

$$V_{\text{cono}} = \frac{\pi * r^2 * H_{\text{cono}}}{3}$$

*Ecuación A31. 5*

Reemplazando los datos en la ecuación A31.5:

$$V_{\text{cono}} = \frac{\pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2 * (\text{tangente } (0.79)) * \left(\frac{D}{2}\right)}{3}$$

Obteniendo el volumen de la sección cónica, se procede a calcular la altura cilíndrica del tanque y por ende la altura total del mismo:

$$V_{tanque} = V_{Sec. cilíndrica} + V_{cono}$$

Reemplazando por las expresiones de cada volumen respectivamente:

$$V_{tanque} = 1.5 \frac{\pi}{4} * D^3 + \frac{\pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2 * (\text{tangente } (0.79)) * \left(\frac{D}{2}\right)}{3}$$

Reemplazando el valor del volumen del tanque el cual será igual a 1.454 m<sup>3</sup> y encontrando el valor de D:

$$1.454 \text{ m}^3 = 1.5 \frac{\pi}{4} * D^3 + \frac{\pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2 * (\text{tangente } (0.79)) * \left(\frac{D}{2}\right)}{3}$$

$$D_{tanque} = 1.03 \text{ m}$$

Calculando la altura del cilindro a partir del valor del volumen obtenido con la ecuación A31.1, despejando la ecuación A31.6 para obtener el valor de la altura del cilindro:

$$V_{Sec.cilíndrica} = 1.5 \frac{\pi}{4} * D^3$$

$$V_{Sec.cilíndrica} = 1.29 \text{ m}^3$$

Despejando de la ecuación original del volumen del cilindro y encontrando la altura de la sección cilíndrica:

$$V_{Sec.cilíndrica} = \frac{\pi}{4} * D^2 * H_{Sec.cilíndrica}$$

*Ecuación A31. 6*

$$H_{Sec.cilíndrica} = \frac{4 * V_{Sec.cilíndrica}}{\pi * D^2}$$

$$H_{Sec.cilíndrica} = 1.55 \text{ m}$$

Calculando la altura total del clarificador mediante la ecuación A31.7:

$$H_{total} = H_{Sec.cilindrica} + H_{cono}$$

*Ecuación A31.7*

Reemplazando los datos obtenemos la altura total:

$$H_{total} = 1.55 \text{ m} + 0.52 \text{ m}$$

$$H_{total} = 2.07 \text{ m}$$

El tanque clarificador así mismo tendrá una salida de agua a un costado y tendrá 0.05 m de diferencia con respecto a la altura de los lodos. De esta forma, se calcula la altura de la salida del agua, con la ayuda de la ecuación del volumen de cono y el volumen del cilindro:

$$V_{cono} = \frac{\pi * r^2 * H_{cono}}{3}$$

$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} * D^2 * H_{cilindro}$$

La altura de los lodos se obtiene mediante la suma de los volúmenes del cono y del cilindro; como se muestra a en la ecuación A31.8. Debido a que ya se conoce el valor de la altura del cono, se procede a igualar la suma de estos volúmenes, al volumen total de lodos aplicando siempre un factor de seguridad de 20%; se despeja la variable “altura de lodos en cilindro” como puede observarse en la ecuación.

$$V_{lodos} = V_{cilindro \text{ lodos}} + V_{cono}$$

*Ecuación A31.8*

$$V_{lodos} = \frac{\pi}{4} * D^2 * h_{lodos \text{ en cilindro}} + \frac{\pi * r^2 * H_{cono}}{3}$$

$$h_{lodos \text{ en cilindro}} = \frac{V_{lodos} - \frac{\pi * r^2 * H_{cono}}{3}}{\frac{\pi}{4} * D^2}$$

Sustituyendo por las variables obtenidas, se obtiene el valor de altura de lodos de:

$$h_{\text{lodos en cilindro}} = \frac{0.7 \text{ m}^3 - \frac{\pi * (1.03\text{m})^2 * 0.52\text{m}}{3}}{\frac{\pi}{4} * (1.03 \text{ m})^2}$$

$$h_{\text{lodos en cilindro}} = 0.49 \text{ m} \approx 0.50 \text{ m}$$

De esta forma, se obtiene la altura de salida del agua del tanque clarificador, tomando como referencia el inicio del tanque cilíndrico, de 0.55 m y se regulará la salida del agua clarificada por medio de una válvula de paso.

## ANEXO A32: COSTOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO.

En la tabla A32.1 se presentan los materiales necesarios para la construcción de la alternativa de tratamiento con biodigestores tubulares así como un estimado de los costos implicados en base a consulta de diferentes empresas que distribuyen los materiales en el país.

Tabla A32. 1: Materiales y presupuesto esperado para la construcción para biodigestores tubulares

Material	Total de unidades	Costo por unidad	Costo total
<i>PRETRATAMIENTO</i>			
Agitador de paletas con motor de 1/2 HP	1	\$200.00	\$200.00
Bolsa de Concreto de f 'c = 150kg/cm <sup>2</sup>	4	\$8.50	\$34.00
Ladrillos	96	\$0.65/ladrillo	\$62.40
Varilla de hierro ¼"	7	\$0.99	\$6.93
Alambre de amarre	3 m	\$0.47/m	\$1.41
Bomba cinética centrífuga de ½ HP	1	\$250.00	\$250.00
Codo suave de 90° diámetro 2 ½ "	3	\$0.70	\$2.10
Malla metálica con distancia nominal entre orificios de 15 mm	2 yd	\$4.00/yd	\$8.00
Conexión T de 4" de PVC	1	\$6.50	\$6.50
Válvula de paso de 4"	4	\$21.95	\$87.80
Tubo de PVC de 4"	3 m	\$ 2.73	\$8.19
Codo suave de 90° sin rosca diámetro 4"	2	\$2.16	\$4.32
Codo suave de 45° diámetro 4"	2	\$ 0.95	\$1.90
SUBTOTAL			\$673.55
<i>BIODIGESTORES</i>			
Plástico Agrofilm tipo manga, 2.5 m de ancho	2 unidades de 115 m <sup>2</sup>	\$2.50/ m <sup>2</sup>	\$ 575.00
Tubo de PVC 4"	6 m	\$2.73/m	\$16.38
Liga de auto	100 m	\$0.30/m	\$30.00
Macho roca de ½" PVC	2	\$0.30	\$0.60
Hembra de rosca de ½" PVC	2	\$0.30	\$0.60

*Continúa...*

Tabla A32. 2: Materiales y presupuesto esperado para la construcción para biodigestores tubulares

<b>Material</b>	<b>Total de unidades</b>	<b>Costo por unidad</b>	<b>Costo total</b>
Disco rígido de plástico diámetro mayor a 10 cm	4	\$1.65	\$6.60
Disco livianos de plástico diámetro mayor a 10 cm	4	\$0.50	\$2.00
Codos PVC 1/2" de diámetro, 90°	2	\$0.11	\$0.22
SUBTOTAL			\$631.40
<i>CONDUCCIÓN DE BIOGÁS</i>			
<i>Tubo PVC de 1/2" pulgada de diámetro</i>	100 m	\$0.34	\$34.00
Manómetro	2	\$5.00	\$10.00
Medidor de flujo	1	\$74.88	\$74.88
Válvula de paso de 1/2"	7	\$6.95	\$48.65
Conexión T de 1/2" p/rosca PVC	4	\$0.25	\$1.00
Adaptador macho de 1/2"	1	\$0.30	\$0.30
Reductores de 1 1/2" a 1/2" de PVC	4	\$0.40	\$16.00
Reductores de 1 1/2" a 2" de PVC	4	\$0.60	\$2.40
Tuberías de 2" de PVC	4 m	\$1.05/m	\$2.10
Conexión T de 1/2" sin rosca	1	\$0.25	\$1.50
Botella Plástica con agua	1	\$1.75	\$1.75
Gasómetro de Biogás de 3 m <sup>3</sup>	1	\$50.00	\$50.00
Limadura de hierro	1000 g	\$5.00/100 g	\$50.00
Soplador	1	\$ 1700.00	\$1700.00
SUBTOTAL			\$1994.25
<i>TRATAMIENTO SECUNDARIO</i>			
PAC	25 kg	\$0.40/kg	\$10.00
Codo suave de 90° sin rosca diámetro 4"	2	\$0.95	\$1.05
Tubo de PVC de 4"	4	\$ 2.73	\$10.92
Codo suave de 45° diámetro 4"	2	\$ 0.95	\$1.90

Continúa...

Tabla A32. 3: Materiales y presupuesto esperado para la construcción para biodigestores tubulares

<b>Material</b>	<b>Total de unidades</b>	<b>Costo por unidad</b>	<b>Costo total</b>
Ladrillo	180	\$0.65/ladrillo	\$117.00
Bolsa de concreto de f 'c = 150kg/cm <sup>2</sup>	10	\$ 8.50	\$80.50
Varilla de hierro ¼"	7	\$0.99	\$6.93
Alambre de amarre	3 m	\$0.47/m	\$1.41
Válvula de paso	1	\$200.00	\$200.00
Agitador de paletas con motor de ½ HP	1	\$250.00	\$250.00
Agitador de helice con motor de ½ HP	1	\$150.00	\$150.00
Tubo PVC 2 ½ "	10 m	\$ 2.56	\$25.60
Válvula Check PVC 2 ½ "	1	\$ 32.75	\$ 32.75
Codo suave de 90° diámetro 2 ½ "	4	\$0.70	\$2.80
Tanque de acero al carbón 304 cilíndrico	1	\$200.00	\$200.00
Tanque de acero al carbón 304 cilíndrico con terminación de cono	1	\$200.00	\$200.00
		<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$1,290.86</b>
<b>TRATAMIENTO DE LODOS</b>			
Bomba centrifuga para lodos	2	\$180.00	\$360.00
Tubo PVC 2 ½ "	10m	\$ 2.56	\$ 25.60
Ladrillo	1692	\$0.65/ladrillo	\$1099.80
Concreto de f 'c = 150kg/cm <sup>2</sup>	8	\$8.50	\$68.00
Varilla de hierro ¼"	20	\$0.99	\$19.80
Alambre de amarre	5 m	\$0.47/m	\$2.35
Grava	400 Cubetas	\$1.68 /cubeta	\$672.00
Arena	238 cubetas	\$0.89/cubeta	\$211.82
		<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$2,459.37</b>
		<b>TOTAL</b>	<b>\$7049.43</b>

Fuente: Elaboración propia

En la tabla A32.2 se presentan los materiales necesarios para la construcción de la alternativa de tratamiento con el biodigestor de laguna cubierta, así como un estimado de los costos implicados en base a consulta de diferentes empresas que distribuyen los materiales en el país.

Tabla A32. 4: Materiales y presupuesto esperado para la construcción para biodigestores de laguna cubierta.

<b>Material</b>	<b>Total de unidades</b>	<b>Costo por unidad</b>	<b>Costo total</b>
<b>PRETRATAMIENTO</b>			
Agitador de paletas con motor de 1/2 HP	1	\$200.00	\$200.00
Bolsa de Concreto de f 'c = 150kg/cm <sup>2</sup>	4	\$8.50	\$34.00
Ladrillos	96	\$0.65/ladrillo	\$62.40
Varilla de hierro ¼"	7	\$0.99	\$6.93
Alambre de amarre	3 m	\$0.47/m	\$1.41
Bomba cinética centrífuga de ½ HP	1	\$250.00	\$250.00
Codo suave de 90° diámetro 2 ½ "	3	\$0.70	\$2.10
Malla metálica con distancia nominal entre orificios de 15 mm	2 yd	\$4.00/yd	\$8.00
Válvula de paso de 4"	2	\$21.95	\$43.09
Tubo de PVC de 4"	3 m	\$ 2.73	\$8.19
Codo suave de 90° sin rosca diámetro 4"	2	\$2.16	\$4.32
Codo suave de 45° diámetro 4"	2	\$ 0.95	\$1.90
<b>SUBTOTAL</b>			<b>\$623.15</b>
<b>BIODIGESTOR</b>			
Geomembrana de polietileno de alta densidad.(16.20 m x 3.60 m)	100 m <sup>2</sup>	\$25.00	\$2500.00
Agitador de hélice con motor de 0.25 kW	1	\$200.00	\$200.00
Bomba cinética centrífuga	2	\$250.00	\$250.00
Tubo PVC 4"	2.50 m	\$2.73 /m	\$6.25
Concreto de f 'c = 150kg/cm <sup>2</sup>	10 bolsas	\$8.50	\$85.00
Ladrillo	150	\$0.65/ladrillo	\$97.5
<b>SUBTOTAL</b>			<b>\$3,138.75</b>
<b>CONDUCCION DE BIOGÁS</b>			
<i>Tubo PVC de ½" pulgada de diámetro</i>	100 m	\$0.34	\$34.0
Manómetro	2	\$5	\$10.0
Medidor de flujo	1	\$74.88	\$74.88
Válvula de paso ½"	7	\$6.95	\$48.65
Conexión T de ½" p/rosca PVC	4	\$0.25	\$1.00

Continúa...

Tabla A32. 5: Materiales y presupuesto esperado para la construcción para biodigestores de laguna cubierta.

Material	Total de unidades	Costo por unidad	Costo total
Adaptador macho de ½"	1	\$0.30	\$0.30
Reductores de 1 ½" a ½" de PVC	4	\$0.40	\$16.00
Reductores de 1 ½" a 2" de PVC	4	\$0.60	\$2.40
Tuberías de 2" de PVC	4 m	\$1.05/m	\$2.10
Conexión T de ½" sin rosca	1	\$0.25	\$1.50
Botella Plástica con agua	1	\$1.75	\$1.75
Gasómetro de Biogás de 3 m <sup>3</sup>	1	\$50.00	\$50.00
Limadura de hierro	1000 g	\$5.00/100 g	\$50.00
Soplador	1	\$1700.00	\$1700.00
SUBTOTAL			\$1992.50
<i>TRATAMIENTO SECUNDARIO</i>			
PAC	25 kg	\$0.40/kg	\$10.00
Codo suave de 90° sin rosca diámetro 4"	2	\$0.95	\$1.05
Tubo de PVC de 4"	4	\$ 2.73	\$10.92
Ladrillo	180	\$0.65/ladrillo	\$117.00
Bolsa de concreto de f 'c = 150kg/cm <sup>2</sup>	10	\$ 8.50	\$80.50
Varilla de hierro ¼"	7	\$0.99	\$6.93
Alambre de amarre	3 m	\$0.47/m	\$1.41
Válvula de paso	1	\$200.00	\$200.00
Agitador de paletas con motor de ½ HP	1	\$250.00	\$250.00
Agitador de helice con motor de ½ HP	1	\$150.00	\$150.00
Tubo PVC 2 ½ "	10 m	\$ 2.56	\$25.60
Válvula Check PVC 2 ½ "	1	\$ 32.75	\$ 32.75
Codo suave de 90° diámetro 2 ½ "	5	\$0.70	\$2.80
Tanque de acero al carbón 304 cilíndrico	1	\$200.00	\$200.00
Tanque de acero al carbón 304 cilíndrico con terminación de cono	1	\$200.00	\$200.00
SUBTOTAL			\$1,289.66
<i>TRATAMIENTO DE LODOS</i>			
Bomba centrifuga para lodos	2	\$180.00	\$360.00
Tubo PVC 2 ½ "	10m	\$ 2.56	\$ 25.60
Ladrillo	1692	\$0.65/ladrillo	\$1099.8

Continúa...

Tabla A32. 6: Materiales y presupuesto esperado para la construcción para biodigestores de laguna cubierta.

<b>Material</b>	<b>Total de unidades</b>	<b>Costo por unidad</b>	<b>Costo total</b>
Concreto de f 'c = 150kg/cm <sup>2</sup>	8	\$8.50	\$68.00
Varilla de hierro ¼"	20	\$0.99	\$19.80
Alambre de amarre	5 m	\$0.47/m	\$2.35
Grava	400 Cubetas	\$1.68 /cubeta	\$672.00
Arena	238 cubetas	\$0.89/cubeta	\$211.82
SUBTOTAL			\$2,088.00
TOTAL			\$9,132.06.

Fuente: Elaboración propia

### **Mano de obra directa (MOD) para biodigestores.**

Estos costos se refieren a la mano de obra que incide directamente en el proceso de diseño y construcción como son: la mano de obra técnica y no técnica. La asignación de salarios al personal técnico y no técnico, así como el tiempo de trabajo de estos, se especifica en la tabla "A33.3"; donde a excepción del Ingeniero Electromecánico, tractorista y electricista, cuyo tiempo de trabajo se ha establecido de dos semanas, de igual forma que el monto al que asciende su salario; el resto de personal trabajará a lo largo de todo el proyecto y los salarios de estos serán mensuales a lo largo de un período de trabajo de dos meses:

Tabla A.32.3: Costos de mano de obra técnica y no técnica

<b>MANO DE OBRA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>PERÍODO DE TRABAJO</b>	<b>SALARIO</b>	<b>MONTO TOTAL</b>
	Jefe de obra	1	2 meses	\$750.00*	\$1,500.00
Técnica	Ing. Electromecánico	1	2 semanas	\$300.00 •	\$300.00
	Tractorista	1	2 semanas	\$150.00•	\$150.00
				<b>Subtotal</b>	<b>\$1,950.00</b>

<b>MANO DE OBRA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>PERÍODO DE TRABAJO</b>	<b>SALARIO POR JORNADA*</b>	<b>MONTO TOTAL</b>
No técnica	Albañil	2	2 meses	\$15*	\$1,200.00
	Electricista	1	2 semanas	\$175.00 •	\$175.00
	Trabajador	2	2 meses	\$15*	\$1,200.00
				<b>Subtotal</b>	<b>\$2,575.00</b>
<b>TOTAL COSTOS DE MANO DE OBRA</b>					<b>\$4,525.00</b>

Nota:

\* La jornada está compuesta por un día de trabajo de 8 horas a lo largo de la duración del proyecto (2 meses)

• Personal que trabajará durante 2 semanas en instalación eléctrica y cavada de zanja para biodigestor/es.

Fuente: Elaboración propia

### Costos indirectos (CI)

Los costos indirectos corresponden a todos los gastos realizados que no intervienen específicamente en el presupuesto para materia prima y mano de obra directa. Entre estos gastos se puede considerar la materia prima indirecta y transporte, como se indica en la tabla A32.4. La materia prima indirecta está conformada por todos materiales y necesidades no considerados en el presupuesto principal y que ayudan a obtener el producto final. En este caso, está conformada por: agua para la preparación del cemento,

para probar el funcionamiento de las bombas, etc.; electricidad, materiales eléctricos y aislantes; ladrillos, cemento, arena y láminas para techado las cuales serán empleadas en la construcción de las instalaciones adecuadas para bombas y agitadores; y otros.

En cuanto al transporte, se ha considerado que, debido a la presencia de una ferretería cercana a la Estación Experimental y tomando en cuenta la cantidad de arena, cemento, ladrillos y el transporte de otros materiales, la cantidad de viajes necesarios para el transporte de éstos desde su punto de despacho hasta la Estación Experimental asciende a un máximo de 8 viajes; y debido a que ya se había considerado el costo de los materiales directos en las tablas A32.1 y A32.2, en este caso solamente se toma en cuenta el costo del viaje.

*Tabla A.32.4: Costos indirectos asociados a la construcción de biodigestor/es*

<b>Tipo de inversión</b>	<b>Total</b>
Materia prima indirecta	\$ 350.00
Transporte	\$ 160.00
<b>Total</b>	<b>\$ 510.00</b>

*Fuente: Elaboración propia*

Obteniendo un total de \$5,035.00 de inversión sumando la mano de obra tanto técnica como no técnica y los costos indirectos asociados al proyecto.

## ANEXO A33: ESTIMACIÓN TEÓRICA DE BIOGÁS GENERADO POR BIODIGESTOR ANAERÓBICO

La producción teórica del metano puede ser estimada de la siguiente manera:

Determinando el valor de DQO removida por día, mediante la ecuación A33.1 (Comisión Nacional del agua, 2015).

$$DQO_{CH_4} = Q_{ip}((DQO_{entrada} - DQO_{salida}) - Y_{obs} * DQO_{entrada})$$

*Ecuación A33. 1*

Donde

$DQO_{CH_4}$ : Carga de DQO removida por día

$Q_{ip}$ : Caudal de entrada a la biodigestor

$DQO_{entrada}$ : Valor de DQO a la entrada al biodigestor

$DQO_{salida}$ : Valor de DQO a la salida del biodigestor

$Y_{obs}$ : Producción observada (0.21 kg lodo/ kg DQO APP)

A partir del resultado anterior el volumen de metano producido se estima por medio de la ecuación A33.2:

$$V_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(t)}$$

*Ecuación A33. 2*

El valor de K(t) se determina por medio de la ecuación A33.3

$$K(t) = \frac{P * K}{R * (273 + t)}$$

*Ecuación A33. 3*

Donde:

P = presión atmosférica (atm)

R = constante de los gases (0.08206 atm\*L/mol\*°K)

K = carga orgánica digerida correspondiente a una mol de CH<sub>4</sub> (64 gDQO/mol)

t= temperatura operacional del montaje (°C)

Sustituyendo los valores correspondientes:

$$DQO_{CH_4} = 1.30 \frac{m^3}{d} \left( 4.81 \frac{kg DQO}{m^3} - 1.59 \frac{kg DQO}{m^3} \right) - 0.21 \frac{kg DQO_{LODO}}{kg DQO_{app}} * 4.81 \frac{kg DQO}{m^3}$$

$$DQO_{CH_4} = 2.87 \frac{kg DQO}{d}$$

$$K(t) = \frac{1.0 atm * 64.0 \frac{kg DQO}{mol}}{0.08201 \frac{atm L}{mol K} * (273.15 + 30 K)}$$

$$K(t) = 2.57 \frac{kg DQO}{d}$$

$$V_{CH_4} = \frac{2.87 \frac{kg DQO}{d}}{2.57 \frac{kg DQO}{d}}$$

$$V_{CH_4} = 1.12 \frac{m^3 CH_4}{d}$$

Asumiendo una composición del biogás de metano de aproximadamente el 60%, el volumen de biogás generado, se puede determinar por la ecuación A.34:

$$V_{biogás} = \frac{V_{CH_4}}{0.60}$$

Ecuación A33. 4

Por tanto la producción de biogás diaria estimada de forma teórica generada en la digestión anaeróbica será de:

$$V_{biogás} = \frac{\frac{0.8326 m^3}{d}}{0.60} = \frac{1.86 m^3}{d}$$

Y la producción de biogás por hora será de:

$$V_{biogás} = \frac{1.86 m^3}{d} \times \frac{1 d}{24 h} = 0.077 \frac{m^3 biogas}{h}$$

ANEXO A34: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA GENERADORES

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERADORES						
	50	66	83	99	116	132
standby power	50	66	83	99	116	132
Model	AQL50	AQL66	AQL83	AQL99	AQL116	AQL132
standby power	50/40	66/53	83/66	99/80	116/92	132/106
prime power	45/36	60/48	75/60	90/72	105/84	120/96
frequency	60	60	60	60	60	60
rated voltage	480	480	480	480	480	480
brand	Cummins brand-new gas engine					
model	4BTAA	4BTAA	6BTAA	6BTAA	6CTAA	6CTAA
displacement	3,9	3,9	5,9	5,9	8,3	8,3
speed	1800	1800	1800	1800	1800	1800
compression ratio	10:1	10:1	10:1	10:1	10:1	10:1
cooling method	water cooled	water cooled	water cooled	water cooled	water cooled	water cooled
brand alternator	Leroy Somer	Leroy Somer	Leroy Somer	Leroy Somer	Leroy Somer	Leroy Somer
model	LSA 42.3 S5	LSA 42.3 M8	LSA 43.2 L65	LSA 43.2 L8	LSA 44.2 VS3	LSA 44.2 VS45
phase	3 phases, 4 wires	3 phases, 4 wires	3 phases, 4 wires	3 phases, 4 wires	3 phases, 4 wires	3 phases, 4 wires
controller type	DeepSea DSE7320	DeepSea DSE7320	DeepSea DSE7320	DeepSea DSE7320	DeepSea DSE7320	DeepSea DSE7320
display	LCD	LCD	LCD	LCD	LCD	LCD
fuel	biogas	biogas	biogas	biogas	biogas	biogas
gas inlet pressure	1-5.5kPa	1-5.5kPa	1-5.5kPa	1-5.5kPa	1-5.5kPa	1-5.5kPa
dimension (open type)	1950*1000*1450	2500*1200*1600	2280*1050*1500	2280*1050*1500	2250*1050*1560	2250*1050*1560
net weight (open type)	1000	1000	1000	1000	1350	1350
biogas consumption	0,58	0,58	0,58	0,55	0,58	0,55

Figura A34. 1: Especificaciones técnicas de generadores de 50-132 kW. Fuente (Aqualimpia®, 2014)

## ANEXO A35: COCINA INSTALADA EN EL ÁREA DE AGROINDUSTRIA



*Figura A35.1: Cocina de gas propano del departamento de Agroindustria*



*Figura A35.2: Instalaciones del Departamento de Agroindustria*

## ANEXO A36: ADAPTACIÓN DE LA COCINA COMERCIAL DE PROPANO A BIOGÁS, CAMBIANDO RELACIÓN DE GAS.

La adaptación necesaria para los quemadores diseñados para funcionar con Gas Líquido Propano (GLP), consiste en cambiar el tamaño del agujero del inyector para proporcionar la cantidad de biogás que suministre el mismo flujo calorífico que el GLP con la presión de trabajo que se tendrá; las otras partes del quemador no se modifican.

Lo que se busca es que el flujo de calor proporcionado por el quemador se mantenga constante, el cual está dado por la ecuación A36.1:

$$Q_c = KSW \sqrt{P}$$

*Ecuación A36. 1*

Donde:

$Q_c$  = Flujo calorífico (Kcal/h)

$K$  = Constante que es en función de las unidades, de la forma del orificio y la temperatura

$S$  = Área de inyector ( $\text{cm}^2$ )

$W$  = Índice de Wobbe, ha sido propuesto por la unión Internacional de la Industria del gas, y la Norma UNE 60.002, y existe una clasificación de los diferentes gases combustibles (Ver tabla A36.1)

*Tabla A36. 1: Índices de Wobbe*

<b>Combustible</b>	<b>Índice de Wobbe</b>	<b>Grupo</b>
Biogás	6448.84 Kcal/m <sup>3</sup>	2 <sup>do</sup>
Gas LP	19000 Kcal/m <sup>3</sup>	4 <sup>to</sup>

*Fuente: Comisión de Regulación de Energía y Gas, (2009).*

Como lo que se desea es conservar el flujo calorífico, entonces debe cumplirse la siguiente condición:

$$Q_{c1} = Q_{c2}$$

Ecuación A36. 2

Donde:

$Q_{c1}$  = Flujo calorífico del propano

$Q_{c2}$  = Flujo calorífico del biogás

Entonces si se sustituye en cada tipo de flujo de gas la ecuación A36.1

$$K_1 S_1 W_1 \sqrt{P_1} = K_2 S_2 W_2 \sqrt{P_2}$$

Como las condiciones de temperatura y las formas de los orificios de los inyectores son similares, la constante K es semejante en ambos casos y por tanto:

$$S_1 W_1 \sqrt{P_1} = S_2 W_2 \sqrt{P_2}$$

Ecuación A36. 3

Donde

$S_1$  = área del inyector al manejar propano,  $S_1 = \pi \left(\frac{D_1}{2}\right)^2$

$W_1$  = Índice de Wobbe para propano

$P_1$  = Presión de trabajo Propano

$S_2$  = área del inyector para manejar biogás

$W_2$  = Índice de Wobbe para biogás

$P_2$  = Presión de trabajo biogás

Entonces despejando  $S_2$  de la ecuación A36.3, que es la nueva área del inyector al manejar con biogás:

$$S_2 = \frac{S_1 W_1 \sqrt{P_1}}{W_2 \sqrt{P_2}}$$

Después de sustituir los valores respectivos y obtener  $S_2$ , por medio de la ecuación A36.4

$$S_2 = \pi \left( \frac{D_2}{2} \right)^2$$

*Ecuación A36. 4*

Y despejándolo de la ecuación el valor de  $D_2$

$$D_2 = 2 \sqrt{\frac{S_2}{\pi}}$$

Siendo por tanto el nuevo diámetro de abertura del difusor  $D_2$ .

## ANEXO A37: CONSTRUCCIÓN DE UNA ESTUFA ESPECIAL PARA BIOGÁS

### Construcción de cocina para biogás

Para este tipo de cocinas se construye el quemador que posteriormente se adapta o se les realiza una estructura, ya sea de adobe o de hierro. Los dos tipos de quemadores más utilizados son los quemadores en forma de campana y en forma de estrella.

#### Quemador campana

Los quemadores "campana", consisten en reductores tipo campana, de un tamaño conveniente para los trastos de cocina que se usan (por lo general, de 19 x 51 mm – de 3/4" x 2"). Cada reductor es coronado por un esparcidor de gas, de los mismos que se usan en las estufas de propano, y que pueden adquirirse en los talleres de reparación de estufas.

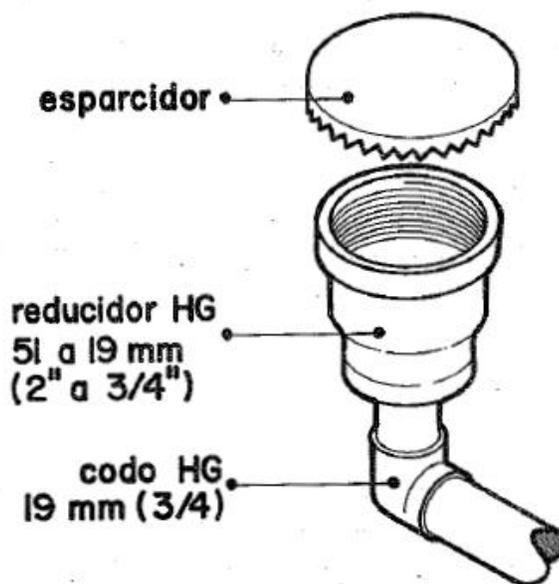


Figura A37.1: Quemador en forma de campana. Fuente: Cunalata, 2017

Después se construye unos soportes de barro, sobre los cuales apoyaremos las ollas, es fundamental que este soporte permita la entrada de aire fresco desde abajo y la salida de los gases de combustión en la parte de arriba (por debajo de la olla) la llama debe

respirar, sino se ahoga y quemará mal. La olla deberá estar a una distancia de 3-4 cm aprox. del quemador, así es importante calcular bien las dimensiones del soporte.



*Figura A37.2: Cocina artesanal de biogás hecha con tubería de hierro y estructura de barro. Fuente: Herrero, 2008.*

### Quemador con forma de estrella

El quemador más grande, apropiado para una hornilla y si se usan recipientes grandes. Este quemador se fabrica de pedazos de tubería de hierro galvanizado unidos con soldadura según la ilustración A37.3:

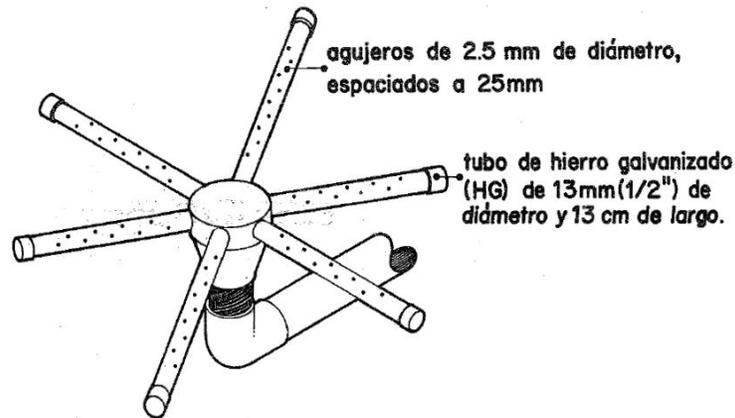


Figura A37.3: Quemador en forma de estrella. Fuente: Cunalata, 2017

El sistema de conducción del biogás, independiente del quemador que se utilice desde el biodigestor, estará conformado por:

- 1 reducción no roscada en PVC de 1 ½ a 1 pulgada.
- Sección de tubería en PVC de 1 pulgada.
- Macho de PVC de 1 pulgada.
- Llave de bolas 1 pulgada.
- Codo de 1 pulgada.



Se disponen los quemadores encima de un soporte a la altura que deseamos para cocinar.

Usar siempre y solo llaves de bola de PVC!

Figura A37.4: Conexión de quemadores. Fuente: Instituto para una Alternativa Agraria.



Figura A37.5: Cocina de biogás con estructura de barro, divididos por una conexión en te para cada quemador. Fuente: PEJ, KLJB & Bethlehem Mission Immensee.

## ANEXO A38: ESPECIFICACIONES DE EQUIPO DE MEDICIÓN

- **Medidor de flujo**



Tabla A38. 1: Especificaciones de medidor de flujo inalámbrico

Parámetro	valores
Aplicación	Biogás
Caudal máximo	2.0-4.0 m <sup>3</sup> /h
Caudal mínimo	0. /0.025 m <sup>3</sup> /h
Temperatura de trabajo	10 a 40 °C
Presión máxima de trabajo	10 kPa

- **Manómetro**



Tabla A38. 2: Especificaciones de Manómetro de cápsula

Parámetro	valores
Rango de presión	0-250 mbar
Caudal mínimo	0. /0.025 m <sup>3</sup> /h
Temperatura de trabajo	-20 a 60 °C

**ANEXO A39: VÁLVULA DE SEGURIDAD SISTEMA DE CONDUCCIÓN DE BIOGÁS PARA BIODIGESTORES TUBULARES**

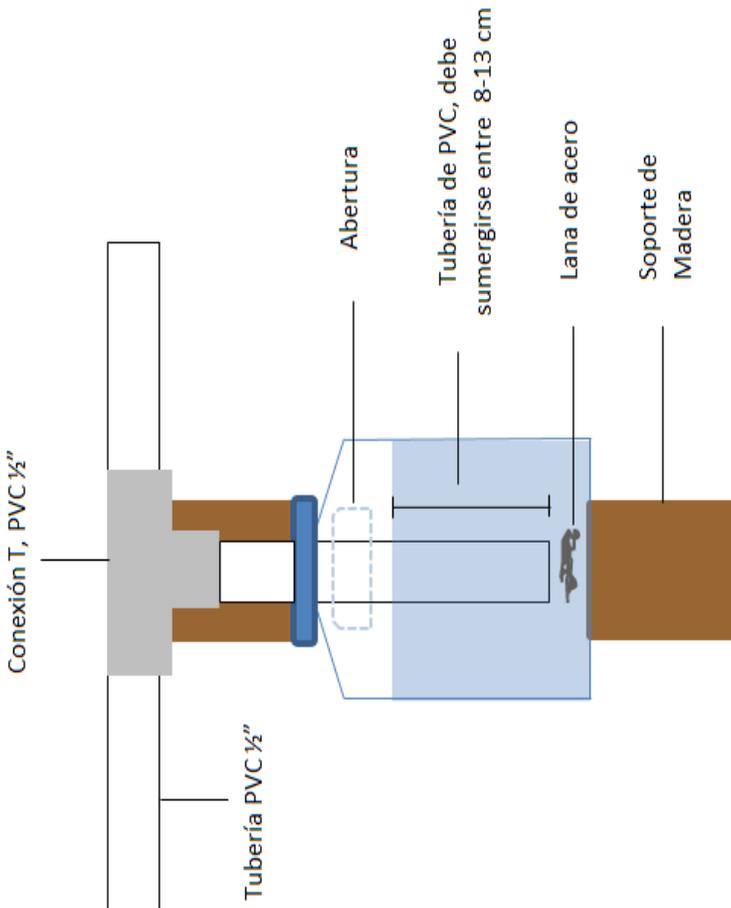


Figura A39.1: Configuración de válvula de seguridad. Fuente: Elaboración propia



Figura A39.2: Ejemplo de conexión de válvula de seguridad. Fuente: Herrero, 2008.

## ANEXO A40: PURGA DE CONDENSADO

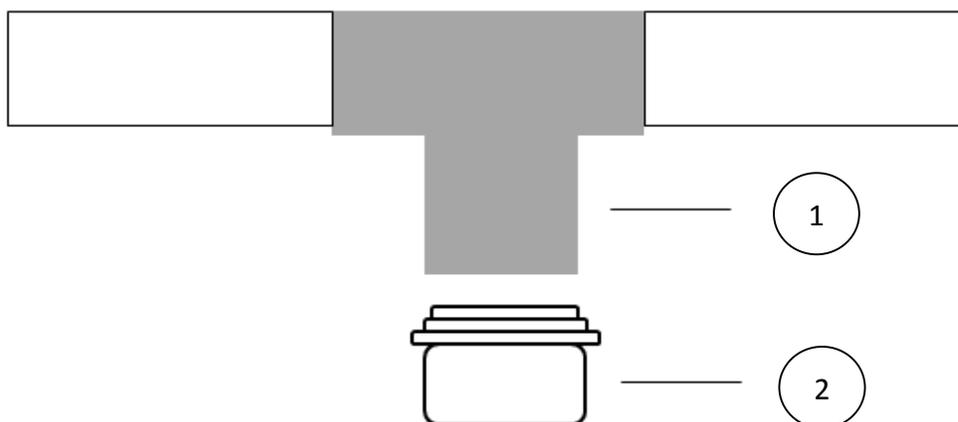
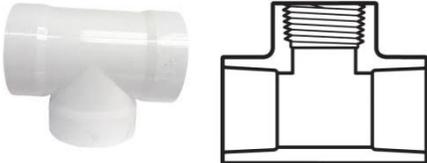


Figura A40.1: Configuración de conexión tee para extracción de condensado. Fuente: Elaboración propia.

1	Conexión T de rosca de ½" PVC	
2	Rosca macho de ½" PVC	

## ANEXO A41: FILTRO DE H<sub>2</sub>S

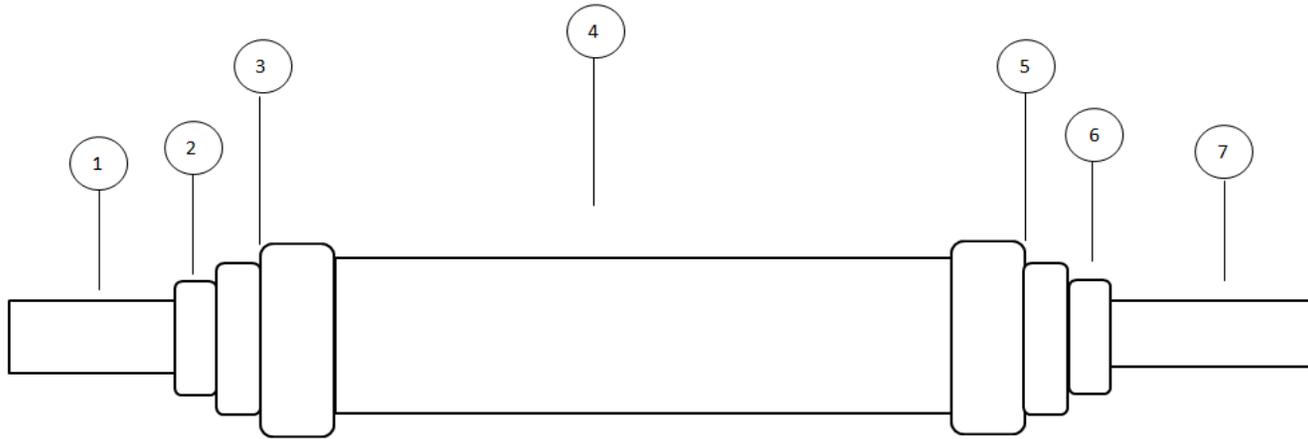
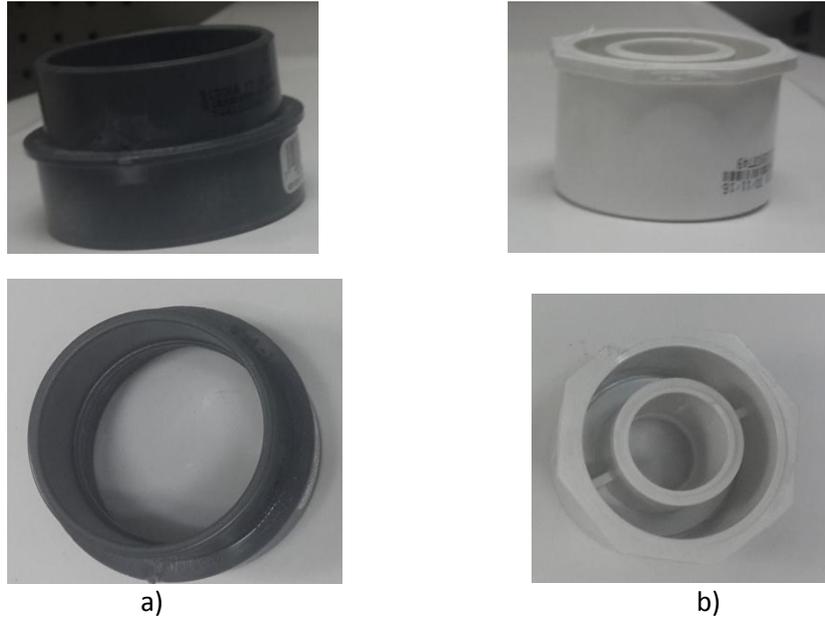
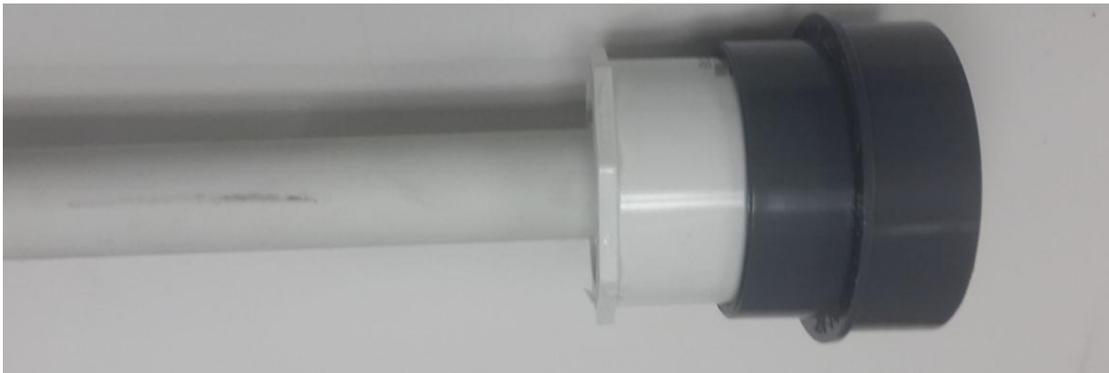


Figura 41.1: Esquema de los componentes del filtro. Fuente: Elaboración propia

1	Tubería (conducción de biogás) 1/2" PVC
2	Reductor de 1 1/2" a 1/2" PVC
3	Reductor de 2" a 1 1/2" PVC
4	Tubería de 2" PVC (1.5 m de longitud)
5	Reductor de 2" a 1 1/2" PVC
6	Reductor de 1 1/2" a 1/2" PVC
7	Tubería (conducción de biogás) 1/2" PVC



*Figura 41.2: Reductores de PVC. a) Reductor de 2" a 1 ½" b) reductor de 1 ½" a ½"*



*Figura 41.2: Vista de conexión de tubería de PVC de ½" a reductores.*

## ANEXOS A42: GASÓMETRO



Figura A42.1: Vistas de gasómetro para biogás. Fuente: Teewin biogas sistem

Almacenamiento de biogás <b>Teewin YT-BS</b>	
Volumen	0.5-100 m3 (Personalizado)
Membrana	Recubrimiento de PVC
Espesor de membrana	05-1.8 mm
Vida	15 años

## ANEXO A43: CORTALLAMA PARA BIODIGESTOR TUBULAR

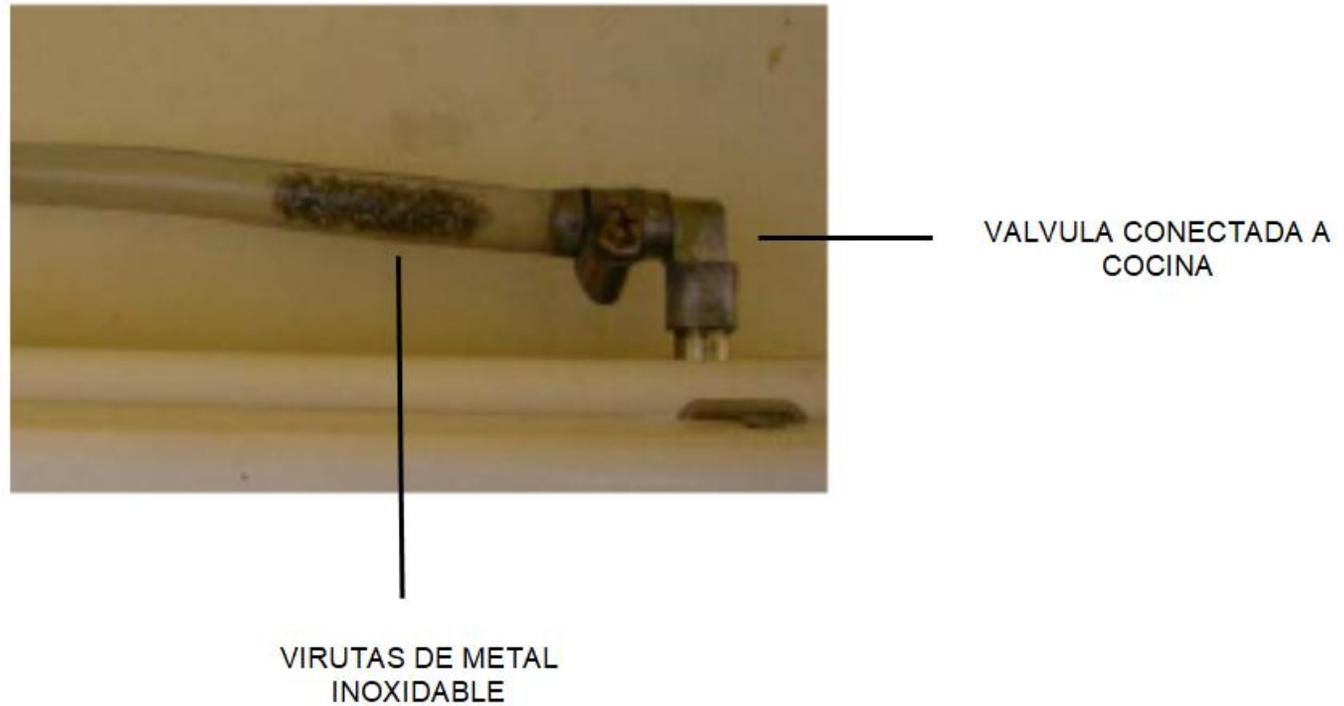


Figura A43.1: Colocación de viruta de metal para efecto antiretorno de llama en conexión biogás-para cocina. Fuente: Orozco, 2015

## ANEXO A44: ESPECIFICACIONES DE CORTALLAMA BIODIGESTOR LAGUNA CUBIERTA



Figura A44.1: Colocación de Espuma en tubería. (HILTI, 2017)

### Datos Técnicos CP 620 Espuma Cortafuego

Contenido del cartucho:	10.2 oz (300 ml)
Rendimiento:	Hasta 74.4 oz (2.2 l)
Temperatura de Aplicación:	10°C (50°F) a 30°C (86°F)
Color:	Rojo
Resistencia a la temperatura de la Espuma Curada:	-30°C (-22°F) a 100°C (212°F)
Temperatura mínima:	
Material base	0°C(32°F)
Cartucho	10°C (50°F)
Temperatura de transporte y Almacenamiento:	5°C (40°F) a 25°C (77°F)
Curado:	
Pegajoso hasta	Aprox. 35 segundos
Listo para cortarse después de	Aprox. 1 minuto
Tiempo de caducidad:	9 meses
(a 20°C (68°F) y almacenado en lugar seco	de la fecha de fabricación
Aislamiento térmico (valor R): (Comparable a Armaflex y lana mineral)	2.8-3.0 por pulgada de espesor
Clasificación en Transmisión de sonido según ASTM E90-97:	50
Aislamiento acústico de la estructura: Tubería/muro	30 - 50%

# ANEXO A45: SELECCIÓN DEL SOPLADOR TURBOTRON®VERDICHTER

Con la presión final requerida de 88 mbar y el flujo de 0.044 m<sup>3</sup>/h para 60 Hz.

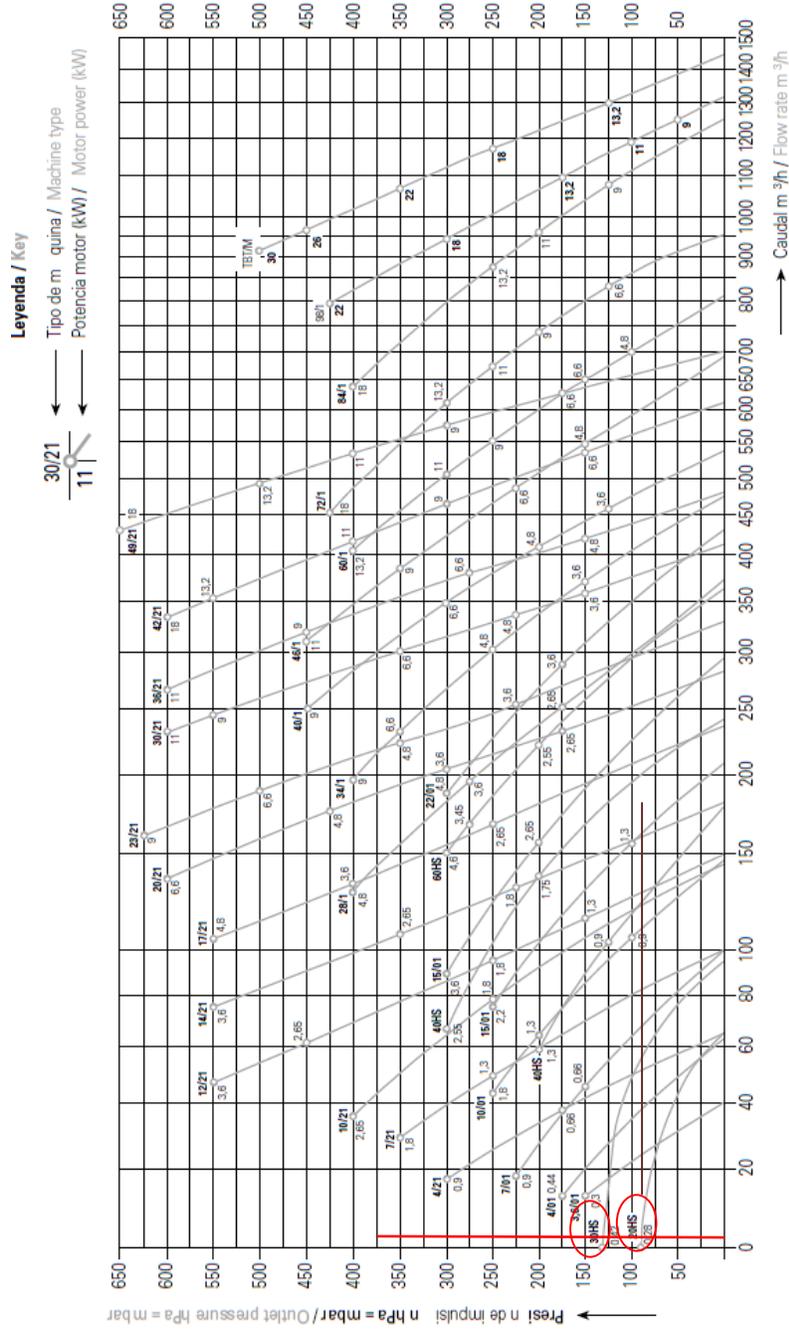


Figura A45.1: Grafico Presión-caudal, sopladores motor 60hz TurboTron®. Fuente: Catalogo TurboTron®,2016

Al localizar las condiciones en el grafico el soplador que cumple con dicho requerimientos sería el **20HS**, pero se estaría trabajando al límite de su capacidad por lo que se recomienda seleccionar el **30HS**, si seleccionando capacidad de succión de 1m<sup>3</sup>/h, se esperaría que en 1h 4 min al día, se succione el biogás diario generado, consumiéndose 0.42 Kwatt/h. las dimensiones del equipo son:



CL 20 HS  
CL 30 HS  
CL 40 HS  
CL 50 HS  
CL 60 HS  
CL 65 HS

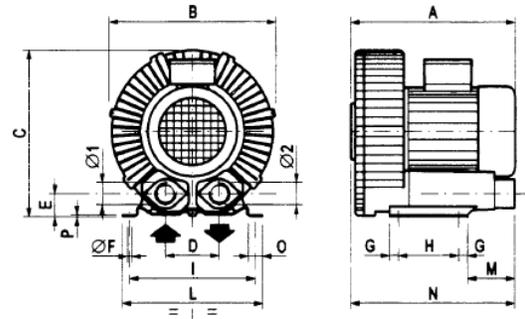


Figura A45.2: Características de modelo CL20HS Y CL30HS, Turbotron®,2016

		Dimensiones (mm) / Dimensions (mm)																	Conexión ("gas) Connect. ("gas)		Peso Weight
Tipo máquina Machine type	Figura de referencia Reference figure	A	B	C	D	E	F	G	H	I	L	M	N	O	P	Q	R	S	aspir. inlet Ø <sub>1</sub>	imp. outlet Ø <sub>2</sub>	kg
CL 3,6/01	Fig. 1	300	310	277	287	115	10	67	16	91	55	70							1"	1"	11
CL 4/01	Fig. 1	300	310	277	287	115	10	67	16	91	55	70							1"	1"	12
CL 7/01	Fig. 1	340	360	343	338	125	10	110	16	110	55	70							1"1/4	1"1/4	17
CL 10/01	Fig. 1	405	390	383	365	145	10	119	16	118	55	70							1"1/2	1"1/2	23
CL 15/01	Fig. 1	447	425	395	400	170	10	130	16	130	55	70							2"	2"	30
CL 18/01	Fig. 1	511	450	486	425	202	10	148	16	166	55	70							2"1/2	2"1/2	40
CL 22/01	Fig. 1	543	485	502	460	216	10	170	16	182	55	70							2"1/2	2"1/2	52
CL 20 HS	Fig. 2	255	228	228	90	34	11	12	76	190	212	75	218	40	12				1"	1"	10,5
CL 30 HS	Fig. 3	256	250	257	100	38	11	13,5	83	205	230	103	261	40	12				1"1/4	1"1/4	13,5

Figura A45.3: Dimensiones de componentes de sopladores. Fuente: Turbotron®,2016

En base a los diámetros de entrada y salida se requerían dos adaptadores de tubería de 1/2" a 1 1/4".

## ANEXO A46: CONEXIÓN DE SALIDA DE BIOGAS.

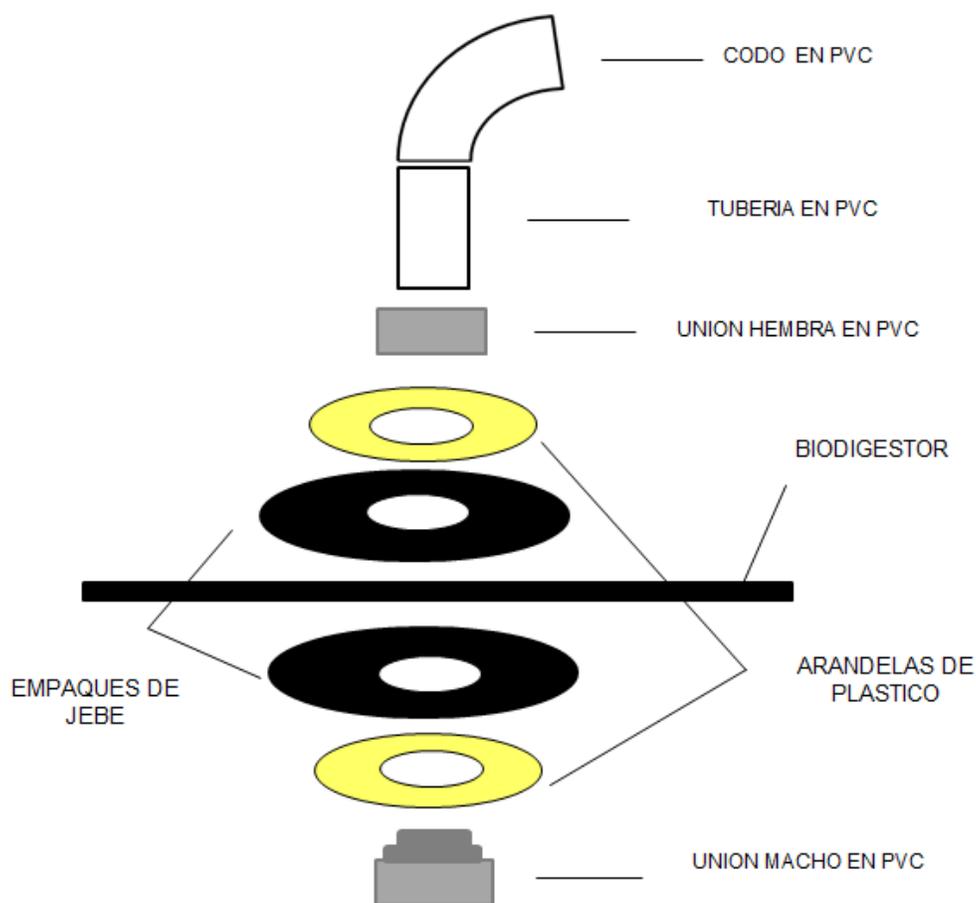


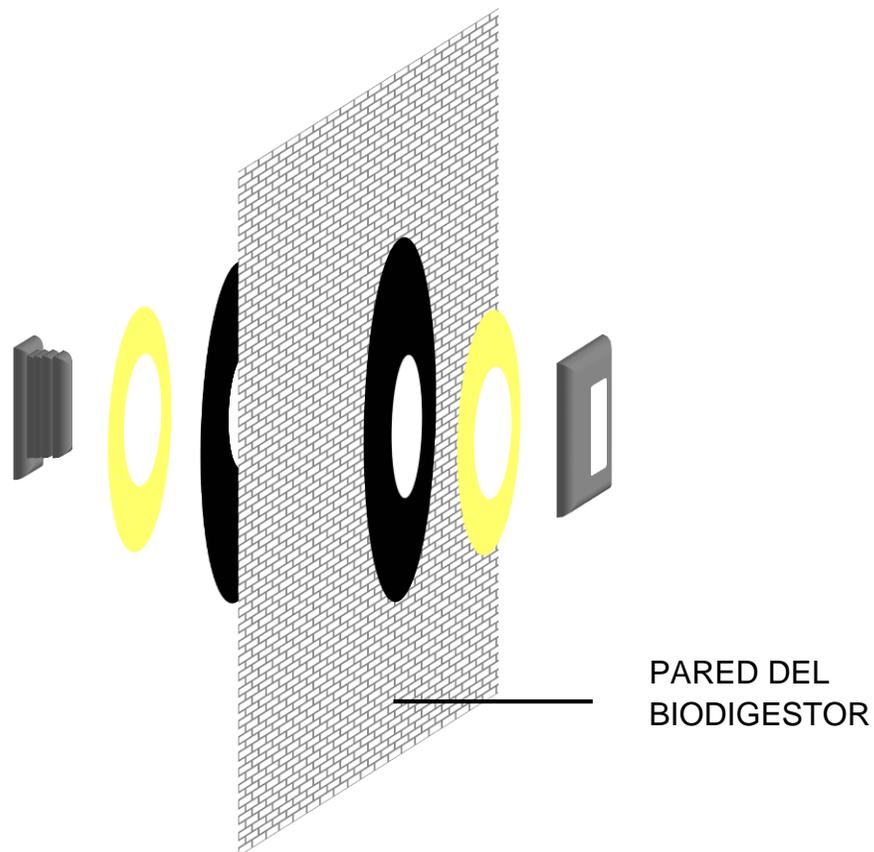
Figura A46.1: Componentes y montaje de conexión de salida de biogás para biodigestor tubular.  
Fuente: Elaboración propia.

### Procedimiento de montaje

- Se preparan dos arandelas de plástico con un diámetro de 8 cm, se les corta un hueco circular central de  $\frac{1}{2}$ " (media pulgada); el plástico debe ser bastante grueso, sino con el tiempo podría romperse.
- Se preparan dos empaques de jebe, de 10 cm de diámetro e igualmente se corta el hueco central de  $\frac{1}{2}$ "; el grosor debe ser de al menos de 1.5 mm, si es menos usar doble empaje.

- Se prueban arandelas y empajes con la unión macho, para controlar que se pueda enroscar de manera ajustada en el hueco que hemos hecho.
- Se marca sobre el polietileno el punto donde se instalará la salida del gas. El punto estará en el medio de la manga, a lo ancho, y estará a 2 metros del extremo abierto de la manga, a lo largo.

Se aplican las mismas condiciones en la conexión del biodigestor de laguna cubierta con la única diferencia que el montaje se realiza en una de las paredes laterales del biodigestor (Ver figura A46.2):



*Figura A47.2: Montaje de componentes de conexión de biogás a biodigestor de laguna cubierta.  
Fuente: Elaboración propia*

## ANEXO A47: CÁLCULO DE LAS EMISIONES DE METANO Y DIÓXIDO DE CARBONO.

### Cálculo de la cantidad de metano producida.

La estimación de la cantidad de biogás generado se realiza en el Anexo 33, por tanto en esta sección solamente se retomará este dato y se multiplica por el porcentaje que corresponde a la composición típica del metano en el biogás el cual se encuentra entre el 55 y el 65%; para fines de la propuesta, se tomará el valor promedio entre estos dos límites, quiere decir, 60% de metano. De esta forma, mediante la ecuación A47.1, se obtiene la cantidad de metano producido por día:

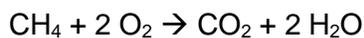
$$CH_4/día = 0.60 * 1.86 m^3$$

*Ecuación A47. 1*

$$CH_4/día = 1.11m^3$$

### Cálculo de la cantidad de CO<sub>2</sub> emitido al quemar todo el metano producido en el biodigestor.

Para el cálculo de este, es necesario recurrir a la ecuación de la reacción de combustión perteneciente al metano. La ecuación A48.2 indica que por cada mol de metano consumido, se forma un mol de CO<sub>2</sub>:



*Ecuación A47. 2*

La densidad relativa del metano respecto a la densidad del aire según Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes Español es 0.6 y la densidad del aire a las condiciones promedio observadas en la Estación Experimental se puede inferir que es 1.164 kg/m<sup>3</sup>.

$$1.11 m^3 * \frac{0.6 \times 1.164 kg}{m^3} * \frac{1000 g}{1 kg} = 775.22 g \text{ de } CH_4$$

La cantidad de CO<sub>2</sub> producida al consumirse todo el metano es:



Masa molar: 16.0425 g/mol

44.0095 g/mol

$$775.22 \text{ g de CH}_4 * \frac{1 \text{ mol}}{16.0425 \text{ g}} \text{ CH}_4 * \frac{1 \text{ mol de CO}_2}{1 \text{ mol de CH}_4} * \frac{44.0095 \text{ g}}{1 \text{ mol}} \text{ CO}_2 = 2126.68 \text{ g de CO}_2$$

Convirtiendo el valor anterior a kg:

$$2126.68 \text{ g de CO}_2 * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} = 2.13 \text{ kg de CO}_2$$

Entonces, la cantidad liberada al quemar el metano procedente del biogás, es: 2.13 kg.

Es necesario agregar a este valor, la cantidad de CO<sub>2</sub> que proviene directamente del biogás y el cual no combustiónará en la cocina. La composición del CO<sub>2</sub> en el biogás varía entre el 25 y el 35% (Wheih, 2010); para fines de la propuesta se tomará un promedio entre los dos límites siendo este valor 30%. Siendo la densidad del CO<sub>2</sub> a las condiciones promedio observadas en la Estación Experimental, su valor se toma de: 1.778 kg/m<sup>3</sup> (Coronel Toro, Oliva, Grupo de Termotecnica, Dpto. de Ingeniería Energética, & Universidad de Sevilla, 2016)

$$1.11 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 * \frac{30\% \text{ CO}_2}{60\% \text{ CH}_4} * \frac{1.778 \text{ kg}}{\text{m}^3} \text{ CO}_2 = 0.99 \text{ kg de CO}_2$$

En total, la cantidad de CO<sub>2</sub> que se libera a la atmósfera será la suma de las dos cantidades antes calculadas:

$$\text{CO}_2 \text{ liberado por día} = (2.13 + 0.99) \text{ kg de CO}_2$$

$$\text{CO}_2 \text{ liberado por día} = 3.12 \text{ kg de CO}_2$$

## Cálculo de la cantidad de CO<sub>2</sub> equivalente del metano

La cantidad de CO<sub>2</sub> equivalente es la unidad de medición usada para indicar el potencial de calentamiento global de cada uno de los gases de efecto invernadero, en comparación con el dióxido de carbono.

Los gases de efecto invernadero distintos del dióxido de carbono son convertidos a su valor de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub> eq) multiplicando la masa del gas en cuestión por su potencial de calentamiento global (CARBÓN TRUST/DEFRA/BSI, 2008). La ecuación A48.3, describe el proceso para el cálculo de este:

$$CO_{2eq} = masa\ del\ gas * potencial\ de\ calentamiento\ global$$

*Ecuación A47. 3*

Según el Quinto Informe de Evaluación del IPCC, el potencial de calentamiento global para el gas metano (CH<sub>4</sub>) y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), calculado para un horizonte temporal de 100 años, es igual a 28 y 1 respectivamente. Calculando el CO<sub>2</sub> eq para la cantidad de metano que se genera, se tiene:

$$CO_{2eq\ metano} = masa\ del\ gas * 28$$

$$CO_{2eq\ metano} = 775.22\ g\ de\ CH_4 * 28$$

$$CO_{2eq\ metano} = 21706.2\ g\ de\ CH_4 \cong 21.71\ kg\ de\ CH_4$$

De nuevo, debido a que la composición del biogás utilizada para fines de la propuesta el 30% CO<sub>2</sub>, 60% CH<sub>4</sub>, es necesario realizar la suma de las dos cantidades:

$$CO_2\ liberado = (21.71 + 0.99)\ kg\ de\ CO_2$$

$$CO_2\ liberado = 22.7\ kg\ de\ CO_2$$

Lo cual significa, que aprovechando el biogás como fuente de combustible para su uso en la cocina se dejan de emitir una cantidad **diaria** de CO<sub>2</sub> aproximadamente igual a:

$$CO_2\ que\ se\ dejaría\ de\ emitir\ a\ la\ atmósfera\ por\ día = 22.7\ kg\ de\ CO_2 - 3.12\ kg\ de\ CO_2$$

$$CO_2\ que\ se\ dejaría\ de\ emitir\ a\ la\ atmósfera\ por\ día = 19.58\ kg\ de\ CO_2$$

## ANEXO A48: MEDICIÓN DE DENSIDAD

### Determinación de densidad del Agua Residual

Para determinar la densidad del líquido, se hizo uso de un beaker de 50 mL debido a la naturaleza del líquido; y con la ayuda de una pipeta volumétrica de 10 mL, una pera de succión y una balanza analítica, se determinó la masa de cada muestra de agua residual, variando el volumen agregado en el beaker. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla A48.1:

Tabla A481: Resultados de medición de densidad para el agua residual.

Volumen (mL)	Masa B+L (g)	Masa B	Masa L	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
10	38.382	28.227	10.155	1.01550	1015.50
20	48.127	28.227	19.900	0.99500	995.00
30	58.008	28.227	29.981	0.99930	999.37
40	67.877	28.227	39.950	0.99875	998.75
50	77.890	28.227	50.063	1.00126	1001.26
<b>PROMEDIO</b>				1.00196	1001.96

Fuente: Elaboración propia

### Determinación de la densidad de los lodos (Biosol) generados posterior a la digestión anaeróbica

Posterior al tiempo de retención de 20 días la densidad fue medida de la misma forma que el agua residual descargada por el estable.

Tabla A48. 2: Resultados de medición de densidad para lodos (Biosol) generados posterior digestión anaeróbica

Volumen (mL)	Masa B+L (g)	Masa B	Masa L	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
10	40.661	30.551	10.11	1.01	1011
20	50.415	30.551	19.864	0.99	993.20
30	60.565	30.551	30.014	1.00	1000.47
40	70.523	30.551	39.972	1.00	999.30
50	80.724	30.551	50.173	1.00	1003.46
<b>PROMEDIO</b>				1.00	1001.48

Fuente: Elaboración propia

Determinación de la densidad del agua (Biol) generada posterior a la digestión anaeróbica con un tiempo de retención de 20 días.

Esta se realiza haciendo uso de los datos obtenidos al comienzo de la determinación de sólidos volátiles (Tabla A10.1). Mediante estos datos, se calcula la masa correspondiente a cuatro muestras de Biol de 30 mL.

Tabla A48. 3: Resultados de medición de densidad para Biol posterior digestión anaeróbica

Muestra	Crisol (g)	Crisol+ Muestra (g)	Masa de muestra (g)	Densidad (g/mL)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
<b>M1</b>	49.289	79.170	29.881	0.996033	996.033
<b>M2</b>	23.680	53.562	29.882	0.996067	996.067
<b>M3</b>	53.296	83.301	30.005	1.00017	1000.17
<b>M4</b>	29.386	59.329	29.943	0.9981	998.1
Promedio			29.9278	0.997975	997.975

Fuente: Elaboración propia

## ANEXO A49: ESTIMACIÓN TEÓRICA DE LOS PARÁMETROS DE SALIDA DEL AGUA RESIUDAL POSTERIOR AL TRATAMIENTO PRIMARIO Y SECUNDARIO.

- **Estimación del valor de  $DBO_5$**

Se mantiene una relación entre la  $DBO_5/DQO$  del agua residual el cual en base a los resultados del muestreo a la entrada del tratamiento tiene un valor de: 0.8316, que permite determinar a partir del valor de  $DBO_5$  a la salida del tratamiento por medio del valor de  $DQO$ .

$$\frac{DBO_5}{DQO} = 0.8316$$

$$DBO_5 = 0.8316 * DQO$$

*Ecuación A49.1*

Si  $DQO$  a la salida de la digestión anaeróbica tiene un valor de 1588 mg/mL que al sustituir en la ecuación A49.1, se obtiene:

$$DBO_5 = 0.8316 * 1588 \frac{mg}{mL} = 1320.58 \frac{mg}{mL}$$

Si  $DQO$  a la salida del tratamiento fisicoquímico tiene un valor de 438 mg/mL que al sustituir en la ecuación A49.1, se obtiene

$$DBO_5 = 0.8316 * 438 \frac{mg}{mL} = 364.24 \frac{mg}{mL}$$

- **Estimación del valor de aceites y grasas**

Hidalgo (2017) indica una remoción de por lo menos el 60% en el valor de aceites y grasas al final del tratamiento se determina por medio de la ecuación A49.2.

$$AyG_{final} = AyG_{inicio} - 0.6 * AyG_{final}$$

*Ecuación A49.2*

$$AyG_{final} = 90 \frac{mg}{mL} - 0.6 * 90 \frac{mg}{mL} = 36 \frac{mg}{mL}$$

- **Estimación de Coliformes totales**

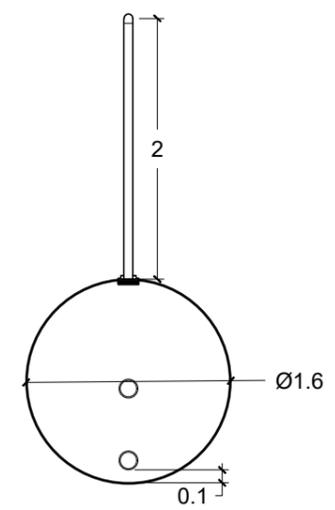
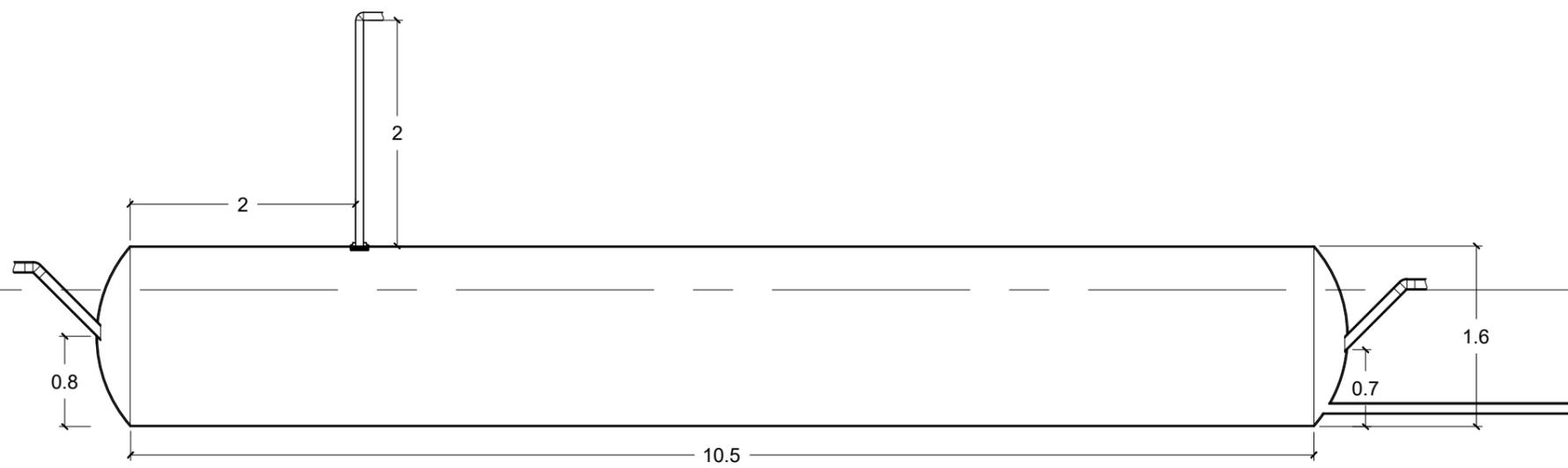
Hidalgo (2017) indica que la cantidad de organismos patógenos, en la digestión anaerobia, se ven reducidos en por lo menos un 60%, partiendo de eso el valor de coliformes totales a la salida del tratamiento se determina por la ecuación A49.3:

$$Coliformes\ totales = Coliformes\ totales - 0.6 * Coliformes\ totales$$

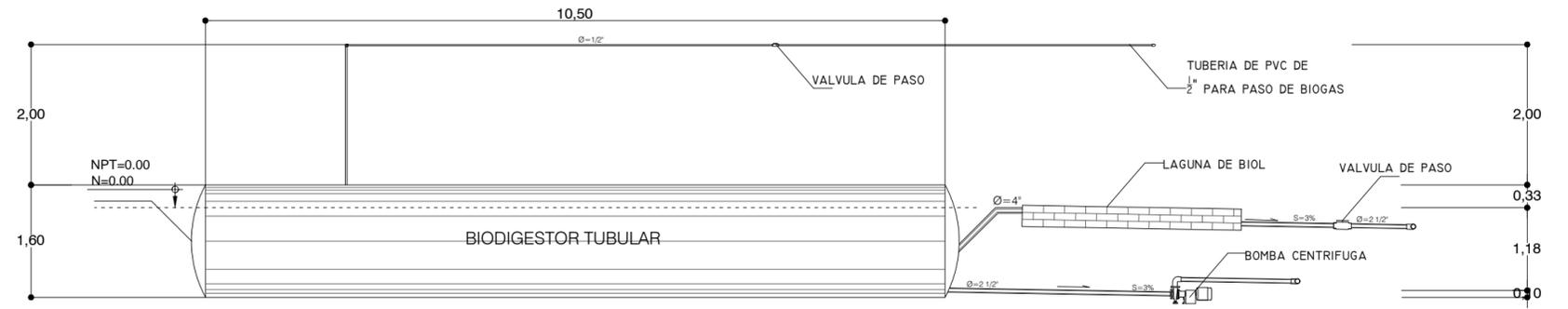
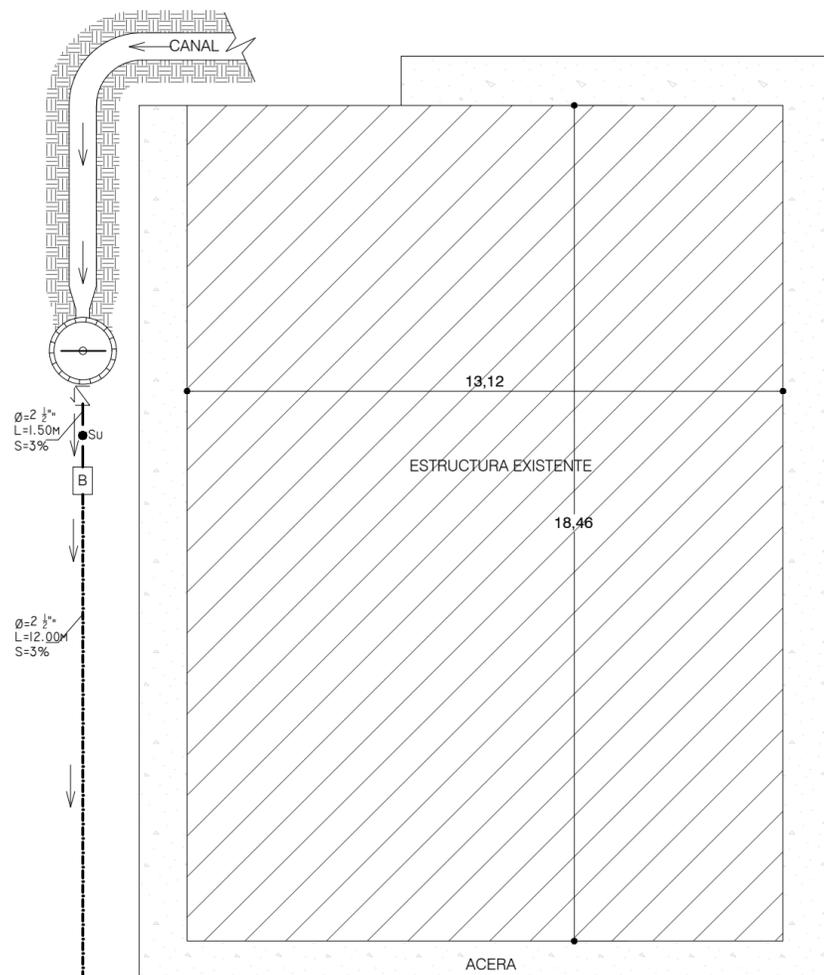
*Ecuación A49.3*

$$Coliformes\ totales = 24,000 \frac{NMP}{100mL} - 0.6 * 4,000 \frac{NMP}{100mL}$$

$$Coliformes\ totales = 9,600 \frac{NMP}{100mL}$$

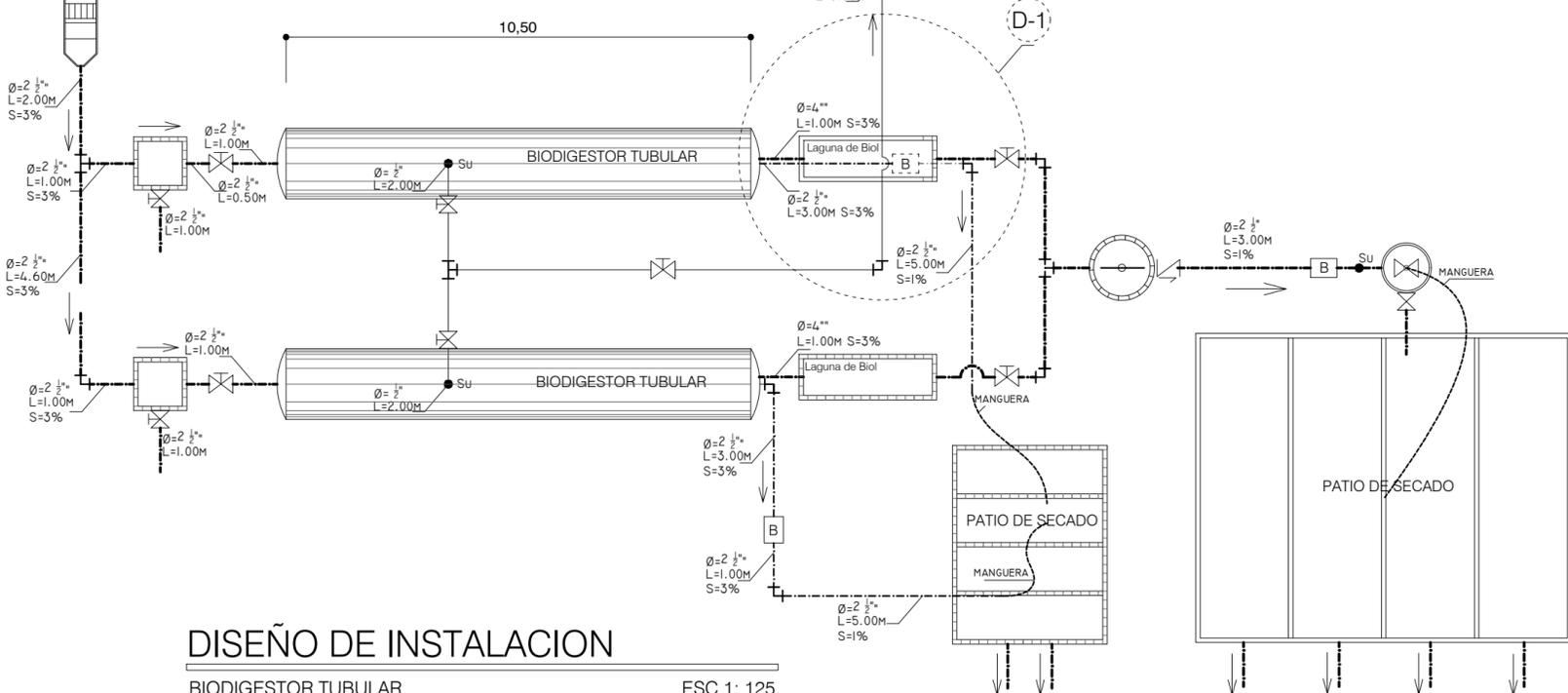
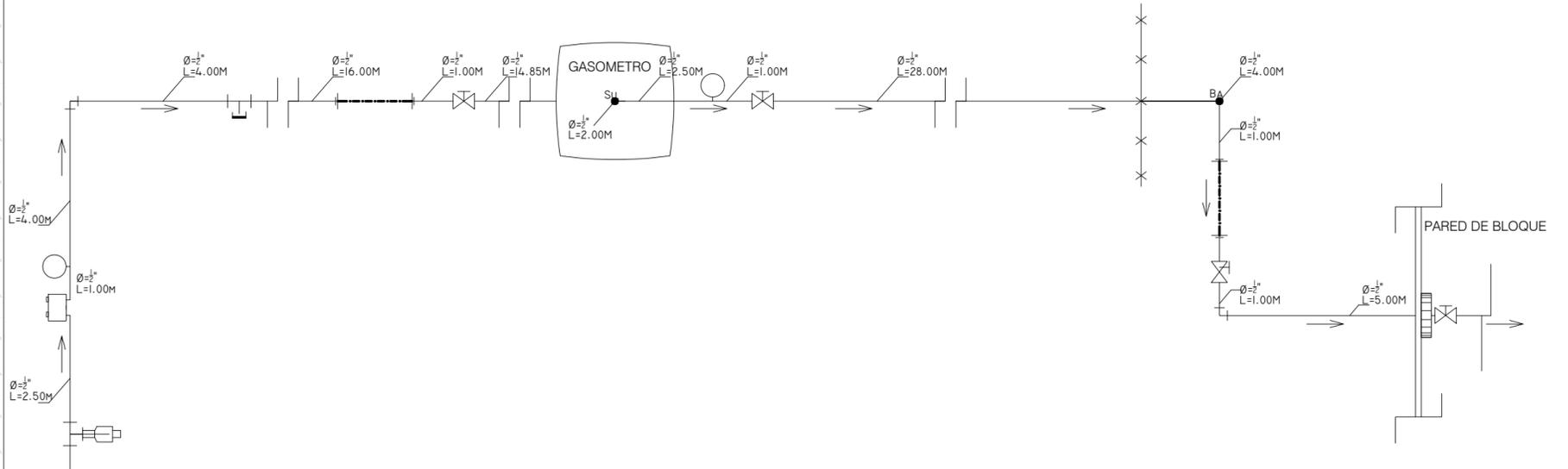


# BIODIGESTOR TUBULAR



DETALLE D-1

PASO DE TUBERIAS SUPERPUESTAS esc.1: 75



DISEÑO DE INSTALACION

BIODIGESTOR TUBULAR

ESC 1: 125

SIMBOLOGIA			
ESQUEMA	DESCRIPCION	ESQUEMA	DESCRIPCION
	TUBERIA DE PVC DE 2 1/2"		MEDIDOR DE FLUJO INALÁMBRICO DE 10kPa
	TUBERIA DE CONDUCCIÓN DE BIOGAS DE 1/2" PVC		MANÓMETRO DE CÁPSULA DE 0-250mbar
	VÁLVULA DE PASO		CODO DE PVC A 90°
	VÁLVULA CHECK		CONEXIÓN "T" DE TUBERIA DE PVC
	BOMBA CENTRIFUGA		CONEXIÓN "M" DE ROSCA DE 1/2" PVC CON ROSCA MACHO
	CILINDRO HOMOGENIZADOR 1/2 HP		SOPLADOR TURBOTRON CON PRESIÓN DE 88mbar Y FLUJO 0.044m³/h PARA 60Hz
	SISTEMA DE REJILLA CON DOS CÁMARAS		CORTALLAMA DE BIODIGESTOR
	CAJA DE DISTRIBUCION		FILTRO DE H'S DE PVC 2" CON 2 REDUCTORES DE 2" A 1 1/2" Y DE 1 1/2" A 1"
	TUBERIA EN VERTICAL		MALLA CICLÓN GALVANIZADA
	TUBERIA EN VERTICAL SUBIENDO		LINEA DE CORTE
	TUBERIA EN VERTICAL BAJANDO		FILTRO DE CO2 CON BOTELLA PLASTICA
	TANQUE CLARIFICADOR		PASO DE TUBERÍA SOBRE OTRA

UES



FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

PROYECTO: DISEÑO DE SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE ESTABLO DE GANADO VACUNO

PLANO: PLANO DE INSTALACION DE BIODIGESTOR TUBULAR

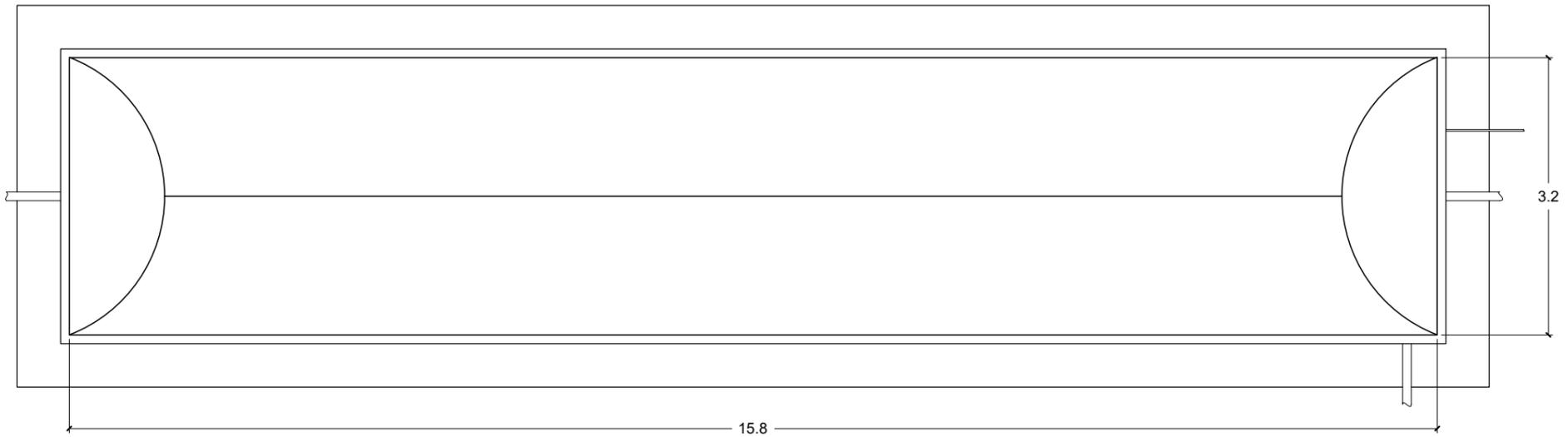
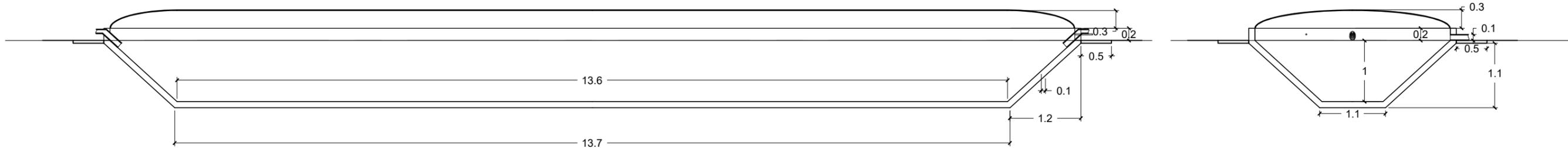
PRESENTA: GUEVARA LOZANO ROCIO CORINA MARTINEZ ORELLANA TANIA MAREYLI

DIBUJO: VILLEDA MELARA DORA MARCELA

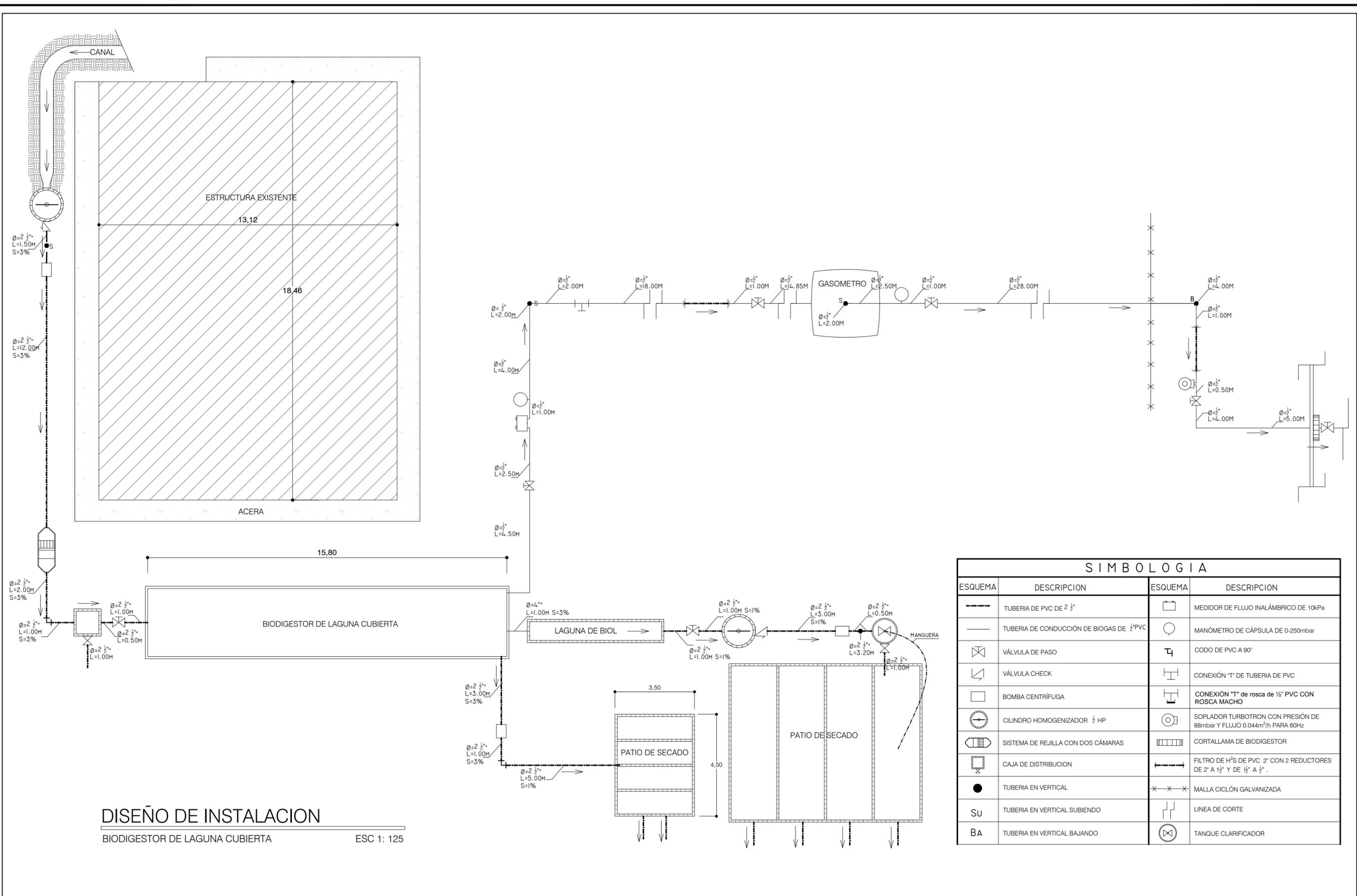
ESCALA: 1:125

FECHA: SEP-2017

HOJA: L-1



**BIODIGESTOR LAGUNA CUBIERTA**



SIMBOLOGIA			
ESQUEMA	DESCRIPCION	ESQUEMA	DESCRIPCION
	TUBERIA DE PVC DE 2 1/2"		MEDIDOR DE FLUJO INALÁMBRICO DE 10kPa
	TUBERIA DE CONDUCCIÓN DE BIOGAS DE 1/2" PVC		MANÓMETRO DE CÁPSULA DE 0-250mbar
	VÁLVULA DE PASO		CODO DE PVC A 90°
	VÁLVULA CHECK		CONEXIÓN "T" DE TUBERIA DE PVC
	BOMBA CENTRIFUGA		CONEXIÓN "T" de rosca de 1/2" PVC CON ROSCA MACHO
	CILINDRO HOMOGENIZADOR 1/2 HP		SOPLADOR TURBOTRON CON PRESIÓN DE 88mbar Y FLUJO 0.044m³/h PARA 60Hz
	SISTEMA DE REJILLA CON DOS CÁMARAS		CORTALLAMA DE BIODIGESTOR
	CAJA DE DISTRIBUCION		FILTRO DE H <sub>2</sub> S DE PVC 2" CON 2 REDUCTORES DE 2" A 1 1/2" Y DE 1 1/2" A 1"
	TUBERIA EN VERTICAL		MALLA CICLÓN GALVANIZADA
SU	TUBERIA EN VERTICAL SUBIENDO		LINEA DE CORTE
BA	TUBERIA EN VERTICAL BAJANDO		TANQUE CLARIFICADOR

**UES**

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

PROYECTO: **DISEÑO DE SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE ESTABLO DE GANADO VACUNO**

PLANO: **PLANO DE INSTALACION DE BIODIGESTOR DE LAGUNA CUBIERTA**

PRESENTA: **GUEVARA LOZANO ROCIO CORINA  
MARTINEZ ORELLANA TANIA MAREYLI**

DIBUJO: **VILLEDA MELARA DORA MARCELA**

ESCALA: **1:125**

FECHA: **SEP-2017**

HOJA: **L-2**