

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO



**EVALUACIÓN DE LA INTEGRACIÓN DE BIODIGESTORES
EN LA CADENA DE VALOR DE LA GANADERÍA EN EL
MUNICIPIO DE CHALATENANGO CENTRO**

PRESENTADO POR:

DIMAS ODUL SERRANO ORTIZ

PARA OPTAR AL TITULO DE:

MAESTRO EN ENERGÍAS RENOVABLES Y MEDIO AMBIENTE

CIUDAD UNIVERSITARIA, MAYO 2026

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSc. JUAN ROSA QUINTANILLA

SECRETARIO GENERAL:

LCDO. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

MSc. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA

SECRETARIO:

ARQ. RAÚL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA

ESCUELA DE POSGRADO

DIRECTOR:

MSc. ELMER ARTURO CARBALLO RUÍZ

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

MAESTRO EN ENERGÍAS RENOVABLES Y MEDIO AMBIENTE

Título:

**EVALUACIÓN DE LA INTEGRACIÓN DE
BIODIGESTORES EN LA CADENA DE VALOR DE LA
GANADERÍA EN EL MUNICIPIO DE CHALATENANGO
CENTRO**

Presentado por:

DIMAS ODUL SERRANO ORTIZ

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor(a):

MSc. JOSÉ ALBERTO FABIÁN AGUILAR

SAN SALVADOR, MAYO 2026.

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor(a):

MSc. JOSÉ ALBERTO FABIÁN AGUILAR

DEDICATORIA

A mi hija, Minerva Yaneth, por ser mi mayor fuente de motivación y por enseñarme a mirar nuevamente el mundo con la imaginación, la esperanza y la capacidad de asombro de un niño; por recordarme que aún es posible creer que todo puede alcanzarse.

A mi hijo, Khalil Odul, quien viene en camino, de quien espero aprender profundamente y a quien deseo inculcar el amor por la familia, el conocimiento y la ciencia.

A mi esposa, Marta Yaneth, por acompañarme en cada aventura y creer en mí incluso en los momentos en que yo mismo he dejado de hacerlo; por renovar mis fuerzas y ser el faro que me orienta cuando pierdo el rumbo en medio de la oscuridad.

A mi familia extendida, por ser refugio constante, lugar de abrigo y espacio donde siempre encuentro resguardo para renovar mi espíritu.

A la Conciencia Primera, por permitirme habitar este tiempo y este espacio. A ella elevo mi petición de sabiduría y humildad para servir con entrega, responsabilidad y sentido humano.

Dimas Serrano

AGRADECIMIENTOS

A los señores Roberto Lemus y Amílcar Portillo, por haber sido parte fundamental en el proceso de recolección de datos de campo en las ganaderías visitadas en los distritos de La Reina y Agua Caliente. Su disposición permitió el acceso a los establos y facilitó la obtención de la información necesaria para el desarrollo de la presente investigación.

Al personal docente de la Universidad de El Salvador, por compartir sus conocimientos y contribuir a mi formación en esta área, la cual espero poner al servicio de mi país. De manera especial, al Maestro José Alberto Fabián Aguilar, docente asesor de este trabajo de investigación, por su acompañamiento, orientación y apoyo durante cada una de las fases de su desarrollo.

A mi familia, por acompañarme y motivarme en mis procesos formativos, por creer siempre en mis capacidades y por impulsarme a buscar el conocimiento con responsabilidad, compromiso y sentido de servicio hacia los demás.

RESUMEN

La presente investigación evalúa la incorporación de biodigestores en la cadena de valor de la ganadería en el municipio de Chalatenango Centro, como una alternativa orientada a mejorar la sostenibilidad ambiental y la rentabilidad del sector. El estudio surge en un contexto donde la actividad ganadera, pese a su relevancia económica y social en las zonas rurales, enfrenta limitaciones asociadas a la baja adopción tecnológica, el manejo inadecuado de residuos y la presión creciente por cumplir con compromisos ambientales vinculados al cambio climático.

El enfoque metodológico se fundamenta en la recopilación de información de campo en unidades productivas representativas, considerando variables relacionadas con la caracterización del ganado, las condiciones de estabulación, la generación de residuos y las prácticas de manejo existentes. A partir de esta información, se desarrolló el diseño de sistemas de biodigestión adaptados a las condiciones específicas de cada explotación, incorporando criterios técnicos asociados al proceso de digestión anaerobia, el dimensionamiento del reactor y el tratamiento de los subproductos generados.

La investigación analiza la integración de los biodigestores como un componente funcional dentro del sistema productivo ganadero, evaluando su capacidad para transformar los residuos orgánicos en recursos útiles, tales como biogás y biofertilizante. En este sentido, se identifican oportunidades para el aprovechamiento energético del biogás en actividades propias de la producción, así como para la reutilización del digestato en procesos agrícolas vinculados a la alimentación del ganado, promoviendo un enfoque de economía circular.

Adicionalmente, se desarrolla un análisis económico orientado a determinar la viabilidad de la implementación de estos sistemas, considerando los costos de inversión, operación y los beneficios derivados de la sustitución de insumos tradicionales. Los resultados evidencian que la incorporación de biodigestores puede generar condiciones favorables para mejorar la eficiencia del sistema productivo, especialmente cuando se integran de manera adecuada a las dinámicas operativas de las granjas.

Desde la perspectiva ambiental, el estudio destaca el potencial de los biodigestores para contribuir a la reducción de impactos asociados al manejo de residuos ganaderos, particularmente en lo relativo a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero y la mejora en la calidad de los efluentes. Asimismo, se reconoce su alineación con el marco normativo nacional y con los compromisos internacionales en materia de mitigación del cambio climático.

CONTENIDO

Dedicatoria.....	i
Agradecimientos.....	ii
Resumen.....	iii
contenido.....	iv
lista de tablas.....	vii
1. Alcances y planteamiento del problema.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Contexto.....	1
1.3. Definición del problema.....	2
1.4. Hipótesis.....	2
1.5. Objetivos.....	3
1.5.1. General.....	3
1.5.2. Específicos.....	3
1.6. Justificación.....	3
1.7. Beneficios esperados.....	4
1.8. Delimitación y limitaciones de la investigación.....	4
1.9. Antecedentes.....	5
1.9.1. Ganadería en el salvador.....	5
1.9.2. Gases de efecto invernadero (GEI).....	6
1.9.3. Impacto en la calidad del agua.....	7
2. Marco teórico.....	9
2.1. Ganadería en el salvador.....	9
2.2. Cadena de valor de la ganadería.....	12
2.2.1. Producción primaria.....	12
2.2.2. Procesamiento.....	13
2.3. Biodigestores.....	15
2.4. Proceso de biodigestión.....	15
2.5. Factores que influyen en la biodigestión.....	20
2.6. Tipos de biodigestores.....	22
2.6.1. Biodigestores de Lote.....	22
2.6.2. Biodigestores Continuos.....	22
2.6.3. Biodigestores de Flujo Pistón.....	23
2.6.4. Biodigestores de Fase Sólida.....	23
2.6.5. Biodigestores de Capas de Sustrato.....	24
2.7. Lagunas facultativas para tratamiento secundario de aguas residuales provenientes de biodigestores.....	24
2.8. Diseño general de biodigestores.....	25
2.8.1. Evaluación de la Materia Prima.....	25
2.8.2. Selección del Tipo de Biodigestor.....	26
2.8.3. Dimensionamiento del Biodigestor.....	26

2.8.4.	Diseño Estructural	26
2.8.5.	Manejo del Digestato.....	27
2.9.	Diseño específico del biodigestor.....	27
2.9.1.	Correlación con talla del animal.....	27
2.10.	Regulaciones ambientales	29
2.10.1.	Ley de Medio Ambiente	29
2.10.2.	Reglamento Especial De Aguas Residuales Y Manejo De Lodos Residuales.....	29
2.10.3.	Reglamento RTS 13.05.01:24: “Aguas Residuales. Parámetros De Calidad De Aguas Residuales Para Descarga Y Manejo De Lodos Residuales.” ..	29
2.10.4.	Lineamientos Técnicos Para La Evaluación De Actividades, Obras O Proyectos Que Comprendan La Alternativa De Reúso De Agua Residual Tratada.....	30
2.11.	Metas de mitigación de emisiones para el sector pecuario	31
3.	Diseño del biodigestor	33
3.1.	Toma de datos en campo.....	33
3.2.	Cálculo de volúmenes	34
3.3.	Tratamiento secundario.....	41
3.4.	Biofertilizante	41
3.5.	Obra civil.....	41
3.6.	Costos de construcción	49
4.	Análisis económico	52
4.1.	Uso de los productos de biodigestión	52
4.1.1.	Biogás	52
4.1.2.	Biofertilizante	54
4.2.	Evaluación de la implementación	55
4.2.1.	Ganadería “El Paraíso”	55
4.2.2.	Ganadería “Luis Pineda”	57
4.2.3.	Ganadería “Ángel Guevara”	60
4.2.4.	Resumen del análisis para las tres ganaderías	62
5.	Reducción de emisión de gases de efecto invernadero (GEI).....	63
5.1.	GEI Evitados ganadería El paraíso.....	63
5.2.	GEI Evitados ganadería Luis Pineda.	64
5.3.	GEI Evitados ganadería Ángel Guevara.	64
6.	Conclusiones y recomendaciones	65
6.1.	Conclusiones	65
6.1.1.	Disponibilidad de biomasa.	65
6.1.2.	Dimensionamiento de los biodigestores.	65
6.1.3.	Aprovechamiento energético.....	65
6.1.4.	Análisis económico.....	65
6.1.5.	Aprovechamiento de subproductos.....	66
6.1.6.	Impactos ambientales positivos.....	66
6.1.7.	Limitaciones metodológicas asumidas.....	66

6.1.8.	Alineamiento con políticas públicas y compromisos climáticos	66
6.1.9.	Validación de la hipótesis.....	67
6.2.	Recomendaciones	67
6.2.1.	Fomentar programas de capacitación y asistencia técnica	67
6.2.2.	Promover esquemas de financiamiento accesibles.....	67
6.2.3.	Diseñar un plan de acompañamiento post-instalación.....	67
6.2.4.	Incluir estos sistemas en planes de entidades públicas	67
6.2.5.	Incorporar análisis químicos en futuras investigaciones.....	67
6.2.6.	Incentivar experiencias piloto con monitoreo público.....	68
7.	Bibliografía	69
ANEXOS		72
A.	ANEXO 1: CÁLCULO DE DEPOSICIONES DIARIAS.	72
B.	ANEXO 2: CÁLCULO DE HUMEDADES DE MUESTRAS DE EXCRETAS.	74
C.	ANEXO 3: ANÁLISIS DE COSTOS UNITARIOS.....	75

LISTA DE TABLAS

Tabla No. 1: Transformaciones en la etapa de hidrólisis.

Tabla No. 2: Transformaciones en la etapa de acidogénesis.

Tabla No. 3: Transformaciones en la etapa de acetogénesis.

Tabla No. 4: Análisis elemental del estiércol de ganado bovino.

Tabla No. 5: Análisis próximo del estiércol de ganado bovino (valores medios).

Tabla No. 6a: valores máximos permisibles de los parámetros relacionados con las actividades que involucren animales vivos y productos del reino animal.

Tabla No. 6b: Parámetros de calidad del agua residual exigidos para el reúso en reúso tipo 5, tomados de la Tabla 1 de los Lineamientos Técnicos Para La Evaluación De Actividades, Obras O Proyectos Que Comprenan La Alternativa De Reúso De Agua Residual Tratada

Tabla No. 7a: Información general de ganadería "El Paraíso" en distrito La Reina.

Tabla No. 7b: Información general de ganadería "Luis Pineda" en distrito Agua Caliente.

Tabla No. 7c: Información general de ganadería "Ángel Guevara" en distrito Agua Caliente.

Tabla No. 8: Producción de biofertilizante de conformidad con cálculos realizados en la sección 3.2.

Tabla No. 9: Cálculo de costo de construcción para biodigestores de las ganaderías "El Paraíso" Y "Ángel Guevara"

Tabla No. 10: Cálculo de costo de construcción para biodigestores de la ganadería "Luis Pineda"

Tabla No. 11: Equivalencias de producción de biogás comparado contra GLP a precio de mercado en El Salvador.

Tabla No. 12: Calculo de payback descontado granja "El Paraíso".

Tabla No. 13: Resumen e interpretación de indicadores para el sistema de biodigestor propuesto para la granja "El paraíso".

Tabla No. 14: Calculo de payback descontado para la granja "Luis Pineda".

Tabla No. 15: Resumen e interpretación de indicadores para el sistema de biodigestor propuesto para la granja "Luis Pineda".

Tabla No. 16: Calculo de payback descontado granja "Ángel Guevara".

Tabla No. 17: Resumen e interpretación de indicadores para el sistema de biodigestor propuesto para la granja "Ángel Guevara".

Tabla No. 18: Resumen de indicadores para las tres ganaderías en estudio.

1. ALCANCES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. INTRODUCCIÓN

Las actividades ganaderas en El Salvador, específicamente en Chalatenango, enfrentan desafíos que comprometen su sostenibilidad, como la baja rentabilidad y la gestión inadecuada de residuos. Ante esta problemática, la integración de biodigestores surge como una estrategia integral, convirtiendo los residuos orgánicos en recursos útiles como biogás y biofertilizante. Aunque la difusión de esta tecnología ha sido limitada en el pasado, el actual contexto salvadoreño ofrece una oportunidad propicia para su exitosa implementación, considerando la creciente conciencia ambiental y la urgencia de soluciones sostenibles ante el cambio climático. Esta investigación se propone explorar en detalle el potencial impacto de los biodigestores en la ganadería del municipio de Chalatenango Centro, evaluando su viabilidad técnica, económica y ambiental, con el fin de proporcionar información valiosa para promover prácticas más sostenibles y rentables en el sector ganadero de la región.

1.2. CONTEXTO

Chalatenango Centro es un municipio recientemente creado con la Ley Especial Para La Reestructuración Municipal (2023) y está compuesto por los distritos de Nueva Concepción, Tejutla, La Reina, Agua Caliente, Dulce Nombre de María, El Paraíso, San Fernando, San Francisco Morazán, San Rafael y Santa Rita. Esta región concentra la mayor cantidad de ganado vacuno en el departamento, representando una importante fuente de trabajo y producción de alimentos para la región, entre productos cárnicos y lácteos. Los principales productores son los distritos de Nueva Concepción, Agua Caliente y la Reina.

1.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La actividad ganadera en los distritos del municipio de Chalatenango Centro, representa una parte vital de la economía local y el sustento de muchas familias. El departamento de Chalatenango tiene el tercer lugar en población de ganado vacuno a nivel nacional según el Ministerio de Agricultura y ganadería (MAG) [1]. Sin embargo, esta actividad también enfrenta desafíos debido, entre otros factores, al cambio climático. Los productores expresan tener poca rentabilidad, a la vez que existe un retraso en la adopción de nuevas tecnologías que ayuden a mejorar sus procesos y aprovechar los residuos provenientes del ganado estabulado.

Ante esta problemática, la integración de biodigestores en la cadena de valor de la ganadería sería una acción con múltiples beneficios, ya que ataca la problemática de los residuos dándoles un uso y generando con ellos biogás que puede ser empleado en actividades dentro del ciclo productivo y además biofertilizante que puede ser empleado en el cultivo de alimento para los animales según D. L. Parra-Ortiz et al [2].

En El Salvador existe un enorme potencial para el aprovechamiento de los desechos del ganado, mediante el uso de biodigestores según Ó. A. Rivera Guardado y R. F. Umaña Hernández [3]. Lamentablemente en el sector existe una barrera cultural que ralentiza la adopción de nuevas tecnologías.

En esta investigación se pretende analizar el impacto de la inclusión de biodigestores en la crianza de ganado vacuno en el municipio de Chalatenango Centro, para determinar si esto genera una ventaja económica que aumente la rentabilidad de los productores.

1.4. HIPÓTESIS

La inclusión de biodigestores dentro de la cadena de valor de la ganadería aumenta su rentabilidad.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. GENERAL

Evaluar la viabilidad de la incorporación de biodigestores en la cadena de valor de la ganadería en tres granjas del municipio de Chalatenango Centro, como estrategia para hacer más rentable la industria ganadera.

1.5.2. ESPECÍFICOS

- Determinar la cantidad de recurso de biomasa (excretas de ganado) que está disponible en tres granjas del municipio de Chalatenango Centro.
- Diseñar un biodigestor tipo que sea compatible con los volúmenes de desechos generados en cada estable.
- Determinar cuál sería el uso del biogás que generaría mayor ahorro energético dentro de los procesos productivos de las granjas.
- Elaborar un análisis costo-beneficio para la inclusión los biodigestores en las granjas de estudio.

1.6. JUSTIFICACIÓN

La biodigestión anaerobia es un tema ampliamente estudiado y cuenta con un extenso cuerpo de conocimiento. Una de las áreas de aplicación que suscita mayor interés es el tratamiento de residuos agrícolas y ganaderos. A pesar de la abundante investigación en este campo, aún no se ha logrado una implementación masiva de estos sistemas en el país, lo que priva a los productores de las ventajas que ofrecen los biodigestores en sus procesos productivos.

Según Ó. A. Rivera Guardado y R. F. Umaña Hernández [3], el uso de biodigestores presenta numerosas ventajas, como ser una fuente de energía renovable, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, disminuir la dependencia de combustibles fósiles y aprovechar el digesto como fertilizante, entre otras. A pesar de estas ventajas,

en nuestro país han existido iniciativas en forma de proyectos piloto para promover el uso de biodigestores, pero la mayoría de ellos han sido abandonados por los usuarios.

La presente investigación determinará el impacto que la incorporación de biodigestores tiene en la cadena de valor de la ganadería en el municipio de Chalatenango Centro, con una evaluación integral de aspectos ambientales y económicos. Es crucial comprender cómo la adopción de esta tecnología puede influir en la sostenibilidad ambiental y la rentabilidad del sector ganadero.

Al abordar esta investigación, se busca llenar el vacío existente entre el conocimiento teórico sobre los biodigestores y su aplicación práctica en el contexto local del municipio de Chalatenango Centro. Los resultados de este estudio proporcionarán información valiosa para los productores ganaderos, las autoridades gubernamentales y otros actores interesados en promover prácticas agrícolas sostenibles y rentables en la región.

1.7. BENEFICIOS ESPERADOS

Se espera demostrar que la inclusión de biodigestores en la cadena de valor de la ganadería mejora su rentabilidad y se espera poder promover el uso de sistemas de biodigestión anaerobia para la industria ganadera en el municipio de Chalatenango Centro, departamento de Chalatenango.

1.8. DELIMITACIÓN Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación se realizará obteniendo información de campo en tres granjas ubicadas en el municipio de Chalatenango Centro. Teniendo en cuenta consideraciones que nos hagan considerarlas como representativas de la ganadería en la región.

La caracterización del sustrato, del biogás y sus subproductos se realizará de forma teórica tomando como variables la raza, nutrición y características particulares del ganado.

1.9. ANTECEDENTES

1.9.1. Ganadería en el salvador

El desarrollo económico de El Salvador, al igual que el de otros países de la región, ha estado históricamente ligado a las actividades agrícolas y ganaderas. Sin embargo, en las últimas décadas, diversos factores ambientales, sociales y técnicos han influido en una disminución gradual de la relevancia de este sector. Según el Banco Central de Reserva (BCR), la contribución de la agricultura y la ganadería al Producto Interno Bruto (PIB) se ha reducido del 12% hace una década al 5% en el año 2023. A pesar de este declive, la ganadería continúa siendo una actividad productiva vital que aporta un gran valor económico, genera empleo y juega un papel fundamental en la seguridad alimentaria del país.

En el departamento de Chalatenango, dado la predominancia de poblaciones rurales (74% según el VII Censo de Población y VI de Vivienda 2024), ha existido una vocación ganadera por tradición, la cual también se ha visto mermada en la última década, sin embargo, en los últimos tres años presenta cierta estabilidad, lo cual se refleja en una población de ganado vacuno constante, la cual ronda las 80mil cabezas de ganado según el Ministerio de Agricultura y ganadería (MAG) [1].

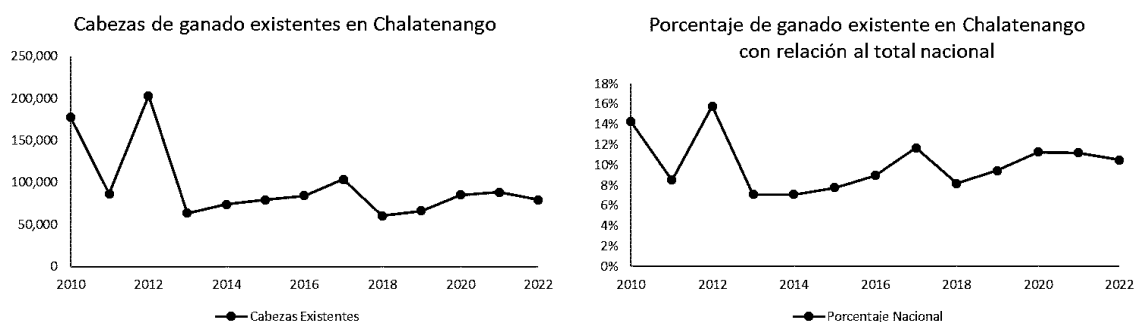


Figura No.1: Población de ganado vacuno en el departamento de Chalatenango y porcentaje con relación a los totales nacionales. Con base en el Anuario de Estadísticas Agropecuarias 2022-2023 [1].

1.9.2. Gases de efecto invernadero (GEI)

El sector ganadero en El Salvador es una fuente significativa de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O). Estas emisiones están asociadas a los procesos biológicos inherentes a la actividad pecuaria, como la fermentación entérica y el manejo de estiércol. El Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) 2014, incluido en el Primer Informe Bienal de Actualización 2018 [4], proporciona un análisis detallado de las emisiones de este sector, destacando su relevancia en el balance nacional de GEI.

En 2014, las emisiones totales del sector ganadero alcanzaron 1,782.3 kilotoneladas de CO_2 eq, lo que representó el 15.1% de las emisiones del sector Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra (AFOLU). Estas emisiones se dividen principalmente entre fermentación entérica y manejo de estiércol, siendo la primera la fuente predominante [4].

a. Fermentación entérica.

La fermentación entérica generó la mayor parte de las emisiones de CH_4 en el sector ganadero, con un total de 1,320 kilotoneladas de CO_2 eq. El ganado vacuno fue el principal contribuyente, debido a su alta población y características fisiológicas. Este subproceso constituye aproximadamente el 74% de las emisiones totales del sector ganadero, lo que refuerza la necesidad de estrategias de mitigación específicas, como la mejora de la dieta y la gestión del pastoreo.

b. Manejo de estiércol.

El manejo de estiércol produjo 462.3 kilotoneladas de CO_2 eq, representando el 26% de las emisiones del sector ganadero. Estas emisiones están compuestas principalmente por óxido nitroso y metano, liberados durante la descomposición del estiércol en condiciones anaeróbicas. Este dato resalta la importancia de implementar tecnologías

como biodigestores para reducir emisiones y aprovechar el metano generado como fuente de energía renovable.

El sector ganadero contribuyó significativamente al INGEI nacional, representando aproximadamente el 8.7% de las emisiones totales del país en 2014. Su impacto destaca la necesidad de priorizar medidas de mitigación en este sector, especialmente dado su papel crítico en la economía rural y la seguridad alimentaria del país.

1.9.3. Impacto en la calidad del agua.

El sector ganadero en El Salvador constituye un pilar de la economía rural, sin embargo, su desarrollo intensivo plantea serios desafíos en términos de sostenibilidad ambiental. Las aguas residuales generadas por esta actividad, compuestas por orina, heces, agua de lavado y residuos alimentarios, contienen concentraciones elevadas de materia orgánica, nutrientes como nitrógeno y fósforo, además de microorganismos patógenos. La falta de un tratamiento adecuado de estas aguas puede derivar en impactos ambientales graves y riesgos significativos para la salud de las comunidades rurales.

Entre los principales contaminantes presentes en estos efluentes destacan:

- **Materia orgánica:** Predominantemente compuesta por residuos de excretas del ganado, con alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO), lo que genera un efecto perjudicial sobre la calidad del agua.
- **Nutrientes:** Concentraciones excesivas de nitrógeno y fósforo que promueven la eutrofización en cuerpos de agua, alterando el equilibrio ecológico.
- **Patógenos:** Microorganismos como bacterias coliformes, virus y parásitos que representan un riesgo directo para la salud humana y animal.

Los efectos de esta contaminación se manifiestan en diversas formas:

- **Degradación de aguas superficiales y subterráneas:** La escorrentía y las infiltraciones transportan contaminantes hacia ríos, lagos y acuíferos, deteriorando

su calidad y comprometiendo su disponibilidad para consumo humano y usos agrícolas.

- Eutrofización de cuerpos de agua: El aporte excesivo de nutrientes favorece el crecimiento desmedido de algas, reduciendo el oxígeno disuelto y afectando la biodiversidad acuática.
- Emisiones de gases de efecto invernadero: La descomposición anaeróbica de los residuos ganaderos libera metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), ambos con un impacto considerable en el calentamiento global.
- Afectaciones a la salud pública: La exposición a aguas contaminadas incrementa el riesgo de enfermedades gastrointestinales y otras afecciones asociadas con los patógenos presentes.

La contribución de la actividad ganadera a la contaminación hídrica es sustancial y se extiende a lo largo de todas las etapas del proceso productivo, desde la generación de excretas hasta el procesamiento de productos cárnicos y lácteos. Asimismo, la intensificación del cultivo de alimentos para el ganado y los cambios en el uso del suelo asociados a esta actividad impactan de manera significativa en el ciclo del agua. Estos procesos no solo agravan la contaminación, sino que también contribuyen a la pérdida de biodiversidad, la erosión del suelo y la emisión de gases de efecto invernadero.

Abordar estos desafíos implica la necesidad de implementar prácticas ganaderas más sostenibles que mitiguen los efectos negativos sobre los recursos hídricos y los ecosistemas. Esto incluye la adopción de tecnologías de tratamiento de aguas residuales, el manejo eficiente de los recursos naturales y la planificación integral de las actividades agropecuarias. Solo a través de un enfoque sostenible será posible compatibilizar el desarrollo del sector ganadero con la protección de los recursos hídricos y la preservación de la calidad del agua como un recurso indispensable para la vida y el desarrollo socioeconómico.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. GANADERÍA EN EL SALVADOR

La ganadería en El Salvador es una actividad económica esencial, especialmente en las zonas rurales donde proporciona ingresos y sustento a numerosas familias. El sector ganadero incluye principalmente la cría de bovinos, porcinos, aves y caprinos, con un enfoque significativo en la producción de leche y carne. Sin embargo, en las últimas décadas, la población de ganado en El Salvador ha experimentado una reducción considerable debido a diversos factores, como la urbanización, la falta de incentivos económicos y las prácticas agrícolas insostenibles.

La población de ganado en El Salvador ha disminuido en parte debido a la migración de poblaciones rurales a áreas urbanas, lo que ha reducido la mano de obra disponible para actividades ganaderas. Adicionalmente, la falta de políticas de apoyo adecuadas y la competencia con productos importados han afectado negativamente a los pequeños y medianos productores ganaderos. Esta tendencia de reducción de la población ganadera tiene implicaciones directas en la seguridad alimentaria y la economía rural del país.

La agricultura y ganadería de subsistencia son predominantes en muchas regiones rurales de El Salvador, incluyendo Chalatenango. Estas prácticas implican que los agricultores y ganaderos producen principalmente para el autoconsumo y, en menor medida, para la venta en mercados locales. Este modelo es característico de pequeñas explotaciones familiares que carecen de acceso a tecnologías avanzadas, financiamiento y mercados más amplios [5].

Según datos del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), Chalatenango ocupa el tercer lugar a nivel nacional en población de ganado vacuno, con aproximadamente 80,000 cabezas, representando un 13 % del total nacional. Este hato se utiliza

principalmente para la producción de carne y leche, siendo esta última una fuente de ingresos clave para los pequeños y medianos productores [1].

La Asociación de Productores Agropecuarios de Nueva Concepción (APANC de R.L.) es una de las principales cooperativas en la región. Esta organización opera una planta procesadora de lácteos que produce queso fresco y leche pasteurizada, integrándose como proveedor en los mercados regional y nacional. La APANC emplea prácticas agroecológicas en parte de su producción, promoviendo la sostenibilidad en el manejo de ganado y recursos naturales. Además, la cooperativa ha generado proyectos de mejora genética y asistencia técnica, incrementando los rendimientos productivos de sus asociados.

Por su lado la Asociación Cooperativa de Ahorro y Crédito y de Consumo de Productores Agropecuarios de Chalatenango (ACAYCCOMAC de R.L.) Apoya la comercialización de productos cárnicos y lácteos, además de ofrecer servicios financieros a los ganaderos de la región. Su enfoque incluye fortalecer la cadena de valor mediante capacitaciones y acceso a mercados regionales de conformidad con lo presentado en su sitio web.

A pesar de ser una de las actividades económicas más relevantes de la región, gran parte de las transacciones de compra y venta de productos, principalmente los lácteos, se realizan en la informalidad, lo que dificulta obtener un cálculo preciso del flujo económico que genera esta actividad. Sin embargo, las operaciones relacionadas con la compra y venta de animales están mejor documentadas, ya que se registran en las oficinas distritales mediante el uso de cartas de venta como instrumento oficial.

Además de la ganadería a gran escala, en Chalatenango, la ganadería de subsistencia es una fuente crucial de alimentos y recursos económicos para las familias rurales. Sin embargo, estas prácticas enfrentan desafíos significativos, como la baja productividad, la degradación del suelo y la vulnerabilidad a los cambios climáticos. Mejorar la

sostenibilidad y la eficiencia de la ganadería de subsistencia es esencial para fortalecer la seguridad alimentaria y mejorar las condiciones de vida en estas comunidades.

El sector agropecuario en El Salvador enfrenta varias problemáticas ambientales que afectan tanto a la sostenibilidad de las prácticas agrícolas como a la salud de los ecosistemas locales. Entre las principales problemáticas se incluyen la deforestación, la degradación del suelo, la contaminación del agua y la pérdida de biodiversidad.

- Deforestación y Degradación del Suelo: La expansión agrícola y ganadera a menudo ha llevado a la deforestación, lo que contribuye a la erosión del suelo y a la pérdida de nutrientes esenciales. La práctica de utilizar terrenos inclinados para pastoreo sin medidas adecuadas de conservación del suelo ha exacerbado este problema, resultando en una menor productividad agrícola y ganadera.
- Pérdida de Biodiversidad: La conversión de hábitats naturales en tierras agrícolas y ganaderas ha llevado a una pérdida significativa de biodiversidad en El Salvador. La reducción de áreas forestales y de vegetación natural disminuye el hábitat disponible para numerosas especies de flora y fauna, afectando la biodiversidad local [6].
- Contaminación del Agua: La gestión inadecuada de residuos ganaderos es una fuente importante de contaminación del agua en zonas rurales. El estiércol y otros desechos orgánicos, si no se manejan adecuadamente, pueden infiltrarse en los cuerpos de agua, afectando la calidad del agua potable y los ecosistemas acuáticos [7]. La adopción de tecnologías como los biodigestores puede mitigar este problema al transformar los residuos en biogás y fertilizantes orgánicos.

A pesar de estos desafíos, existen oportunidades para mejorar la sostenibilidad del sector ganadero en El Salvador. La implementación de prácticas agroecológicas, la promoción de tecnologías sostenibles como los biodigestores, y el desarrollo de políticas de apoyo específicas pueden contribuir a una ganadería más sostenible y resiliente. Además, el fortalecimiento de las capacidades técnicas y organizativas de los

productores ganaderos es crucial para mejorar la productividad y la sostenibilidad de sus prácticas [8].

La presente investigación se enfoca en la ganadería del municipio de Chalatenango Centro. Ubicado en el departamento de Chalatenango, es uno de los 44 municipios que componen El Salvador. Fue creado el 13 de junio de 2023, mediante el decreto legislativo que contiene la Ley Especial para la Reestructuración Municipal. Chalatenango Centro está conformado por los distritos de Agua Caliente, Dulce Nombre de María, El Paraíso, La Reina, Nueva Concepción, San Fernando, San Francisco Morazán, San Rafael, Santa Rita y Tejutla. Destaca Nueva Concepción como el centro urbano más habitado, situado a 70 kilómetros de la capital, San Salvador [9].

2.2. CADENA DE VALOR DE LA GANADERÍA

La cadena de valor de la ganadería en El Salvador abarca todas las actividades relacionadas con la producción, procesamiento y comercialización de productos ganaderos, y desempeña un papel fundamental en la economía del país, especialmente en las áreas rurales. Desde la producción primaria hasta el consumo final, cada eslabón de la cadena enfrenta desafíos específicos que afectan su eficiencia y competitividad. En la presente investigación vamos a enfocarnos en los eslabones de la producción primaria y el procesamiento.

2.2.1. Producción primaria.

En la producción primaria, la ganadería se enfoca en la producción de carne y leche, involucrando la crianza de ganado bovino, porcino y aviar. Según el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), aunque la producción de carne bovina ha mostrado un crecimiento sostenido, enfrenta desafíos significativos como la falta de tecnologías avanzadas y la limitada capacidad de financiamiento para pequeños y medianos productores [1]. La infraestructura es un factor crucial, instalaciones adecuadas para el alojamiento del ganado, sistemas de alimentación y abrevaderos son esenciales para

una producción eficiente. Sin embargo, muchas áreas rurales sufren de infraestructura deficiente, lo que impacta negativamente en la productividad.

La alimentación y la salud animal también son aspectos críticos. En El Salvador, el acceso a alimentos balanceados y servicios veterinarios es limitado, lo que reduce la productividad y la calidad de los productos ganaderos. Además, la adopción de tecnologías modernas y buenas prácticas de manejo es vital para mejorar la eficiencia, pero la transferencia de tecnología a los productores locales ha sido lenta, afectando la competitividad del sector.

2.2.2. Procesamiento.

El procesamiento de productos ganaderos incluye el sacrificio de animales y la producción de carne y productos lácteos. Las plantas de procesamiento en El Salvador varían en tamaño y capacidad tecnológica. Las plantas más grandes y tecnológicamente avanzadas son más eficientes y pueden ofrecer productos de mayor calidad, pero muchas de las plantas en el país son pequeñas y carecen de tecnología avanzada. Implementar normas de calidad y seguridad alimentaria es esencial para acceder a mercados locales e internacionales. Sin embargo, muchas plantas pequeñas enfrentan dificultades para cumplir con estos estándares debido a limitaciones económicas y técnicas.

En este contexto, los biodigestores emergen como una solución innovadora y sostenible para la gestión de residuos ganaderos. Al integrar biodigestores en la cadena de valor ganadera, es posible no solo mejorar el manejo de desechos, sino también generar biogás y un digestato rico en nutrientes. Esto no solo reduce el impacto ambiental de la ganadería, sino que también aporta beneficios económicos adicionales al sector, contribuyendo a una cadena de valor más eficiente y sustentable.

FLUJO DE PROCESO DE INDUSTRIA GANADERA

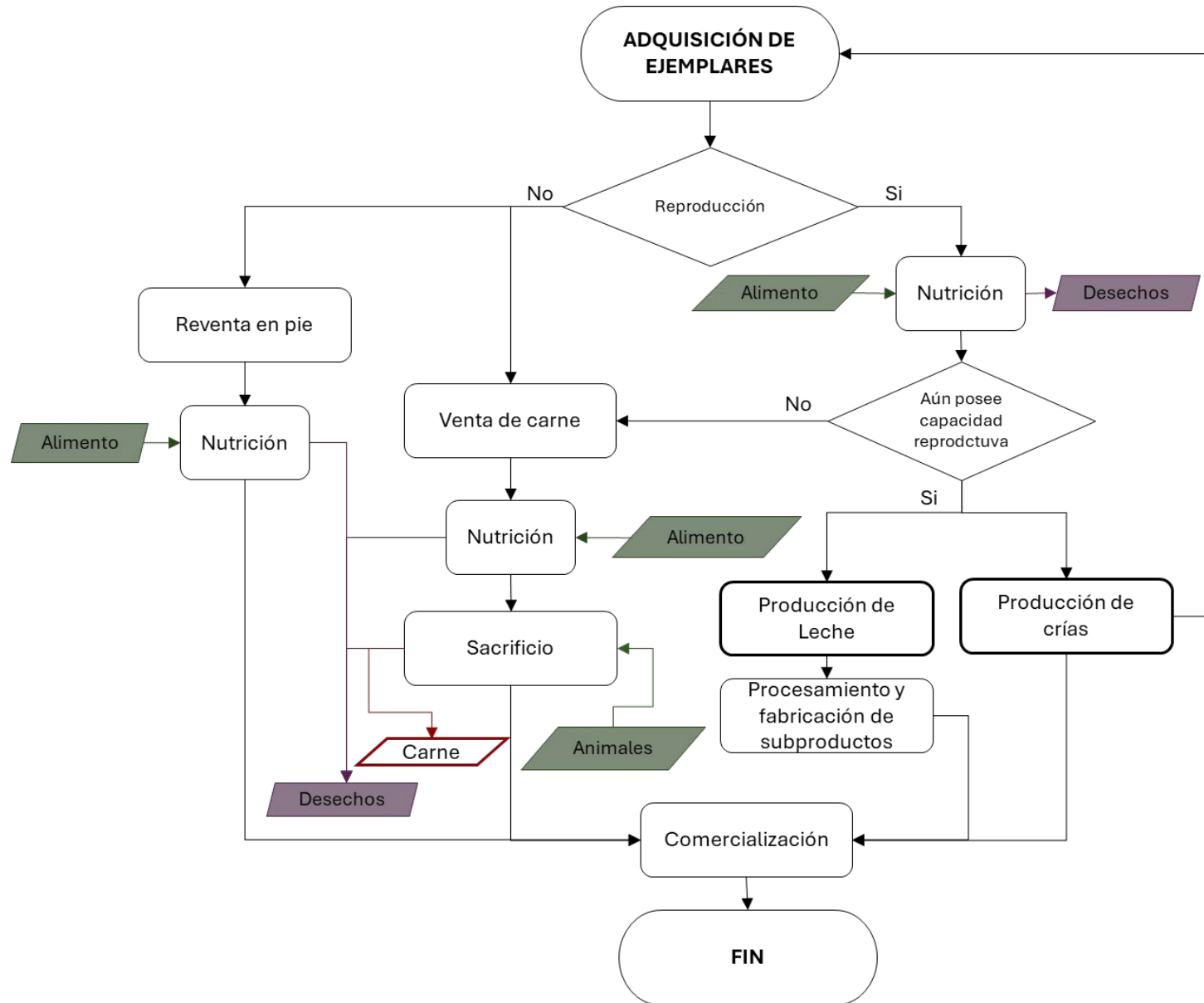


Figura No.2: Proceso productivo general en la industria ganadera de Chalatenango.

2.3. BIODIGESTORES

Los biodigestores son sistemas diseñados para la conversión de materia orgánica en biogás y biofertilizantes mediante un proceso de digestión anaerobia. Este proceso se lleva a cabo en ausencia de oxígeno y es ejecutado por una comunidad de microorganismos anaerobios que descomponen la materia orgánica en condiciones controladas [7]. El biogás producido está compuesto principalmente de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), mientras que el digestato restante es rico en nutrientes y puede utilizarse como fertilizante orgánico.

2.4. PROCESO DE BIODIGESTIÓN

El proceso de biodigestión anaerobia consta de cuatro fases principales, las cuales se describen a continuación:

- **Hidrólisis:** Es la primera etapa crítica en el proceso de digestión anaerobia y es fundamental para la eficiencia global del biodigestor. En esta etapa, las macromoléculas orgánicas complejas contenidas en los residuos (como proteínas, carbohidratos y lípidos) son descompuestas en sus componentes más simples por medio de la acción de enzimas hidrolíticas. Este proceso es llevado a cabo por bacterias hidrolíticas, que secretan estas enzimas al medio ambiente.

Durante la hidrólisis, las principales macromoléculas orgánicas se transforman de la siguiente manera [10] [11] [12]:

Macromoléculas	Compuestos iniciales	Transformación	Productos Finales
Proteínas	Las proteínas son grandes polímeros compuestos por largas cadenas de aminoácidos.	Las enzimas proteasas descomponen las proteínas en péptidos y luego en aminoácidos.	Aminoácidos, que luego pueden ser utilizados por otros microorganismos en las etapas siguientes del proceso de digestión anaerobia.

Macromoléculas	Compuestos iniciales	Transformación	Productos Finales
Carbohidratos	Los carbohidratos incluyen una variedad de polisacáridos como el almidón y la celulosa.	Las enzimas amilasas descomponen el almidón en oligosacáridos y luego en monosacáridos como la glucosa. Las celulasas y hemicelulasas descomponen la celulosa y hemicelulosa en monosacáridos como la glucosa y la xilosa.	Monosacáridos como la glucosa, que sirven como sustrato para las bacterias fermentativas en la etapa de acidogénesis.
Lípidos	Los lípidos están compuestos principalmente de triglicéridos, que son ésteres de ácidos grasos y glicerol.	Las enzimas lipasas hidrolizan los triglicéridos en glicerol y ácidos grasos libres.	Glicerol y ácidos grasos libres, que serán posteriormente metabolizados en las etapas de acidogénesis y acetogénesis.

Tabla No. 1: Transformaciones en la etapa de hidrólisis.

La hidrólisis es esencial porque transforma las macromoléculas orgánicas insolubles en compuestos solubles y de menor peso molecular que pueden ser fácilmente asimilados por las bacterias en las etapas subsecuentes del proceso anaerobio. Sin una hidrólisis eficiente, la materia orgánica no podría ser completamente degradada, lo que reduciría la producción de biogás y la eficiencia del biodigestor [13].

- Acidogénesis: Es la segunda etapa del proceso de digestión anaerobia, y sigue a la hidrólisis. Durante la acidogénesis, los productos de la hidrólisis (monómeros solubles como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos) son convertidos en ácidos grasos volátiles (AGVs), alcoholes, dióxido de carbono (CO_2), hidrógeno (H_2) y otros compuestos intermedios. Este proceso es llevado a cabo por bacterias acidogénicas, que fermentan los compuestos solubles en ausencia de oxígeno [14].

Durante la acidogénesis, los principales compuestos generados en la hidrólisis se transforman de la siguiente manera [10] [11] [12]:

Compuesto	Compuestos iniciales	Transformación	Productos Finales
Monosacáridos	Glucosa, fructosa, entre otros monosacáridos.	Las bacterias acidogénicas fermentan los azúcares a través de vías metabólicas que generan piruvato como intermediario principal. El piruvato puede ser convertido en varios productos, dependiendo de la ruta metabólica específica.	Ácidos grasos volátiles (como ácido acético, ácido propiónico y ácido butírico), etanol, lactato, CO ₂ y H ₂ .
Aminoácidos	Aminoácidos individuales como alanina, glicina, leucina, etc.	Los aminoácidos son desaminados por las bacterias, liberando amoníaco y produciendo ácidos orgánicos y alcoholes.	Ácidos grasos volátiles, amoníaco, alcoholes, CO ₂ y H ₂ .
Lípidos Hidrolizados	Ácidos grasos libres y glicerol	Los ácidos grasos son fermentados por las bacterias acidogénicas para producir AGVs, principalmente ácido acético y butírico, así como alcoholes y gases.	Ácidos grasos volátiles (ácido acético, ácido butírico), CO ₂ y H ₂ .

Tabla No. 2: Transformaciones en la etapa de acidogénesis.

La acidogénesis es una etapa esencial en la digestión anaerobia que transforma los productos de la hidrólisis en ácidos grasos volátiles, alcoholes y gases. Estos productos intermedios son cruciales para las etapas siguientes del proceso anaerobio y para la producción eficiente de biogás. La optimización de esta etapa puede mejorar significativamente la eficiencia general del biodigestor.

- **Acetogénesis:** es la tercera etapa del proceso de digestión anaerobia y ocurre después de la acidogénesis. Durante esta fase, los productos de la acidogénesis, principalmente ácidos grasos volátiles (AGVs) y alcoholes, son convertidos en acetato, hidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2) por bacterias acetogénicas. La acetogénesis es una etapa crucial porque produce los precursores necesarios para la metanogénesis, la última etapa del proceso anaerobio.

Durante la acetogénesis, los principales compuestos generados en la acidogénesis se transforman de la siguiente manera [10] [11] [12]:

Compuesto	Compuestos iniciales	Transformación	Productos Finales
Ácidos Grasos Volátiles (AGVs)	Ácido propiónico, ácido butírico, ácido valérico, y otros AGVs.	Ácido propiónico se transforma en acetato, CO_2 y H_2 . Ácido butírico: Se transforma en acetato y H_2	Acetato, H_2 y CO_2 .
Alcoholes	Etanol, propanol, butanol, entre otros.	Etanol se oxida para producir acetato y H_2 . Propanol se oxida a propionato, que luego es transformado en acetato.	Acetato, H_2 y CO_2

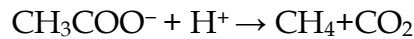
Tabla No. 3: Transformaciones en la etapa de acetogénesis.

La acetogénesis convierte los productos de la acidogénesis en acetato, que es el principal sustrato para las bacterias metanogénicas acetoclásticas. Además, el hidrógeno producido en esta etapa es utilizado por las bacterias metanogénicas hidrogenotróficas para producir metano. Sin una acetogénesis eficiente, la producción de metano en la etapa final se vería comprometida [15].

- **Metanogénesis:** es la etapa final de la digestión anaerobia, donde los productos de la acetogénesis - principalmente acetato, hidrógeno (H₂) y dióxido de carbono (CO₂) - son convertidos en metano (CH₄) y CO₂ por microorganismos llamados arqueas metanogénicas. Esta etapa es crucial para la producción de biogás, que se compone principalmente de metano y dióxido de carbono [16].

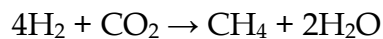
Durante la metanogénesis, los principales compuestos transformados son acetato, H₂ y CO₂, y los productos resultantes son metano y CO₂. Existen dos rutas principales de metanogénesis:

- Metanogénesis Acetoclástica:** Las arqueas metanogénicas acetoclásticas descomponen el acetato (CH₃COO⁻) en metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂).



Aproximadamente el 70% del metano producido en un biodigestor proviene de esta ruta [17].

- Metanogénesis Hidrogenotrófica:** Las arqueas metanogénicas hidrogenotróficas utilizan hidrogeno molecular (H₂) como donante de electrones y bióxido de carbono (CO₂) como aceptor de electrones para producir metano (CH₄) y agua (H₂O).



Aproximadamente el 30% del metano producido en un biodigestor proviene de esta ruta [17] [18].

La metanogénesis es la etapa final en la biodigestión anaerobia, transformando los productos de la acetogénesis en metano y dióxido de carbono. Esta etapa no solo produce biogás, una fuente de energía renovable, sino que también contribuye a la estabilización y reducción del volumen de residuos orgánicos. Optimizar las condiciones de operación puede mejorar significativamente la eficiencia de la metanogénesis y, por lo tanto, la producción total de biogás.

2.5. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA BIODIGESTIÓN

La biodigestión anaerobia es un proceso complejo y sensible a diversos factores que pueden influir en su eficiencia y estabilidad. A continuación, se describen en detalle los principales factores que afectan la biodigestión anaerobia:

- El pH es un factor crítico que influye en la actividad microbiana durante la digestión anaerobia. Las diferentes etapas del proceso requieren diferentes rangos de pH óptimos:
 - Hidrolisis y Acidogénesis: Estas etapas pueden tolerar un pH más amplio (5.5-8.5), pero funcionan mejor en un rango de pH neutro a ligeramente ácido (6.0-7.0) [19].
 - Acetogénesis: Esta etapa también prefiere un pH neutro (6.0-7.0) [17].
 - Metanogénesis: Es la etapa más sensible al pH y opera de manera óptima en un rango de 6.8 a 7.2. Un pH fuera de este rango puede inhibir la actividad de las arqueas metanogénicas y reducir la producción de metano.
- La temperatura afecta directamente la velocidad de las reacciones bioquímicas y la actividad de los microorganismos:
 - Psicrófila: (10-20°C). Menor eficiencia de digestión y producción de biogás.
 - Mesofílica: (30-40°C). Condiciones óptimas para la mayoría de los microorganismos anaerobios, siendo la temperatura más comúnmente utilizada (Angelidaki et al., 2011).
 - Termofílica: (50-60°C). Aumenta la velocidad de las reacciones y la destrucción de patógenos, pero es más sensible a las fluctuaciones de temperatura y requiere mayor control [16].
- La concentración de sustrato afecta la carga orgánica y la eficiencia del proceso:
 - Alta concentración: Puede resultar en una sobrecarga del sistema, acumulación de ácidos grasos volátiles (AGVs), y una caída del pH que inhibe la metanogénesis.

- Baja concentración: Puede limitar la actividad microbiana y la producción de biogás [19].
- La relación Carbono/Nitrógeno (C/N) es crucial para la estabilidad del proceso:
 - Óptima relación C/N: Entre 20:1 y 30:1. Una relación desequilibrada puede causar problemas:
 - Alta relación C/N: Deficiencia de nitrógeno, resultando en baja actividad microbiana.
 - Baja relación C/N: Exceso de nitrógeno, que puede llevar a la formación de amoníaco, inhibiendo la actividad microbiana.
- Inhibidores producto de las reacciones de descomposición o acarreados con el sustrato.
 - Amoníaco (NH_3): Producido por la descomposición de proteínas, puede ser tóxico en altas concentraciones ($>1500 \text{ mg/L}$).
 - Sulfuro de hidrógeno (H_2S): Producido por la reducción de sulfatos, puede ser tóxico para las bacterias metanogénicas [19].
 - Metales pesados: Como el cobre, el zinc y el níquel, pueden ser tóxicos para los microorganismos anaerobios incluso en bajas concentraciones.
- La agitación del sustrato dentro del digestor asegura una distribución uniforme de los microorganismos y los nutrientes, evitando la formación de capas y mejorando la eficiencia de la digestión:
 - Ventajas: Mejora el contacto entre los microorganismos y el sustrato, previene la sedimentación y estratificación [20].
 - Desventajas: Agitación excesiva puede dañar los microorganismos y aumentar el consumo de energía.
- Composición del Sustrato:
 - Biodegradabilidad: Sustratos con alta biodegradabilidad (ej., residuos de cocina) son más fácilmente digeridos que aquellos con baja biodegradabilidad (ej., lignocelulósicos).

- Presencia de lignina: Materiales con alta lignina (ej., paja) son más difíciles de digerir y requieren pretratamiento.
- La presencia de nutrientes esenciales como fósforo, azufre y oligoelementos (zinc, cobre, cobalto) es vital para el crecimiento y la actividad de los microorganismos anaerobios.

2.6. TIPOS DE BIODIGESTORES

Los biodigestores son sistemas diseñados para llevar a cabo la digestión anaerobia, transformando residuos orgánicos en biogás y digestato. Existen diversos tipos de biodigestores, cada uno con características y diseños específicos que los hacen más apropiados para ciertos tipos de residuos y condiciones operativas. En este apartado se presentan los principales tipos de biodigestores, con un énfasis en aquellos adecuados para residuos agropecuarios.

2.6.1. Biodigestores de Lote (Batch)

Los biodigestores de lote operan introduciendo una cantidad fija de material orgánico que se sella y se deja fermentar hasta que se completa la digestión. Una vez finalizado el proceso, el digestato se retira y se carga un nuevo lote de residuos. Este tipo de biodigestor es ideal para la digestión de residuos sólidos de alta concentración, como el estiércol de ganado y los residuos de cosecha. Sus principales ventajas incluyen la sencillez en el diseño y operación, así como menores costos iniciales y de mantenimiento. Sin embargo, su producción de biogás es discontinua y requiere tiempo de inactividad para cargar y descargar el sistema. Estos biodigestores son adecuados para pequeñas granjas con producción de residuos intermitente, donde se dispone de tiempo para manejar cargas por lotes.

2.6.2. Biodigestores Continuos (CSTR - Continuous Stirred Tank Reactor)

Los biodigestores continuos permiten la adición continua o periódica de sustrato y la retirada simultánea del digestato, generalmente mediante agitación para mantener una

mezcla homogénea. Son adecuados para residuos líquidos y semilíquidos, como purines de cerdo o vaca, y residuos agroindustriales líquidos. Sus ventajas incluyen la producción continua de biogás y un mejor control de los parámetros de operación. No obstante, estos sistemas tienen un diseño más complejo y costos operativos más altos, además de requerir agitación constante. Son ideales para grandes explotaciones ganaderas con producción constante de purines, donde se necesita una producción continua de biogás [16].

2.6.3. Biodigestores de Flujo Pistón (Plug Flow)

En los biodigestores de flujo pistón, el sustrato se mueve en una dirección a lo largo de un tubo largo y estrecho, manteniendo un flujo de tipo pistón. Este diseño permite un tiempo de retención uniforme, siendo especialmente adecuado para residuos de alta viscosidad, como el estiércol de ganado mezclado con materiales fibrosos. Las ventajas de este tipo de biodigestor incluyen un tiempo de retención uniforme y alta eficiencia en la degradación de sustratos fibrosos. Sin embargo, son más susceptibles a bloqueos y requieren pretratamiento del sustrato, además de un diseño y construcción específicos. Se utilizan principalmente en explotaciones lecheras donde el estiércol se mezcla con residuos de forraje.

2.6.4. Biodigestores de Fase Sólida (Dry Fermentation)

Diseñados para procesar residuos sólidos con bajo contenido de humedad (entre 20% y 40%), los biodigestores de fase sólida realizan la digestión en cámaras cerradas sin la adición de agua. Son adecuados para residuos agropecuarios sólidos, como paja, residuos de cosecha y estiércol sólido. Estos biodigestores no requieren grandes cantidades de agua y producen menos lixiviados, pero el proceso es más lento comparado con digestores líquidos y requiere manejo cuidadoso del material sólido. Son ideales para granjas mixtas que generan una mezcla de estiércol y residuos de cultivos secos [21].

2.6.5. Biodigestores de Capas de Sustrato (Upflow Anaerobic Sludge Blanket - UASB)

Los biodigestores UASB permiten el flujo ascendente del sustrato a través de un manto de lodo anaerobio, donde la materia orgánica es degradada y el biogás generado se colecta en la parte superior. Son ideales para residuos líquidos con sólidos en suspensión, como efluentes agroindustriales y purines diluidos. Las ventajas de este tipo de biodigestor incluyen alta tasa de degradación y eficiencia de conversión, así como bajos tiempos de retención hidráulica. Sin embargo, son sensibles a altas cargas de sólidos y toxinas y requieren control preciso de las condiciones operativas. Se utilizan comúnmente en el tratamiento de aguas residuales en plantas agroindustriales y lecherías [22].

2.7. LAGUNAS FACULTATIVAS PARA TRATAMIENTO SECUNDARIO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE BIODIGESTORES.

Una laguna facultativa, también denominada laguna de estabilización, es un sistema de tratamiento de aguas residuales caracterizado por su estructura estratificada, donde coexisten condiciones aeróbicas, anaeróbicas y facultativas. Se trata de un estanque de poca profundidad en el que los procesos biológicos naturales contribuyen a la depuración del agua, promoviendo una relación simbiótica entre microorganismos y algas.

En la zona superficial, la incidencia de la luz solar permite el crecimiento de algas fotosintéticas, las cuales generan oxígeno disuelto como subproducto de su metabolismo. Este oxígeno es utilizado por las bacterias aerobias para degradar la materia orgánica presente en el agua, en un proceso que reduce la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO). Al mismo tiempo, las algas consumen el dióxido de carbono liberado por la respiración bacteriana, estableciendo un equilibrio ecológico que favorece la depuración.

En el fondo del estanque, donde la disponibilidad de oxígeno es nula o extremadamente baja, los microorganismos anaerobios se encargan de descomponer la materia orgánica sedimentada mediante procesos fermentativos. Esta actividad genera productos como ácidos orgánicos y gases (CO_2 , CH_4 y H_2S), los cuales pueden difundirse hacia la superficie y ser oxidados por microorganismos aerobios o liberados a la atmósfera.

Entre estas dos capas extremas se encuentra la zona facultativa, donde coexisten procesos aeróbicos y anaeróbicos en función de la disponibilidad de oxígeno. Esta estratificación natural permite que la laguna mantenga una capa superficial oxigenada, lo que minimiza la generación de olores desagradables y le confiere su característico color verde debido a la proliferación de algas.

Cuando la laguna facultativa se emplea para el tratamiento de efluentes provenientes de biodigestores, el agua residual que ingresa al sistema ya ha sido sometida a una digestión anaerobia previa. Como resultado, el influente llega con una carga orgánica reducida y con una menor concentración de sólidos en comparación con las aguas residuales sin tratamiento.

En este contexto, la laguna facultativa actúa como un tratamiento secundario o de pulimiento, permitiendo la remoción adicional de materia orgánica residual a través del consumo de DBO facilitado por la oxigenación natural de las algas. Además, este proceso contribuye a la reducción de microorganismos patógenos, mejorando la calidad del efluente antes de su disposición final o posible reúso.

El resultado es un agua con menor carga contaminante, menor concentración de sólidos y una reducción significativa de olores y riesgos sanitarios, lo que convierte a la laguna facultativa en una opción eficiente y sostenible para el tratamiento de aguas residuales agropecuarias.

2.8. DISEÑO GENERAL DE BIODIGESTORES

El diseño de biodigestores es crucial para optimizar la producción de biogás y la gestión de residuos orgánicos en la ganadería. Un diseño eficiente asegura que el proceso de digestión anaerobia se lleve a cabo de manera óptima, maximizando la producción de biogás y minimizando los impactos ambientales. A continuación, se presenta una metodología técnica y sustentada para el diseño de biodigestores, con un enfoque particular en la industria agropecuaria.

2.8.1. Evaluación de la Materia Prima

La primera etapa en el diseño de un biodigestor es la evaluación de la materia prima disponible. En la ganadería, los principales sustratos son los desechos animales como estiércol de bovino, porcino y aves de corral. La composición y la cantidad de estos residuos influirán en el diseño del biodigestor.

Factores clave a considerar incluyen el tipo de desecho, la cantidad disponible y el contenido de sólidos volátiles. Diferentes tipos de estiércol tienen diferentes tasas de producción de biogás. Por ejemplo, el estiércol de bovino produce más biogás comparado con el de aves. La cantidad de desecho disponible determinará el tamaño del biodigestor, y un análisis de laboratorio puede establecer el contenido de sólidos volátiles, que es la fracción orgánica de los desechos convertibles en biogás.

2.8.2. Selección del Tipo de Biodigestor

Existen varios tipos de biodigestores, cada uno con características específicas que lo hacen más adecuado para ciertas aplicaciones.

2.8.3. Dimensionamiento del Biodigestor

El dimensionamiento del biodigestor se basa en la cantidad de desechos disponibles y la producción esperada de biogás. Los pasos incluyen el cálculo del volumen de carga, la determinación del tiempo de retención hidráulica (TRH) y el cálculo del volumen del biodigestor.

El volumen de carga diaria se determina a partir de la cantidad de desechos y agua que se introducirán en el biodigestor. El TRH, que es el tiempo promedio que los desechos permanecen en el biodigestor, es crucial para asegurar una digestión completa y típicamente oscila entre 20 y 30 días.

2.8.4. Diseño Estructural

El diseño estructural del biodigestor debe considerar la resistencia a la presión, la durabilidad y la facilidad de mantenimiento. Los materiales comúnmente utilizados incluyen concreto para biodigestores de cúpula fija y flotante, proporcionando durabilidad y resistencia, y polietileno o PVC para biodigestores tubulares, que ofrecen flexibilidad y facilidad de instalación. El diseño debe incluir compartimentos para la entrada de residuos, el reactor principal, la salida de biogás y la salida del digestato, asegurando que el biodigestor esté sellado herméticamente para evitar fugas de gas y mantener un ambiente anaerobio.

2.8.5. Manejo del Digestato

El digestato, subproducto del proceso de biodigestión, es rico en nutrientes y puede ser utilizado como fertilizante orgánico. Es importante diseñar sistemas para su almacenamiento y aplicación en campos agrícolas, mejorando así la sostenibilidad del ciclo productivo [23].

2.9. DISEÑO ESPECIFICO DEL BIODIGESTOR

Para el diseño del biodigestor orientado a la producción de biogás y biofertilizante a partir de las excretas de ganado vacuno, se emplearán como parámetros fundamentales los datos recolectados en campo. Entre los principales factores a considerar se incluyen:

- Cantidad de ganado presente en cada granja.
- Raza y edad de los ejemplares.
- Tipo de alimentación suministrada a los animales.
- Peso vivo, estimado a partir de la correlación con la talla de los especímenes.
- Duración del periodo de estabulación, expresada en horas diarias.

2.9.1. Correlación con talla del animal.

Diversas investigaciones han demostrado la viabilidad de establecer correlaciones fenotípicas para estimar el peso vivo del ganado vacuno. En el marco de esta investigación, se empleará la siguiente ecuación propuesta por José L. Contreras et al. [24]:

$$PV = -253.41 + 3.24PT$$

Donde: PV = Peso vivo [kg]

PT= Perímetro torácico [cm]

La deposición de heces diaria promedio se estimará como el 6.5% del peso vivo del animal, así:

$$Pe = 0.065 PV$$

Donde: Pe = Peso excretas [kg]

El porcentaje de humedad se calcula como sigue:

$$w = 100 * (h - s) / (h - T)$$

Donde: w = Porcentaje de humedad [%]
 h = Masa de muestra húmeda [g]
 s = Masa de muestra seca [g]
 T = Masa de tara [g]

La caracterización de la biomasa se realizará de manera teórica, tomando como referencia la metodología propuesta por D. S. Cortés Ramírez en su tesis titulada “Diseño de Biodigestor de Estiércol Bovino” [25].

Análisis elemental del estiércol	%C	%H	%O	%N	%S
Vacas lecheras (seco)	44.65	5.85	38.18	2.05	0.31

Tabla No. 4: Análisis elemental del estiércol de ganado bovino.

Análisis próximo	Seco
Poder calorífico inferior (LHV) [MJ/kg]	16.93
Poder calorífico superior (HHV) [MJ/kg]	18.21

Tabla No. 5: Análisis próximo del estiércol de ganado bovino (valores medios).

El potencial bioquímico de metano teórico (TBMP) es una variable que caracteriza la formación de metano en función de la cantidad de sólidos volátiles (SV) de la biomasa para los bovinos este potencial se encuentra en el orden de los 550 ml CH₄/g SV.

Es decir, quinientos cincuenta mililitros de metano por cada gramo de sólidos volátiles presentes en la biomasa.

Los sólidos volátiles representan la fracción orgánica (biodegradable) de los sólidos totales en el estiércol. Este porcentaje es clave para dimensionar biodigestores, ya que indica cuánta materia orgánica potencialmente convertible en biogás se está aportando. En otras palabras, de los sólidos totales (ST) del estiércol, el porcentaje que son sólidos volátiles (SV) señala la proporción de materia orgánica disponible para la digestión anaerobia (el resto son sólidos fijos o cenizas, de naturaleza inorgánica).

Diversos estudios y manuales técnicos reportan que el estiércol bovino fresco tiene una fracción orgánica muy alta, típicamente en el orden del 75%-85% de SV con respecto a sus sólidos totales. En general se asume alrededor de 80% de SV y 20% de cenizas en estiércoles frescos.

2.10. REGULACIONES AMBIENTALES

El sector agropecuario está sujeto a cumplir las regulaciones ambientales orientadas a minimizar los impactos negativos de sus actividades, particularmente en lo relativo al manejo de aguas residuales y la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero.

2.10.1. Ley de Medio Ambiente

Tiene por objeto desarrollar las disposiciones de la Constitución de la República, que se refieren a la protección, conservación y recuperación del medio ambiente; el uso sostenible de los recursos naturales que permitan mejorar la calidad de vida de las presentes y futuras generaciones; así como también, normar la gestión ambiental, pública y privada y la protección ambiental como obligación básica del Estado, los municipios y los habitantes en general; y asegurar la aplicación de los tratados o convenios internacionales celebrados por El Salvador en esta materia.

2.10.2. Reglamento Especial De Aguas Residuales Y Manejo De Lodos Residuales.

Tiene por objeto desarrollar las disposiciones de la Ley del Medio Ambiente, vinculadas a la gestión de las aguas residuales y lodos, y establecer los criterios técnicos y requisitos que deben cumplirse para su manejo, tratamiento, uso, reuso y disposición final. Es aplicable a las personas naturales o jurídicas, que por sus actividades generen, gestionen o viertan aguas residuales a un medio receptor o realicen disposición de lodos.

2.10.3. Reglamento RTS 13.05.01:24: “Aguas Residuales. Parámetros De Calidad De Aguas Residuales Para Descarga Y Manejo De Lodos Residuales.”

El Reglamento Técnico Salvadoreño RTS 13.05.01:24 – Aguas Residuales. Parámetros de Calidad de Aguas Residuales para Descarga y Manejo de Lodos Residuales, emitido por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales y publicado en el Diario Oficial el 23 de agosto de 2024, establece los criterios técnicos y los límites máximos permisibles para la descarga de aguas residuales y el manejo de los lodos generados en los sistemas de tratamiento. Su propósito es proteger los cuerpos receptores, el suelo, la salud pública y los ecosistemas, asegurando que las descargas sean compatibles con la capacidad de asimilación del medio ambiente. La norma es de cumplimiento obligatorio para toda persona natural o jurídica, pública o privada, que genere, trate o disponga aguas residuales de origen doméstico, municipal, industrial o agropecuario. Define los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que deben controlarse – como

DBO₅, DQO, sólidos suspendidos totales, aceites y grasas, nutrientes, metales pesados y coliformes –, así como las condiciones de muestreo, análisis, frecuencia de monitoreo y control ambiental. Además, regula el manejo, transporte, almacenamiento y disposición final de lodos, promoviendo prácticas seguras y sostenibles.

En la tabla No. 6 se presentan los valores máximos permisibles de los parámetros relacionados con las actividades que involucren actividades agropecuarias:

Actividad	DQO (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)	Sólidos suspendidos totales (mg/l)	Aceites y grasas (mg/l)	PH
Producción agropecuaria	600	300	150	50	2.0 – 3.5
Matanza de ganado y preparación y conservación de carnes	400	200	125	50	2.0 – 3.5
Procesamiento de productos avícolas e incurvación de aves	600	300	150	50	6.0 – 9.0
Porcicultura	1,200	500	500	50	6.0 – 9.0

Tabla No. 6a: valores máximos permisibles de los parámetros relacionados con las actividades agropecuarias, tomados de la Tabla 3 del RTS 13.05.01:24 [26].

2.10.4. Lineamientos Técnicos Para La Evaluación De Actividades, Obras O Proyectos Que Comprendan La Alternativa De Reúso De Agua Residual Tratada.

Este reglamento ha sido emitido para dar cumplimiento a lo establecido en el RTS 13.05.01:24, como instrumento para la aplicación de los parámetros de calidad según los tipos de reúso de aguas residuales tratadas.

Dependiendo de su naturaleza, el reglamento clasifica los reúsos en nueve categorías: 1. Actividades con contacto directo al público, 2. Actividades con contacto indirecto al público, 3. Riego agrícola en cultivos de alimentos que no se procesan previo a su venta o consumo, 4. Riego agrícola en cultivos de alimentos que se procesan previo a su venta o consumo, 5. Riego agrícola en cultivos no alimenticios, 6. Recreativo, 7. Paisajístico, 8. Construcción y 9. Reúso industrial.

En el tipo 5, se contemplan las siguientes actividades: riego de pastos para ganado, forrajes, cultivo de fibras y semillas, viveros ornamentales, biomasa vegetal, silvicultura, riego de zonas verdes recreativas en áreas residenciales, riego en áreas verdes de protección, zonas verdes, arriates en vías de circulación, patios de centros educativos, campos deportivos, parques, cementerios, cultivo de césped, otras plantaciones forestales y cultivos no alimenticios.

A continuación, se presentan los parámetros de calidad del agua residual exigidos para el reúso en esta categoría:

Tipo de reúso	Factor multiplicador	DBO	DQO	SST	Aceites y grasas (mg/L)	Coliformes fecales (NMP/100ml)	Nemátodos Intestinales (Huevos/litro)	Cloro Residual libre (mg/l)
Tipo 5: Riego agrícola en cultivos no alimenticios y áreas verdes	2	120	300	120	20	1,000	1	1

Tabla No. 6b: Parámetros de calidad del agua residual exigidos para el reúso en reúso tipo 5, tomados de la Tabla 1 de los Lineamientos Técnicos Para La Evaluación De Actividades, Obras O Proyectos Que Comprendan La Alternativa De Reúso De Agua Residual Tratada [27].

Con el objeto de promover el reúso de aguas residuales tratadas, específicamente para proyectos nuevos, se considera como incentivo la reducción del costo de medida de compensación ambiental por extracción de recurso hídrico, al dejar de extraer determinado volumen de agua de una fuente de abastecimiento y sustituirlo por agua residual tratada. Esto se determinará de conformidad con lo establecido en la Guía de Compensación Ambiental Vigente.

2.11. METAS DE MITIGACIÓN DE EMISIONES PARA EL SECTOR PECUARIO

Las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC, por sus siglas en inglés) son compromisos climáticos específicos que cada país parte del Acuerdo de París presenta para contribuir al objetivo global de limitar el aumento de la temperatura media mundial a menos de 2°C por encima de los niveles preindustriales, con esfuerzos para limitarlo a 1.5°C. Estas contribuciones son un elemento clave del Acuerdo de París y reflejan las acciones climáticas que los países están dispuestos a tomar en función de sus capacidades y circunstancias nacionales.

El Salvador presentó sus NDC actualizadas en enero del año 2022, para el sector AFOLU, se ha establecido como objetivo una reducción acumulada de 50,857.5 Kt de CO₂e en emisiones, durante el período 2035-2040, tomando como referencia el año 2015. La NDC actualizada incluye actividades orientadas a incrementar los sumideros y depósitos de carbono en el ámbito agrícola, siempre y cuando se asegure una financiación significativa proveniente de fuentes nacionales e internacionales, con la colaboración activa del sector privado.

El Salvador se propone reformar su marco normativo e institucional con el fin de fortalecer su capacidad para enfrentar los impactos del cambio climático y sus efectos adversos. Además, busca garantizar los medios necesarios para implementar acciones climáticas, enfocándose en la provisión de financiamiento, el desarrollo y la transferencia de tecnología, así como en la formación y capacitación tanto a nivel individual como institucional.

3. DISEÑO DEL BIODIGESTOR

3.1. TOMA DE DATOS EN CAMPO

Se contó con acceso a tres establos: uno ubicado en el distrito de la Reina y dos ubicados en el distrito de Agua Caliente, ambos pertenecientes al municipio de Chalatenango Centro.

Las visitas tenían como objetivo realizar el reconocimiento del ganado presente, su raza, tallaje y obtener datos sobre su alimentación y producción diaria.

GANADERÍA 1					
Nombre de la ganadería	Ganadería "El Paraíso"				
Municipio	Chalatenango Centro	Distrito	La Reina	Fecha de visita	11/12/2024
Cantidad de de vacas lecheras	56	Razas	Gyr Holstein	Coordenadas	14°06'44.4"N
Horas Estabulado [h/día]	3	Producción [botellas/día]	700		89°10'06.1"O
Alimentación principal	Zacate picado Silo	Cantidad [qq/día]	30	Edades [años]	3 - 7
Alimentación complementaria	Harina de maíz	Cantidad [qq/día]	7	Precio medio [\$/botella]	0.6
Peso promedio estimado por talla [kg/animal]	628*	Deposición promedio estimada [kg/día/animal]	41*	Humedad media de las deposiciones [%]	48*

Tabla No. 7a: Información general de ganadería "El Paraíso" en distrito La Reina.

GANADERÍA 2					
Nombre de la ganadería	Ganadería "Luis Pineda"				
Municipio	Chalatenango Centro	Distrito	Agua Caliente	Fecha de visita	23/12/2024
Cantidad de de vacas lecheras	130	Razas	Holstein Brown Swiss	Coordenadas	14°11'29.0"N
Horas Estabulado [h/día]	4	Producción [botellas/día]	2000		89°13'27.3"O
Alimentación principal	Silo	Cantidad [qq/día]	40	Edades [años]	2 - 7
Alimentación complementaria	Harina de maíz	Cantidad [qq/día]	10	Precio medio [\$/botella]	0.6
Peso promedio estimado por talla [kg/animal]	559*	Deposición promedio estimada [kg/día/animal]	36*	Humedad media de las deposiciones [%]	45*

Tabla No. 7b: Información general de ganadería "Luis Pineda" en distrito Agua Caliente.

GANADERÍA 3					
Nombre de la ganadería	Ganadería "Ángel Guevara"				
Municipio	Chalatenango Centro	Distrito	Agua Caliente	Fecha de visita	23/12/2024
Cantidad de de vacas lecheras	53	Razas	Holstein	Coordenadas	14°11'15.7"N
Horas Estabulado [h/día]	4	Producción [botellas/día]	800		89°13'58.5"O
Alimentación principal	Silo	Cantidad [qq/día]	20	Edades [años]	3 - 6
Alimentación complementaria	Harina de maíz	Cantidad [qq/día]	20	Precio medio [\$/botella]	0.6
Peso promedio estimado por talla [kg/animal]	469*	Deposición promedio estimada [kg/día/animal]	30*	Humedad media de las deposiciones [%]	53*

Tabla No. 7c: Información general de ganadería "Ángel Guevara" en distrito Agua Caliente.

* El detalle de los cálculos de peso y deposiciones se presentan en el en el anexo No. 1 y el detalle de los cálculos de humedad en el anexo No. 2.

3.2. CÁLCULO DE VOLÚMENES

Tomando como punto de partida los datos obtenidos para cada una de las ganaderías y los valores típicos de las propiedades presentes en las excretas del ganado vacuno, se procederá al diseño de un biodigestor para cada una de las granjas.

De acuerdo con las observaciones realizadas en campo, se determinó un porcentaje estimado de deposición de excretas del 40%, es decir, dos de cada cinco animales presentes evacuaron durante su permanencia en el establo. No obstante, para efectos de diseño se adoptará un valor del 50%, incorporando un margen adicional del 10% como factor de seguridad. En consecuencia, se asume que la mitad de los animales deposita sus excretas en el establo durante el tiempo de confinamiento.

Ganadería "El Paraíso"

$$Biomasa\ disponible = (56\ animales) \left(41 \frac{kg}{dia * animal} \right) \left(\frac{3\ horas\ estabulado}{24\ horas\ día} \right) (0.50)$$

$$Biomasa\ disponible = 143.50\ kg/día$$

El biodigestor se diseñará para un porcentaje de 10% de solidos presentes en la mezcla de biomasa, según los parámetros recomendados por D.S. Cortés Ramírez [25].

$$Masa\ sólida = \left(143.50 \frac{kg}{dia} \right) (1 - 0.48) = 74.62 \frac{kg}{dia}$$

$$Masa\ líquida = 143.50 \frac{kg}{dia} - 74.62 \frac{kg}{dia} = 68.88 \frac{kg}{dia}$$

$$Masa\ líquida\ para\ 10\% \text{ sólidos} = \frac{\left(74.62 \frac{kg}{dia}\right)(0.90)}{0.10} = 671.58 \frac{kg}{dia}$$

$$Masa\ de\ agua\ a\ agregar = 671.58 - 68.88 \frac{kg}{dia} = 602.70 \frac{kg}{dia}$$

Considerando la densidad del agua en 1,000kg/m³ y la de las partículas sólidas del estiércol en 1,576 kg/m³ [28], procedemos a calcular los volúmenes:

$$Volumen\ sólido = \left(74.62 \frac{kg}{dia}\right) / \left(1576 \frac{kg}{m^3}\right) = 0.047 \frac{m^3}{dia}$$

$$Volumen\ líquido = \left(671.58 \frac{kg}{dia}\right) / \left(1000 \frac{kg}{m^3}\right) = 0.672 \frac{m^3}{dia}$$

$$Volumen\ total = 0.719 \frac{m^3}{dia}$$

Se verificó que el establo cuenta con una fuente de agua suficiente para suplir el consumo actual y el volumen adicional de agua requerido en el reactor.

Para un tiempo de retención hidráulica de 20 días, se obtiene:

$$Volumen\ total\ 20\ días = \left(0.719 \frac{m^3}{dia}\right)(20\ días) = 14.38\ m^3$$

Para fines prácticos de modulación del reactor, se tomará un volumen de biomasa de 15.00m³.

Procedemos a calcular el volumen del biogás:

$$Masa\ Carbono = \left(74.62 \frac{kg}{dia}\right)(44.65\%) = 33.32 \frac{kg}{dia}$$

Se asume una degradación del 80% de la masa del carbono en sólidos volátiles según lo descrito por J. Murphy, P. Weiland, R. Braun y A. Wellinger [29].

$$Masa\ Carbono\ biodegradado = \left(33.32 \frac{kg}{dia}\right)(80\% \text{ SV}) = 26.66 \frac{kg}{dia}$$

Los productos de la reacción de la biomasa se componen en 53% metano y 47% dióxido de carbono por lo que la producción de metano es la siguiente:

$$\text{Masa Metano} = \left(26.66 \frac{\text{kg}}{\text{dia}}\right)(53\%) = 14.13 \frac{\text{kg}}{\text{dia}}$$

La densidad del metano es de 0.656 kg/m³ a 1 atm y 25°C, por tanto:

$$\text{Volumen metano} = \left(14.13 \frac{\text{kg}}{\text{dia}}\right) / \left(0.656 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) = 21.54 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}$$

$$\text{Masa dioxido de carbono} = \left(26.66 \frac{\text{kg}}{\text{dia}}\right)(47\%) = 12.53 \frac{\text{kg}}{\text{dia}}$$

La densidad del dióxido de carbono es de 1.80 kg/m³ a 1 atm y 25°C, por tanto:

$$\text{Volumen dioxido de carbono} = \left(12.53 \frac{\text{kg}}{\text{dia}}\right) / \left(1.80 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) = 6.96 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}$$

$$\text{Volumen total biogas} = 21.54 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} + 6.96 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} = 28.50 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}$$

Las trazas de otros gases no se tomarán en cuenta en el dimensionamiento, debido que su presencia no es significativa con relación al volumen total.

Para fines prácticos de modulación del reactor, se tomará un volumen de biogás de 30.0m³.

El sistema contará con una antorcha para poder quemar los excedentes de producción que no sean usados y evitar así las sobrepresiones dentro del reactor.

Resumen de cálculo de volúmenes correspondientes a Ganadería “El Paraíso”:

- Volumen de biomasa con TRH de 20 días = 15.00m³
- Volumen de biogás = 30.0m³
- Volumen total del reactor = 45.0m³

Ganadería “Luis Pineda”

$$\text{Biomasa disponible} = (130 \text{ animales}) \left(36 \frac{\text{kg}}{\text{dia} * \text{animal}}\right) \left(\frac{4 \text{ horas estabulado}}{24 \text{ horas día}}\right) (0.50)$$

$$\text{Biomasa disponible} = 390.00 \text{ kg/día}$$

El biodigestor se diseñará para un porcentaje de 10% de solidos presentes en la mezcla de biomasa, según los parámetros recomendados por D.S. Cortés Ramírez [25].

$$Masa\ sólida = \left(390.00 \frac{kg}{dia}\right) (1 - 0.45) = 214.50 \frac{kg}{dia}$$

$$Masa\ líquida = 390.00 \frac{kg}{dia} - 214.50 \frac{kg}{dia} = 175.50 \frac{kg}{dia}$$

$$Masa\ líquida\ para\ 10\% \text{ sólidos} = \frac{\left(214.50 \frac{kg}{dia}\right) (0.90)}{0.10} = 1,930.50 \frac{kg}{dia}$$

$$Masa\ de\ agua\ a\ agregar = 1,930.50 - 175.50 \frac{kg}{dia} = 1,755.00 \frac{kg}{dia}$$

Considerando la densidad del agua en 1,000kg/m³ y la de las partículas sólidas del estiércol en 1,576 kg/m³ [28], procedemos a calcular los volúmenes:

$$Volumen\ sólido = \left(214.50 \frac{kg}{dia}\right) / \left(1,576 \frac{kg}{m^3}\right) = 0.136 \frac{m^3}{dia}$$

$$Volumen\ líquido = \left(1,930.50 \frac{kg}{dia}\right) / \left(1000 \frac{kg}{m^3}\right) = 1.931 \frac{m^3}{dia}$$

$$Volumen\ total = 2.067 \frac{m^3}{dia}$$

Se verificó que el establo cuenta con una fuente de agua suficiente para suplir el consumo actual y el volumen adicional de agua requerido en el reactor.

Para un tiempo de retención hidráulica de 20 días, se obtiene:

$$Volumen\ total\ 20\ días = \left(2.067 \frac{m^3}{dia}\right) (20\ días) = 41.34\ m^3$$

Para fines prácticos de modulación del reactor, se tomará un volumen de biomasa de 42.00m³.

Procedemos a calcular el volumen del biogás:

$$Masa\ Carbono = \left(214.50 \frac{kg}{dia}\right) (44.65\%) = 95.77 \frac{kg}{dia}$$

Se asume una degradación del 80% de la masa del carbono en sólidos volátiles según lo descrito por J. Murphy, P. Weiland, R. Braun y A. Wellinger [29].

$$Masa\ Carbono\ biodegradado = \left(95.77 \frac{kg}{dia}\right) (80\% \text{ SV}) = 76.62 \frac{kg}{dia}$$

Los productos de la reacción de la biomasa se componen en 53% metano y 47% dióxido de carbono por lo que la producción de metano es la siguiente:

$$\text{Masa Metano} = \left(76.62 \frac{\text{kg}}{\text{dia}}\right) (53\%) = 40.61 \frac{\text{kg}}{\text{dia}}$$

La densidad del metano es de 0.656 kg/m³ a 1 atm y 25°C, por tanto:

$$\text{Volumen metano} = \left(40.61 \frac{\text{kg}}{\text{dia}}\right) / \left(0.656 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) = 61.91 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}$$

$$\text{Masa dioxido de carbono} = \left(76.62 \frac{\text{kg}}{\text{dia}}\right) (47\%) = 36.01 \frac{\text{kg}}{\text{dia}}$$

La densidad del dióxido de carbono es de 1.80 kg/m³ a 1 atm y 25°C, por tanto:

$$\text{Volumen dioxido de carbono} = \left(36.01 \frac{\text{kg}}{\text{dia}}\right) / \left(1.80 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) = 20.01 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}$$

$$\text{Volumen total biogas} = 61.91 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} + 20.01 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} = 81.92 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}$$

Las trazas de otros gases no se tomarán en cuenta en el dimensionamiento, debido que su presencia no es significativa con relación al volumen total.

Para fines prácticos de modulación del reactor, se tomará un volumen de biogás de 82.0m³.

El sistema contará con una antorcha para poder quemar los excedentes de producción que no sean usados y evitar así las sobrepresiones dentro del reactor.

Resumen de cálculo de volúmenes correspondientes a Ganadería "Luis Pineda":

- Volumen de biomasa con TRH de 20 días = 42.00m³
- Volumen de biogás = 82.0m³
- Volumen total del reactor = 124.0m³

Ganadería "Ángel Guevara"

$$\text{Biomasa disponible} = (53 \text{ animales}) \left(30 \frac{\text{kg}}{\text{dia} * \text{animal}}\right) \left(\frac{4 \text{ horas estabulado}}{24 \text{ horas día}}\right) (0.50)$$

$$\text{Biomasa disponible} = 132.50 \text{kg/día}$$

El biodigestor se diseñará para un porcentaje de 10% de sólidos presentes en la mezcla de biomasa, según los parámetros recomendados por D.S. Cortés Ramírez [25].

$$Masa\ sólida = \left(132.50 \frac{kg}{dia}\right) (1 - 0.53) = 62.28 \frac{kg}{dia}$$

$$Masa\ líquida = 132.50 \frac{kg}{dia} - 62.28 \frac{kg}{dia} = 70.22 \frac{kg}{dia}$$

$$Masa\ líquida\ para\ 10\% \text{ sólidos} = \frac{\left(62.28 \frac{kg}{dia}\right) (0.90)}{0.10} = 560.52 \frac{kg}{dia}$$

$$Masa\ de\ agua\ a\ agregar = 560.52 - 70.22 \frac{kg}{dia} = 490.30 \frac{kg}{dia}$$

Considerando la densidad del agua en 1,000kg/m³ y la de las partículas sólidas del estiércol en 1,576 kg/m³ [28], procedemos a calcular los volúmenes:

$$Volumen\ sólido = \left(62.28 \frac{kg}{dia}\right) / \left(1,576 \frac{kg}{m^3}\right) = 0.040 \frac{m^3}{dia}$$

$$Volumen\ líquido = \left(560.52 \frac{kg}{dia}\right) / \left(1000 \frac{kg}{m^3}\right) = 0.561 \frac{m^3}{dia}$$

$$Volumen\ total = 0.601 \frac{m^3}{dia}$$

Se verificó que el establo cuenta con una fuente de agua suficiente para suplir el consumo actual y el volumen adicional de agua requerido en el reactor.

Para un tiempo de retención hidráulica de 20 días, se obtiene:

$$Volumen\ total\ 20\ días = \left(0.601 \frac{m^3}{dia}\right) (20\ días) = 12.02\ m^3$$

Para fines prácticos de modulación del reactor, se tomará un volumen de biomasa de 15.00m³.

Procedemos a calcular el volumen del biogás:

$$Masa\ Carbono = \left(62.28 \frac{kg}{dia}\right) (44.65\%) = 27.81 \frac{kg}{dia}$$

Se asume una degradación del 80% de la masa del carbono en sólidos volátiles según lo descrito por J. Murphy, P. Weiland, R. Braun y A. Wellinger [29].

$$\text{Masa Carbono biodegradado} = \left(27.81 \frac{\text{kg}}{\text{dia}}\right) (80\% \text{ SV}) = 22.25 \frac{\text{kg}}{\text{dia}}$$

Los productos de la reacción de la biomasa se componen en 53% metano y 47% dióxido de carbono por lo que la producción de metano es la siguiente:

$$\text{Masa Metano} = \left(22.25 \frac{\text{kg}}{\text{dia}}\right) (53\%) = 11.79 \frac{\text{kg}}{\text{dia}}$$

La densidad del metano es de 0.656 kg/m³ a 1 atm y 25°C, por tanto:

$$\text{Volumen metano} = \left(11.79 \frac{\text{kg}}{\text{dia}}\right) / \left(0.656 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) = 17.97 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}$$

$$\text{Masa dioxido de carbono} = \left(22.25 \frac{\text{kg}}{\text{dia}}\right) (47\%) = 10.46 \frac{\text{kg}}{\text{dia}}$$

La densidad del dióxido de carbono es de 1.80 kg/m³ a 1 atm y 25°C, por tanto:

$$\text{Volumen dioxido de carbono} = \left(10.46 \frac{\text{kg}}{\text{dia}}\right) / \left(1.80 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) = 5.81 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}$$

$$\text{Volumen total biogas} = 17.97 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} + 5.81 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} = 23.79 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}$$

Las trazas de otros gases no se tomarán en cuenta en el dimensionamiento, debido que su presencia no es significativa con relación al volumen total.

Para fines prácticos de modulación del reactor, se tomará un volumen de biogás de 30.0m³.

El sistema contará con una antorcha para poder quemar los excedentes de producción que no sean usados y evitar así las sobrepresiones dentro del reactor.

Resumen de cálculo de volúmenes correspondientes a Ganadería “Ángel Guevara”:

- Volumen de biomasa con TRH de 20 días = 15.00m³
- Volumen de biogás = 30.0m³
- Volumen total del reactor = 45.0m³

3.3. TRATAMIENTO SECUNDARIO

Dentro del sistema de tratamiento, se ha considerado un proceso secundario para el efluente generado por el biodigestor, con el objetivo de mejorar su calidad antes de su aprovechamiento final. Para ello, se emplean lagunas facultativas con una profundidad de 1.50 metros y un volumen equivalente al de la biomasa contenida en el biodigestor, con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 20 días, lo que permite una mayor estabilidad en el tratamiento biológico.

El agua tratada en la laguna facultativa será posteriormente utilizada en los campos de cultivo de la granja, incorporándose de manera sostenible en los procesos productivos a través del riego.

3.4. BIOFERTILIZANTE

Los sólidos digeridos serán extraídos después del TRH, empleando una bomba para extracción de lodos. Con ese sistema serán llevados a un patio de secado, donde serán dispuestos en una superficie de losas colocadas sobre un filtro de grava, con la intención de que se sequen al sol y que el líquido presente se lixivie y regrese al reactor.

Las cantidades esperadas de biofertilizante para cada granja se estiman empleando la diferencia entre la materia seca ingresada y la materia sólida degradada para la formación del biogás.

Granja	Masa Sólida Ingresada		Masa Sólida Degradada 80% del Carbono		Masa de Biofertilizante esperada	
	Día [kg]	TRH=20 [Ton]	Día [kg]	TRH=20 [Ton]	Día [kg]	TRH=20 [Ton]
El Paraíso	74.35	1.487	26.56	0.531	47.79	0.956
Luis Pineda	213.11	4.262	76.12	1.522	136.99	2.740
Ángel Guevara	62.80	1.256	22.43	0.449	40.37	0.807

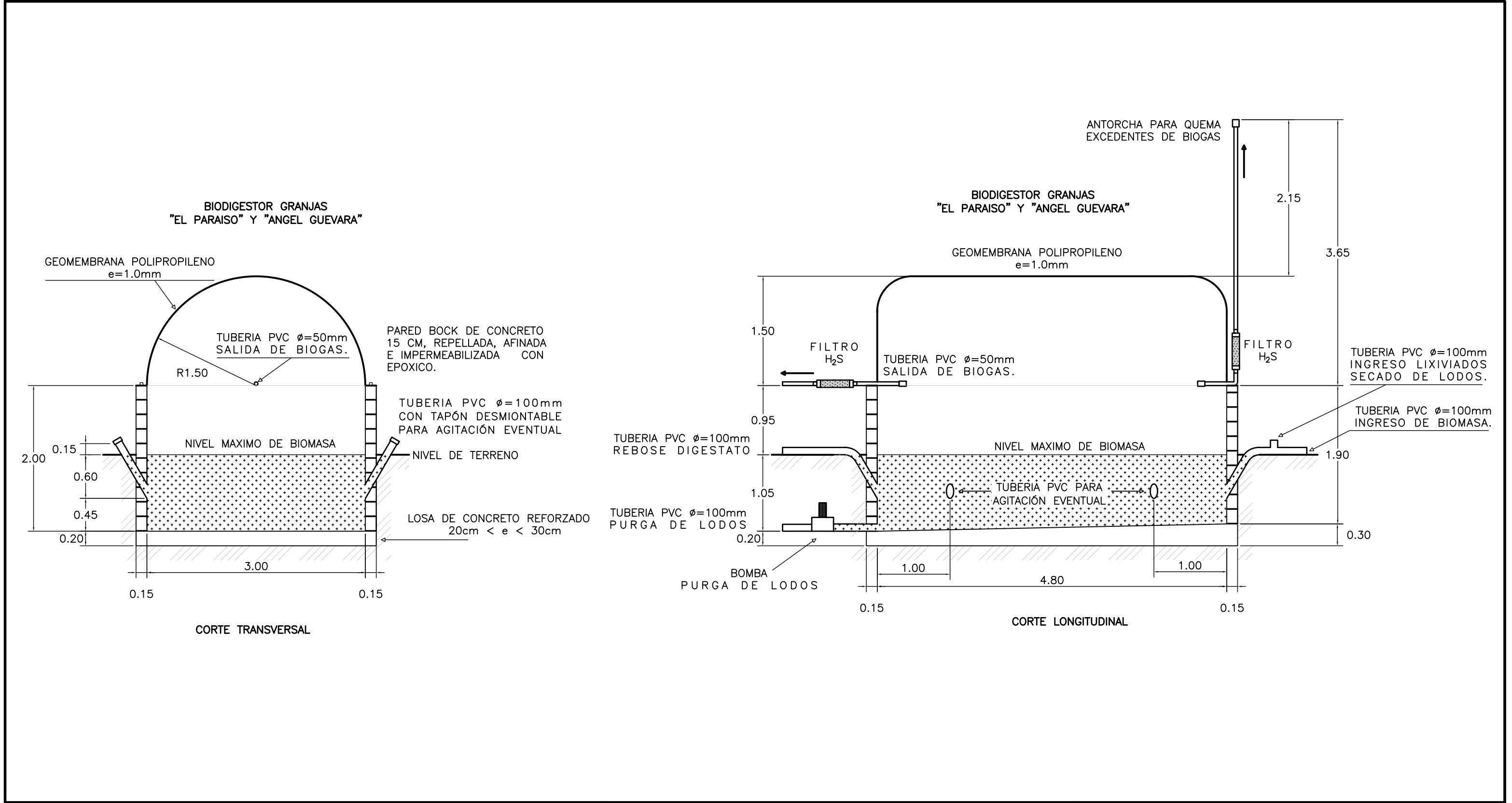
Tabla No. 8: Producción de biofertilizante de conformidad con cálculos realizados en la sección 3.2.

3.5. OBRA CIVIL

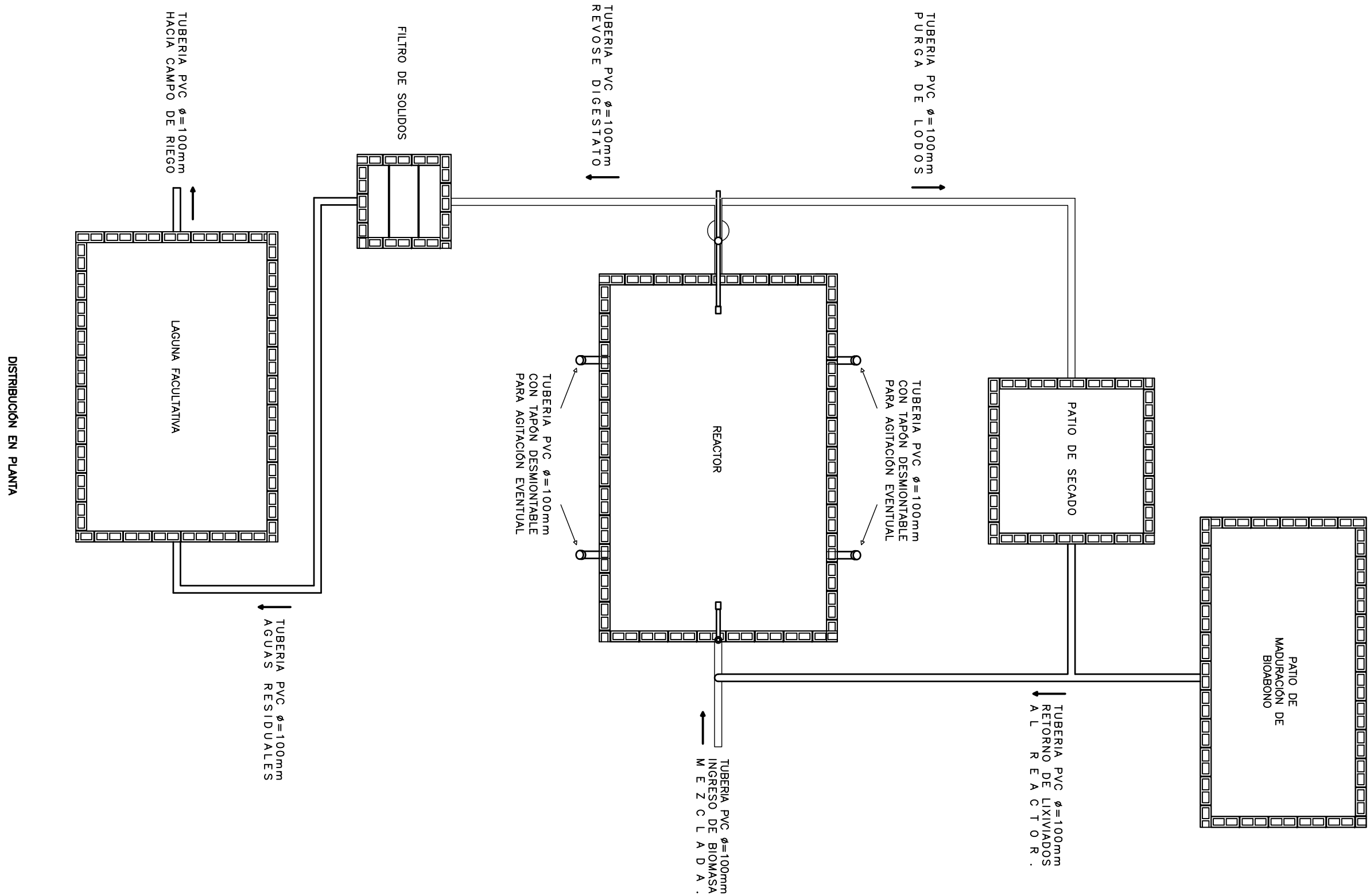
Dado que, en términos prácticos, los biodigestores de las ganaderías “El Paraíso” y “Ángel Guevara” presentan compatibilidad en cuanto a los volúmenes de biomasa y la producción de biogás, se ha diseñado un sistema único que responda a las necesidades de ambas. Por otro lado, el sistema correspondiente a la ganadería “Luis

Pineda" ha sido desarrollado de manera independiente, dado que maneja volúmenes aproximadamente el doble de los de las otras dos.

El diseño de la obra civil se ha elaborado con base en los volúmenes calculados, garantizando el cumplimiento de las normativas constructivas aplicables a este tipo de proyectos. A continuación, se presentan los planos correspondientes.



SISTEMAS PARA BIODIGESTOR
GRANJAS
"EL PARAISO" Y "ANGEL GUEVARA"
ÁREA MÍNIMA REQUERIDA 250M2



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADOS
MAESTRÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES Y MEDIO AMBIENTE

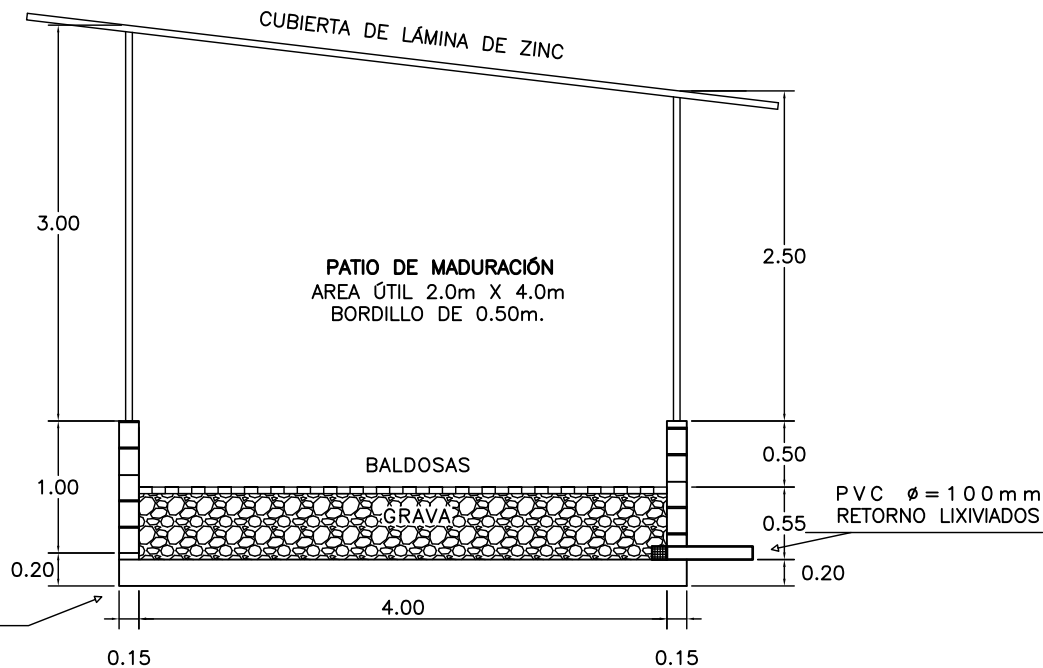
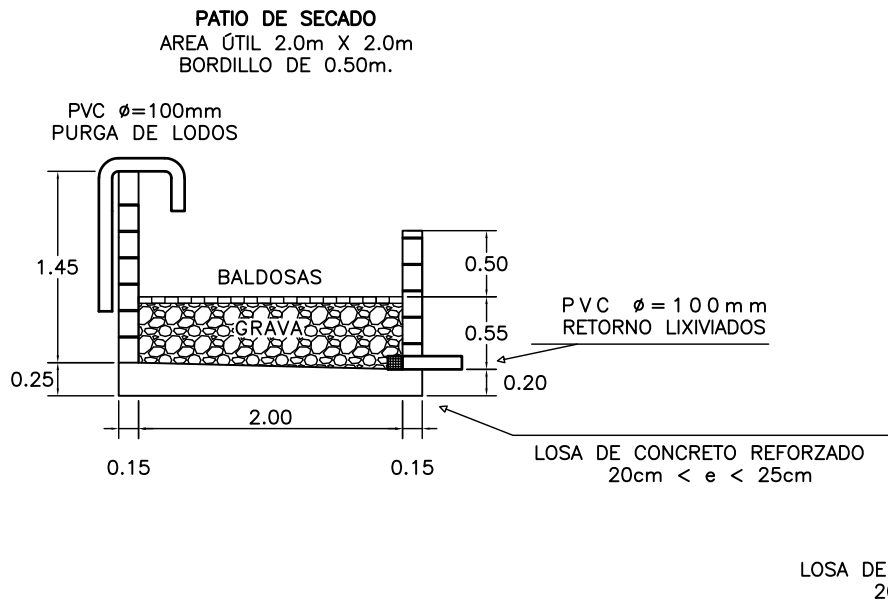
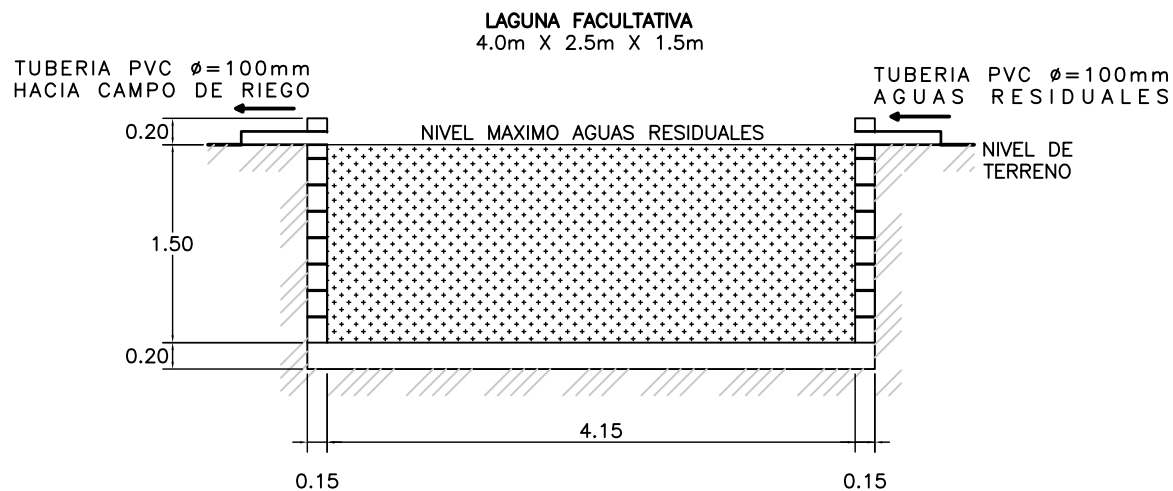
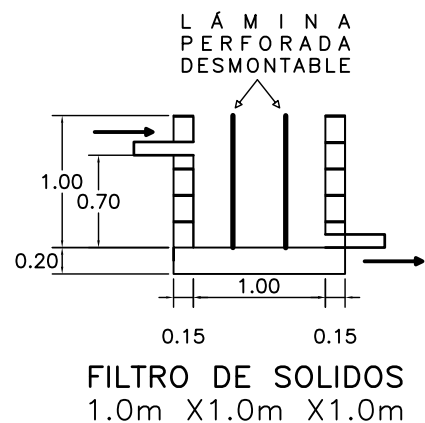
TRABAJO DE GRADUACIÓN:
**EVALUACIÓN DE LA INTEGRACIÓN DE BIODIGESTORES
EN LA CADENA DE VALOR DE LA GANADERÍA EN EL
MUNICIPIO DE CHALATENANGO CENTRO**

PRESENTA:
DIMAS ODUL SERRANO ORTIZ

IMPRESIÓN:
MAYO DEL 2026

ESCALA:
1:60

PAGINA:
44



ESPECIFICACIONES

LOSAS DE CIMENTACIÓN:

LA LOSA SERÁ COLADA SOBRE UNA CAPA DE SUELO-CEMENTO CON UN ESPESOR MÍNIMO DE 20 CM, COMPACTADO AL 95 % DE SU PESO VOLUMÉTRICO SECO MÁXIMO, DETERMINADO SEGÚN LA NORMA ASTM D1557.

EL CONCRETO A UTILIZAR TENDRÁ UNA RESISTENCIA $F'c = 210 \text{ KG/CM}^2$ Y SERÁ REFORZADO CON UNA PARRILLA DE ACERO CORRUGADO $FY = 4200 \text{ KG/CM}^2$, NO. 3 @ 20 CM EN AMBOS SENTIDOS.

EL ACERO DEBERÁ TENER UNA SEPARACIÓN MÍNIMA DE 7.5 CM DESDE EL SUELO.

PAREDES:

SE EMPLEARÁ BLOCK DE 15 CM O 20 CM SEGÚN LO ESPECIFICADO EN PLANOS.

SE COLOCARÁN BASTONES DE ACERO CORRUGADO $FY = 4200 \text{ KG/CM}^2$, NO. 3 @ 40 CM, LLENANDO LAS CELDAS CON CONCRETO FLUIDO DE RESISTENCIA MÍNIMA DE 150 KG/CM^2 .

CADA DOS HILADAS DE BLOCK SE INTERCALARÁ UNA HILADA DE BLOCK TIPO SOLERA, REFORZADA CON UNA BARRA DE ACERO CORRUGADO $FY = 4200 \text{ KG/CM}^2$, NO. 3, Y RELLENA CON CONCRETO FLUIDO CON RESISTENCIA MÍNIMA DE 150 KG/CM^2 . LA CORONACIÓN DE LA PARED SE REALIZARÁ SIGUIENDO ESTA MISMA ESPECIFICACIÓN.

LAS PAREDES SERÁN REPELLADAS Y AFINADAS POR EL INTERIOR.

LAS PAREDES DEL REACTOR Y DE LA LAGUNA FACULTATIVA SERÁN SELLADAS MEDIANTE IMPERMEABILIZANTE EPÓXICO.

GEOMEMBRANA:

LA GEOMEMBRANA TENDRÁ UN ESPESOR DE 40 MILS (1.0 MM) CON RESISTENCIA A LOS RAYOS ULTRAVIOLETA.

LA UNIÓN DE LA GEOMEMBRANA SE REALIZARÁ MEDIANTE TERMOFUSIÓN.



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADOS
MAESTRÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES Y MEDIO AMBIENTE

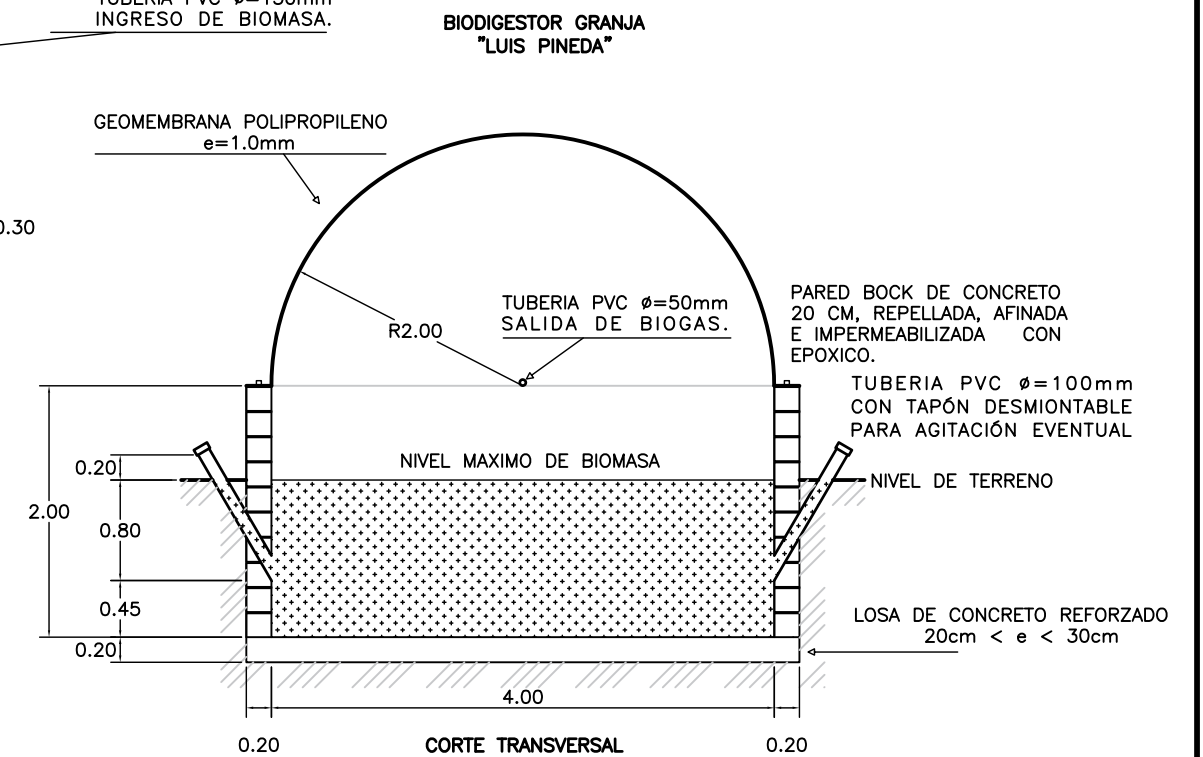
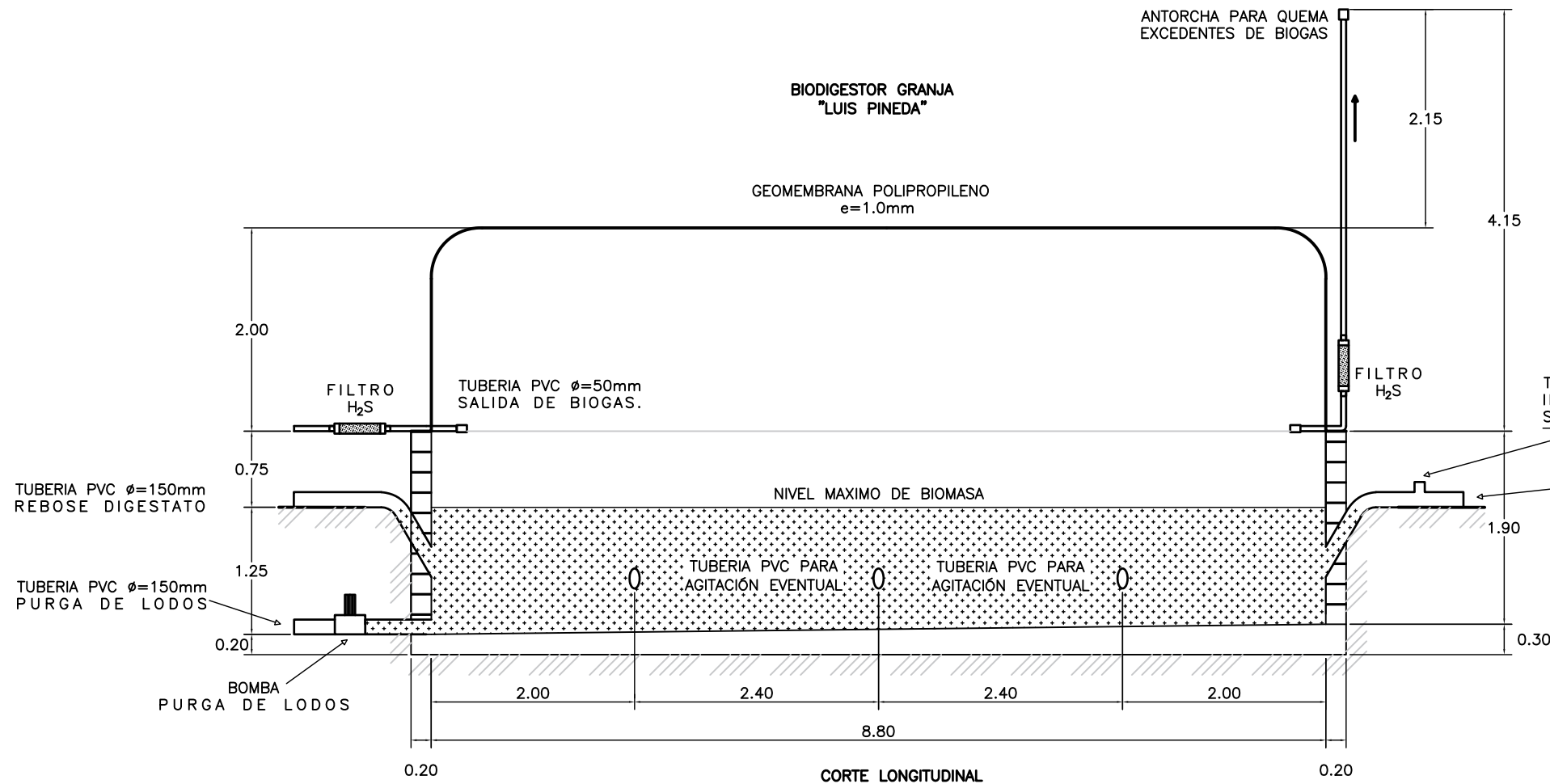
TRABAJO DE GRADUACIÓN:
EVALUACIÓN DE LA INTEGRACIÓN DE BIODIGESTORES
EN LA CADENA DE VALOR DE LA GANADERÍA EN EL
MUNICIPIO DE CHALATENANGO CENTRO

PRESENTA:
DIMAS ODUL SERRANO ORTIZ

IMPRESIÓN:
MAYO DEL 2026

ESCALA:
1:50

PAGINA:
45



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADOS
MAESTRÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES Y MEDIO AMBIENTE

TRABAJO DE GRADUACIÓN:
**EVALUACIÓN DE LA INTEGRACIÓN DE BIODIGESTORES
EN LA CADENA DE VALOR DE LA GANADERÍA EN EL
MUNICIPIO DE CHALATENANGO CENTRO**

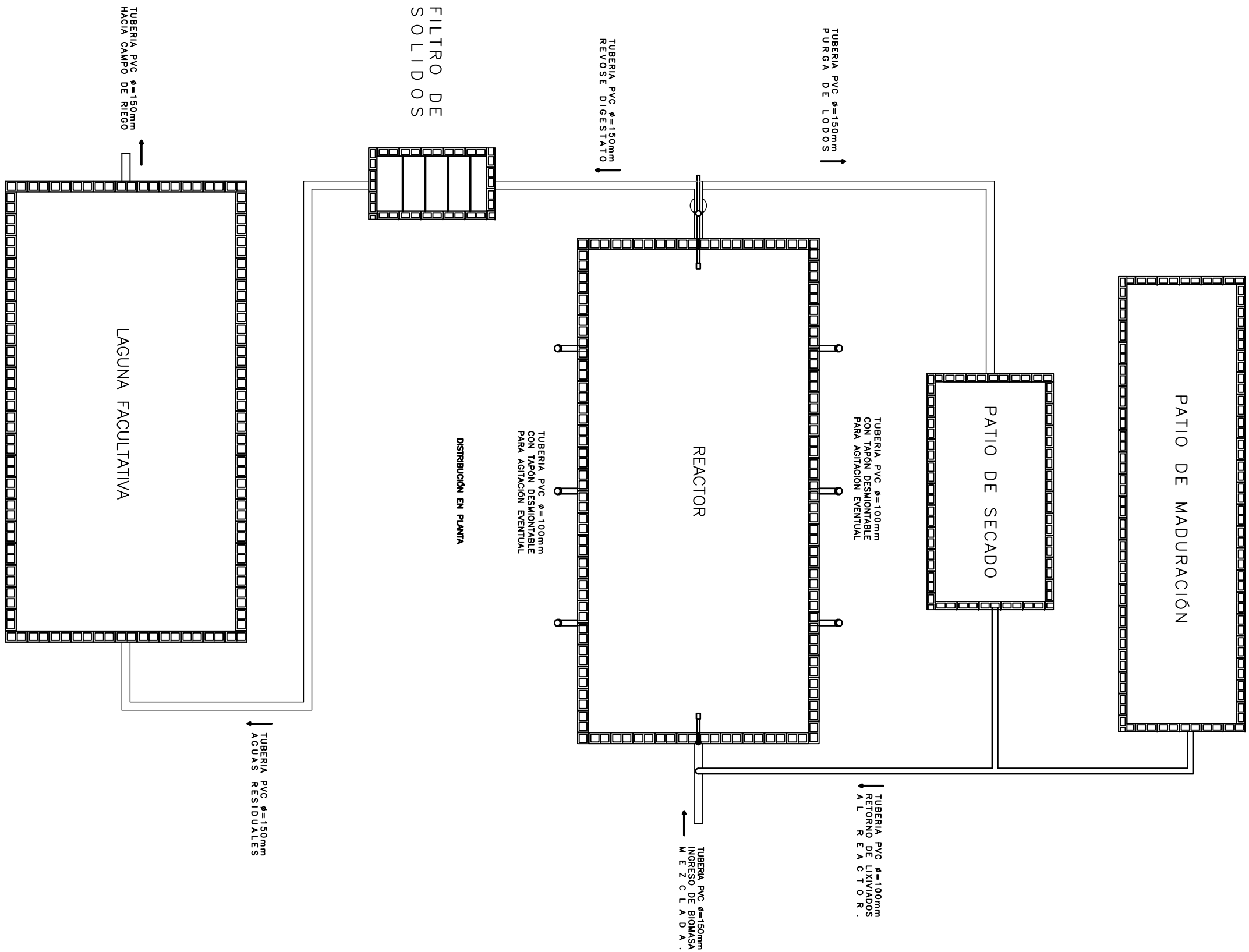
PRESENTA:
DIMAS ODUL SERRANO ORTIZ

IMPRESIÓN:
MAYO DEL 2026

ESCALA:
1:60

PAGINA:
46

SISTEMAS PARA BIODIGESTOR
GRANJA "LUIS PINEDA"
AREA MINIMA REQUERIDA 500M2



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADOS
MAESTRÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES Y MEDIO
AMBIENTE

TRABAJO DE GRADUACIÓN:
EVALUACIÓN DE LA INTEGRACIÓN DE BIODIGESTORES
EN LA CADENA DE VALOR DE LA GANADERÍA EN EL
MUNICIPIO DE CHALATENANGO CENTRO

PRESENTA:
DIMAS ODUL SERRANO ORTIZ

IMPRESIÓN:
MAYO DEL 2026

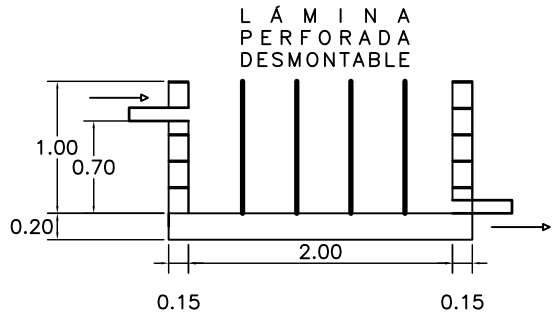
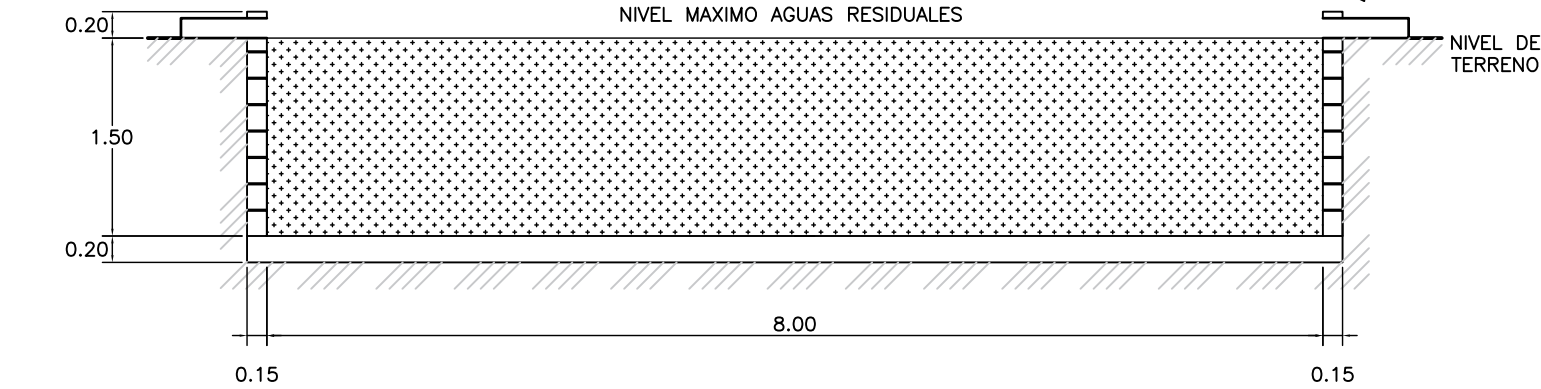
ESCALA:
1:80

PAGINA:
47

LAGUNA FACULTATIVA
4.0m X 8.0m X 1.5m

TUBERIA PVC $\phi=150\text{mm}$
HACIA CAMPO DE RIEGO

TUBERIA PVC $\phi=150\text{mm}$
AGUAS RESIDUALES

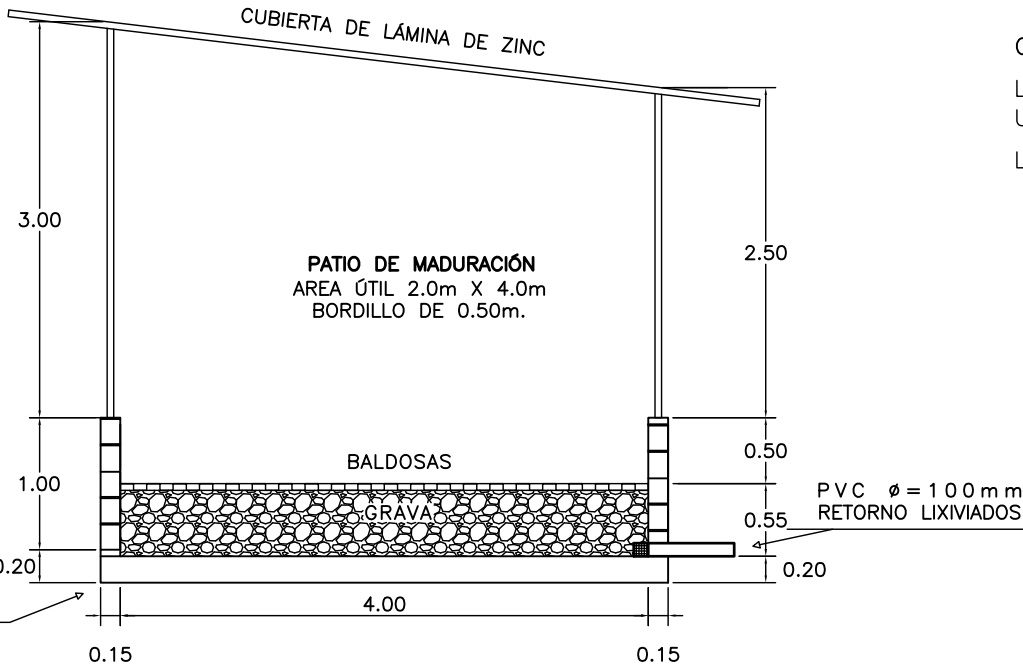


FILTRO DE SOLIDOS
1.0m X 2.0m X 1.0m

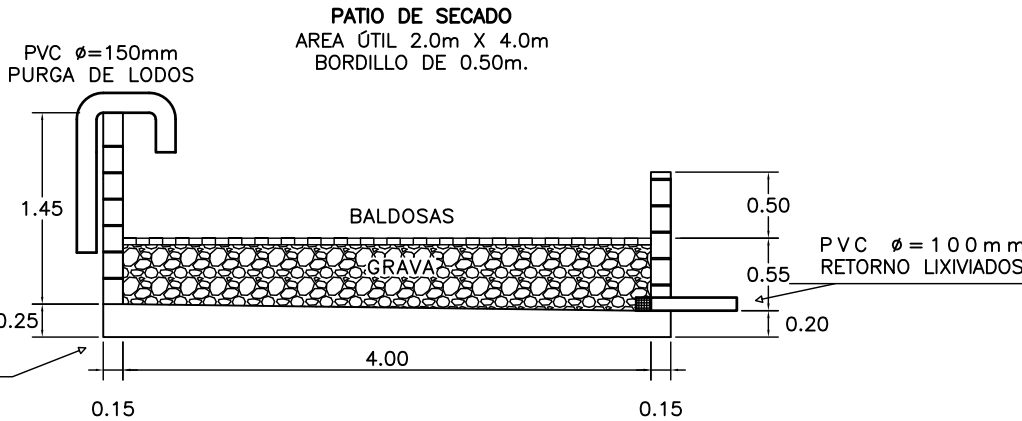


FILTRO H₂S

LOSA DE CONCRETO REFORZADO
20cm < e < 25cm



LOSA DE CONCRETO REFORZADO
20cm < e < 25cm



ESPECIFICACIONES

LOSAS DE CIMENTACIÓN:

LA LOSA SERÁ COLADA SOBRE UNA CAPA DE SUELO-CEMENTO CON UN ESPESOR MÍNIMO DE 20 CM, COMPACTADO AL 95 % DE SU PESO VOLUMÉTRICO SECO MÁXIMO, DETERMINADO SEGÚN LA NORMA ASTM D1557.

EL CONCRETO A UTILIZAR TENDRÁ UNA RESISTENCIA $F'c = 210 \text{ KG/CM}^2$ Y SERÁ REFORZADO CON UNA PARRILLA DE ACERO CORRUGADO $FY = 4200 \text{ KG/CM}^2$, NO. 3 @ 20 CM EN AMBOS SENTIDOS.

EL ACERO DEBERÁ TENER UNA SEPARACIÓN MÍNIMA DE 7.5 CM DESDE EL SUELO.

PAREDES:

SE EMPLEARÁ BLOCK DE 15 CM O 20 CM SEGÚN LO ESPECIFICADO EN PLANOS.

SE COLOCARÁN BASTONES DE ACERO CORRUGADO $FY = 4200 \text{ KG/CM}^2$, NO. 3 @ 40 CM, LLENANDO LAS CELDAS CON CONCRETO FLUIDO DE RESISTENCIA MÍNIMA DE 150 KG/CM^2 .

CADA DOS HILADAS DE BLOCK SE INTERCALARÁ UNA HILADA DE BLOCK TIPO SOLERA, REFORZADA CON UNA BARRA DE ACERO CORRUGADO $FY = 4200 \text{ KG/CM}^2$, NO. 3, Y RELLENA CON CONCRETO FLUIDO CON RESISTENCIA MÍNIMA DE 150 KG/CM^2 . LA CORONACIÓN DE LA PARED SE REALIZARÁ SIGUIENDO ESTA MISMA ESPECIFICACIÓN.

LAS PAREDES SERÁN REPELLADAS Y AFINADAS POR EL INTERIOR.

LAS PAREDES DEL REACTOR Y DE LA LAGUNA FACULTATIVA SERÁN SELLADAS MEDIANTE IMPERMEABILIZANTE EPÓXICO.

GEOMEMBRANA:

LA GEOMEMBRANA TENDRÁ UN ESPESOR DE 40 MILS (1.0 MM) CON RESISTENCIA A LOS RAYOS ULTRAVIOLETA.

LA UNIÓN DE LA GEOMEMBRANA SE REALIZARÁ MEDIANTE TERMOFUSIÓN.



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADOS
MAESTRÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES Y MEDIO AMBIENTE

TRABAJO DE GRADUACIÓN:
**EVALUACIÓN DE LA INTEGRACIÓN DE BIODIGESTORES
EN LA CADENA DE VALOR DE LA GANADERÍA EN EL
MUNICIPIO DE CHALATENANGO CENTRO**

PRESENTA:
DIMAS ODUL SERRANO ORTIZ

IMPRESIÓN:
MAYO DEL 2026

ESCALA:
1:50

PAGINA:
48

3.6. COSTOS DE CONSTRUCCIÓN

Se ha llevado a cabo un análisis de costos con el propósito de determinar la inversión requerida para la construcción de los sistemas y sus componentes. Asimismo, se han estimado los volúmenes de obra tomando como referencia los planos previamente presentados y utilizando software especializado en dibujo de ingeniería.

El análisis detallado de los costos unitarios se encuentra disponible en el Anexo No. 3.

BIODIGESTOR GRANJAS "EL PARAISO" Y "ANGEL GUEVARA"					
ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CU	CANTIDAD	SUBTOTAL
1	TRAZO DE ÁREAS	m2	\$0.62	45.85	\$28.43
2	EXCAVACIÓN MATERIAL SEMIDURO EMPLEANDO RETROEXCAVADORA. INCLUYE COSTO DE MAQUINARIA, OPERADOR Y COMBUSTIBLE.	m3	\$9.25	47.29	\$437.43
3	DESALOJO DE MATERIAL EXCAVADO. INCLUYE CARGA EN CAMIÓN DE VOLTEO USANDO RETROEXCAVADORA Y TRANSPORTE EN UNA DISTANCIA MÁXIMA DE 5KM.	m3	\$6.60	47.29	\$312.11
4	COMPACTACIÓN DE SUELO-CEMENTO 1:20 AL 95% DE PESO VOLUMÉTRICO SECO MÁXIMO DETERMINADO SEGÚN ASTM D1557.	m3	\$33.60	7.17	\$240.91
5	LOSA DE CIMENTACIÓN DE 20CM DE ESPESOR CONCRETO F'C=210KG/CM2, ACERO CORRUGADO F'Y=4,200KG/CM2 NO. 3 @ 20CM AMBOS SENTIDOS.	m2	\$111.71	45.85	\$5,121.90
6	TOPPING DE NIVELACIÓN CON CONCRETO F'C=210KG/CM2 DESDE H=0CM HASTA H=10CM CON LONGITUD DE 5.10M.	m	\$43.09	3.30	\$142.20
7	PARED BLOCK DE CONCRETO DE 15CM. BLOCK SOLERA @40CM CON REFUERZO LONGITUDINAL 1 BARRA ACERO CORRUGADO F'Y=4,200KG/CM2 NO. 3. REFUERZO VERTICAL 1 BARRA ACERO CORRUGADO F'Y=4,200KG/CM2 NO. 3 @40CM LLENADO CELDAS CON CONCRETO FLUIDO F'C=150KG/CM2.	m2	\$27.69	73.52	\$2,035.77
8	REPELLO Y AFINADO DE PAREDES.	m2	\$5.87	73.52	\$431.56
9	APLICACIÓN DE IMPERMEABILIZANTE EPOXICO.	m2	\$3.76	54.90	\$206.42
10	GEOMEMBRANA DE POLIPROPILENO 40MILS (1.0MM) ALTA RESISTENCIA UNIONES TERMOFUSIONADAS	m2	\$59.20	25.55	\$1,512.56
11	BOMBA DE 1HP PARA IMPULSIÓN DE AGUAS NEGRAS. INCLUYE INSTALACIÓN ELECTRICA PARA 220V MONOFÁSICA.	SG	\$2,000.00	1.00	\$2,000.00
12	FILTRO PARA H2S DE FABRICACIÓN ARTESANAL. TUBERÍA PVC RELLENA DE LANA DE ACERO.	SG	\$46.91	2.00	\$93.82
13	ANTORCHA PARA QUEMADO DE EXCEDENTES FABRICADA CON TUBERÍA DE PVC 50MM Y TERMINAL CON 1.50M DE TUBERÍA DE HIERRO GALVANIZADO DE 50MM. SOPORTE ESTRUCTURAL CON TUBO ESTRUCTURAL CUADRADO DE 50MM DESDE LA BASE	SG	\$85.23	1.00	\$85.23
14	INSTALACIÓN DE TUBERÍA PVC DE 50MM. INCLUYE ACCESORIOS (20%)	m	\$2.80	30.00	\$84.00

BIODIGESTOR GRANJAS "EL PARAISO" Y "ANGEL GUEVARA"					
ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CU	CANTIDAD	SUBTOTAL
15	INSTALACIÓN DE TUBERÍA PVC DE 100MM. INCLUYE ACCESORIOS (20%)	m	\$6.49	50.00	\$324.50
16	FILTRO LÁMINA DESPLEGADA 1/2 PULG. DE 1.0M X 1.0M. INCLUYE SOPORTES CON ÁNGULO ESTRUCTURAL PARA SU MONTAJE Y DESMONTAJE.	U	\$49.37	3.00	\$148.11
17	FILTRO DE LIXIVIACIÓN PATIOS DE SECADO Y PATIO DE MADURACIÓN. SUPERFICIE DE BALDOSAS Y GRAVA SEGÚN PLANOS.	SG	\$400.00	1.00	\$400.00
18	ESTRUCTURA Y CUBIERTA DE TECHO PARA PATIO DE MADURACIÓN SEGÚN PLANOS.	SG	\$450.00	1.00	\$450.00
Sumatoria					\$14,054.96
Costos Indirectos 20%					\$2,810.99
Imprevistos 5%					\$702.75
COSTO DEL PROYECTO					\$17,568.70

Tabla No. 9: Cálculo de costo de construcción para biodigestores de las ganaderías "El Paraíso" Y "Ángel Guevara"

BIODIGESTOR GRANJA "LUIS PINEDA"					
ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CU	CANTIDAD	SUBTOTAL
1	TRAZO DE ÁREAS	m2	\$0.62	110.32	\$68.40
2	EXCAVACIÓN MATERIAL SEMIDURO EMPLEANDO RETROEXCAVADORA. INCLUYE COSTO DE MAQUINARIA, OPERADOR Y COMBUSTIBLE.	m3	\$9.25	136.9	\$1,266.33
3	DESALOJO DE MATERIAL EXCAVADO. INCLUYE CARGA EN CAMIÓN DE VOLTEO USANDO RETROEXCAVADORA Y TRANSPORTE EN UNA DISTANCIA MÁXIMA DE 5KM.	m3	\$6.60	136.9	\$903.54
4	COMPACTACIÓN DE SUELO-CEMENTO 1:20 AL 95% DE PESO VOLUMÉTRICO SECO MÁXIMO DETERMINADO SEGÚN ASTM D1557.	m3	\$33.60	18.06	\$606.82
5	LOSA DE CIMENTACIÓN DE 20CM DE ESPESOR CONCRETO F'C=210KG/CM2, ACERO CORRUGADO F'Y=4,200KG/CM2 NO. 3 @ 20CM AMBOS SENTIDOS.	m2	\$111.71	110.32	\$12,323.85
6	TOPPING DE NIVELACIÓN CON CONCRETO F'C=210KG/CM2 DESDE H=0CM HASTA H=10CM CON LONGITUD DE 9.10M.	m	\$75.12	4.4	\$330.53
7	PARED BLOCK DE CONCRETO DE 20CM. BLOCK SOLERA @40CM CON REFUERZO LONGITUDINAL 1 BARRA ACERO CORRUGADO F'Y=4,200KG/CM2 NO. 3. REFUERZO VERTICAL 1 BARRA ACERO CORRUGADO F'Y=4,200KG/CM2 NO. 3 @40CM LLENADO CELDAS CON CONCRETO FLUIDO F'C=150KG/CM2.	m2	\$45.53	97.92	\$4,458.30
8	PARED BLOCK DE CONCRETO DE 15CM. BLOCK SOLERA @40CM CON REFUERZO LONGITUDINAL 1 BARRA ACERO CORRUGADO F'Y=4,200KG/CM2 NO. 3. REFUERZO VERTICAL 1 BARRA ACERO CORRUGADO F'Y=4,200KG/CM2 NO. 3 @40CM LLENADO CELDAS CON CONCRETO FLUIDO F'C=150KG/CM2.	m2	\$27.69	21.98	\$608.63
9	REPELLO Y AFINADO DE PAREDES.	m2	\$5.87	119.9	\$703.81

BIODIGESTOR GRANJA "LUIS PINEDA"					
ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CU	CANTIDAD	SUBTOTAL
10	APLICACIÓN DE IMPERMEABILIZANTE EPOXICO.	m2	\$3.76	97.92	\$368.18
11	GEOMEMBRANA DE POLIPROPILENO 40MILS (1.0MM) ALTA RESISTENCIA UNIONES TERMOFUSIONADAS	m2	\$59.20	60.79	\$3,598.77
12	BOMBA DE 2HP PARA IMPULSIÓN DE AGUAS NEGRAS. INCLUYE INSTALACIÓN ELECTRICA PARA 220V MONOFÁSICA.	SG	\$2,550.00	1	\$2,550.00
13	FILTRO PARA H2S DE FABRICACIÓN ARTESANAL. TUBERÍA PVC RELLENA DE LANA DE ACERO.	SG	\$46.91	2	\$93.82
14	ANTORCHA PARA QUEMADO DE EXCEDENTES FABRICADA CON TUBERÍA DE PVC 50MM Y TERMINAL CON 1.50M DE TUBERÍA DE HIERRO GALVANIZADO DE 50MM. SOPORTE ESTRUCTURAL CON TUBO ESTRUCTURAL CUADRADO DE 50MM DESDE LA BASE	SG	\$85.23	1	\$85.23
15	INSTALACIÓN DE TUBERÍA PVC DE 50MM. INCLUYE ACCESORIOS (20%)	m	\$2.80	30	\$84.00
16	INSTALACIÓN DE TUBERÍA PVC DE 100MM. INCLUYE ACCESORIOS (20%)	m	\$6.49	50	\$324.50
17	FILTRO LÁMINA DESPLEGADA 1/2 PULG. DE 1.0M X 1.0M. INCLUYE SOPORTES CON ÁNGULO ESTRUCTURAL PARA SU MONTAJE Y DESMONTAJE.	U	\$49.37	4	\$197.48
18	FILTRO DE LIXIVIACIÓN PATIOS DE SECADO Y PATIO DE MADURACIÓN. SUPERFICIE DE BALDOSAS Y GRAVA SEGÚN PLANOS.	SG	\$917.00	1	\$917.00
19	ESTRUCTURA Y CUBIERTA DE TECHO PARA PATIO DE MADURACIÓN SEGÚN PLANOS.	SG	\$810.00	1	\$810.00
Sumatoria					\$30,230.77
Costos Indirectos 20%					\$6,046.15
Imprevistos 5%					\$1,511.54
COSTO DEL PROYECTO					\$37,788.46

Tabla No. 10: Cálculo de costo de construcción para biodigestores de la ganadería
"Luis Pineda"

4. ANÁLISIS ECONÓMICO

4.1. USO DE LOS PRODUCTOS DE BIODIGESTIÓN

4.1.1. Biogás

Dadas las características de las granjas y los procesos productivos que en ellas se desarrollan, el uso más eficiente del biogás es su aprovechamiento térmico, particularmente mediante combustión, para la cocción y procesamiento de la leche y sus derivados. Además, puede emplearse en la preparación de alimentos para el personal de campo, ya que los trabajadores de los corrales suelen pasar la mayor parte del día en los potreros y establos, donde requieren calentar o cocinar sus comidas.

El biogás presenta un poder calorífico inferior de 21.5 MJ/m^3 , lo que se explica por su composición, que consiste principalmente en metano, dióxido de carbono y pequeñas cantidades de otros gases, como el ácido sulfhídrico. En contraste, el metano puro posee un poder calorífico inferior de 35.9 MJ/m^3 . [30]

Es importante señalar que el biogás se utiliza en condiciones atmosféricas normales, es decir, a una presión de 1 atmósfera y una temperatura de aproximadamente 25°C , que corresponden a las condiciones habituales en la zona de implementación del sistema.

Para efectos comparativos, el gas licuado de petróleo (GLP) tiene un poder calorífico inferior de 46.1 MJ/kg . Cabe destacar que, en este caso, las unidades de medida responden a los estándares comerciales, dado que el GLP se comercializa por masa, habitualmente en cilindros metálicos de 10, 25 y 35 libras. Lo que facilita su transporte y garantiza condiciones seguras para su uso.

Al momento de realizar la presente investigación, los precios de referencia publicados por la Dirección General de Energía, Hidrocarburos y Minas rondan los $\$1.05/\text{kg}$ de GLP.

A continuación, se calcula el equivalente en GLP de la producción de biogás para poder determinar el valor aproximado en dólares de la producción diaria generada:

Ganadería El Paraíso:

$$EQ.MASA GLP = \frac{\left(28.39 \frac{m^3}{día}\right) \left(21.5 \frac{MJ}{m^3}\right)}{46.1 \frac{MJ}{kg}} = 13.24 \frac{kg}{día}$$

$$EQ.DOLARES GLP = \left(13.24 \frac{kg}{día}\right) \left(\frac{\$1.05}{kg}\right) = \$13.90/día$$

Ganadería Luis Pineda:

$$EQ.MASA GLP = \frac{\left(80.32 \frac{m^3}{día}\right) \left(21.5 \frac{MJ}{m^3}\right)}{46.1 \frac{MJ}{kg}} = 37.46 \frac{kg}{día}$$

$$EQ.DOLARES GLP = \left(37.46 \frac{kg}{día}\right) \left(\frac{\$1.05}{kg}\right) = \$39.33/día$$

Ganadería Ángel Guevara:

$$EQ.MASA GLP = \frac{\left(23.99 \frac{m^3}{día}\right) \left(21.5 \frac{MJ}{m^3}\right)}{46.1 \frac{MJ}{kg}} = 11.19 \frac{kg}{día}$$

$$EQ.DOLARES GLP = \left(11.19 \frac{kg}{día}\right) \left(\frac{\$1.05}{kg}\right) = \$11.75/día$$

GRANJA	PRODUCCIÓN DE BIOGÁS POR DÍA		EQUIVALENTE EN GAS LICUADO DE PETRÓLEO	
	Masa [kg/día]	Volumen [m³/día]	Masa [kg]	[\$/Día]
El Paraíso	25.56	28.39	13.24	13.90
Luis Pineda	76.12	80.32	37.46	39.33
Ángel Guevara	22.43	23.99	11.19	11.75

Tabla No. 11: Equivalencias de producción de biogás comparado contra GLP a precio de mercado en El Salvador.

Cabe destacar que su uso sería interno y su valor económico sería en términos de costos evitados, ya que no sería vendido.

4.1.2. Biofertilizante

Los sólidos residuales generados durante el proceso de biodigestión serán extraídos una vez finalizado el tiempo de retención hidráulica, conforme al diseño del reactor. Estos subproductos poseen un alto contenido de nutrientes, lo que permite su aprovechamiento seguro en la fertilización de cultivos como el maíz y el maicillo, utilizados en la producción de silo para la alimentación del ganado. De esta manera, se establece un ciclo productivo sostenible en el que los desechos se reincorporan al sistema agropecuario, contribuyendo a la reducción de costos en la cadena de valor de la ganadería.

Uno de los biofertilizantes de uso frecuente en la agricultura es la gallinaza, una mezcla de granza de arroz y excretas de gallina. Según datos de la Escuela Nacional de Agricultura, su precio promedio es de \$1.25 por quintal, valor que servirá como referencia para estimar el impacto económico de la producción de biofertilizante derivado del proceso de biodigestión, por tratarse de materiales de naturaleza similar.

Ganadería EL Paraíso:

$$EQ.DOLARES\ BIOFERTILIZANTE = \left(47.79 \frac{kg}{día}\right) \left(\frac{\$1.25}{100\ kg}\right) = \$0.60/día$$

Ganadería Luis Pineda:

$$EQ.DOLARES\ BIOFERTILIZANTE = \left(136.99 \frac{kg}{día}\right) \left(\frac{\$1.25}{100\ kg}\right) = \$1.71/día$$

Ganadería Ángel Guevara:

$$EQ.DOLARES\ BIOFERTILIZANTE = \left(40.37 \frac{kg}{día}\right) \left(\frac{\$1.25}{100\ kg}\right) = \$0.50/día$$

Cabe destacar que su uso sería interno y su valor económico sería en términos de costos evitados, ya que no sería vendido.

4.2. EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN

4.2.1. Ganadería “El Paraíso”.

Datos generales:

- Costo total de construcción: $C_0 = \$17,568.70$
- Costo anual estimado de operación y mantenimiento: $C_{O\&M} = \$2,000.00$
- Vida útil del proyecto = 20 años
- Ingresos: $I_{año} = (\$13.90 + \$0.60)(365) = \$5,292.50$

Flujo de efectivo anual:

$$F = \$5,292.50 - \$2,000 = \$3,292.50$$

CALCULO DE LA TASA INTERNA DE RETORNO (TIR):

La TIR es la tasa de descuento que hace que el Valor Actual Neto (VAN) sea igual a cero, matemáticamente se expresa así:

$$\sum_1^n \frac{F}{(1 + TIR)^n} - C_0 = 0$$
$$(3,292.50) \left[\frac{1}{(1 + TIR)^1} + \frac{1}{(1 + TIR)^2} + \frac{1}{(1 + TIR)^3} + \dots + \frac{1}{(1 + TIR)^{20}} \right] - 17,568.70 = 0$$

Resolviendo se obtiene: TIR=18.06%

También es posible resolver mediante el empleo de la función TIR del software Microsoft Excel, cuya sintaxis es =TIR(VALORES; [ESTIMAR]).

CALCULO DEL VALOR ACTUAL NETO (VAN):

Teniendo presente el concepto de dinero en el tiempo, el Valor Actual Neto se entiende como el valor presente de los flujos de caja netos (ingresos - egresos) originados por una inversión.

En el presente ejercicio se usará una tasa de descuento del $r=12.5\%$ la cual es sugerida por el CENTA en su informe denominado “Costos De Producción De Cultivos Agropecuarios” de octubre del 2022. [31]

$$VAN = \sum_1^n \frac{F}{(1 + r)^n} - C_0$$

$$VAN = (3,292.50) \left[\frac{1}{(1 + 0.125)^1} + \frac{1}{(1 + 0.125)^2} + \dots + \frac{1}{(1 + 0.125)^{20}} \right] - 17,568.70$$

Resolviendo se obtiene: VAN=\$6,273.46

También es posible resolver mediante el empleo de la función VNA del software Microsoft Excel, cuya sintaxis es =VNA(TASA; VALORES)-Co.

PERIODO DE RECUPERACIÓN (PAYBACK):

Payback simple

Se determina el número de años necesarios para recuperar la inversión inicial, sin considerar el valor del dinero en el tiempo:

$$\text{Payback simple} = \frac{C_o}{F}$$

$$\text{Payback simple} = \frac{17,568.70}{3,292.50} = 5.34 \text{ años}$$

Payback Descontado

Se calcula acumulando los flujos descontados hasta que la suma iguale la inversión inicial.

$$\text{Flujo Descontado en el año } n = \frac{F}{(1 + r)^n}$$

Año	Flujo Descontado [\$]	Flujo Acumulado [\$]
1	\$2,926.67	\$ 2,926.67
2	\$2,601.48	\$ 5,528.15
3	\$2,312.43	\$ 7,840.58
4	\$2,055.49	\$ 9,896.07
5	\$1,827.10	\$ 11,723.17
6	\$1,624.09	\$ 13,347.26
7	\$1,443.64	\$ 14,790.90
8	\$1,283.23	\$ 16,074.13
9	\$1,140.65	\$ 17,214.79
10	\$1,013.91	\$ 18,228.70

Tabla No. 12: Calculo de payback descontado granja “El Paraíso”.

El periodo en el cual se recupera la inversión está entre 9 y 10 años, se procede a calcular la fracción:

$$Fracción = \frac{17,568.70 - 17,214.79}{1,013.91} = 0.35 \text{ años}$$

El payback descontado será $9 + 0.35 = 9.35$ años.

ÍNDICE DE RENTABILIDAD (PROFITABILITY INDEX, PI)

Es una medida que se utiliza para evaluar la relación entre los costos y los beneficios de un proyecto o inversión. Se calcula dividiendo el valor actual de los flujos de efectivo futuros entre el monto de la inversión inicial.

$$PI = \frac{VAN + C_o}{C_o} = \frac{\$6,273.46 + \$17,568.70}{\$17,568.70} = 1.36$$

RESUMEN E INTERPRETACIÓN DE INDICADORES

Indicador	Comentario
TIR= 18.06% > r=12.50%	El proyecto presenta una rentabilidad mayor que la rentabilidad mínima requerida.
VAN= \$6,273.46 > 0	La inversión produciría ingresos por encima de la rentabilidad exigida.
Payback Simple = 5.34 años	Dado que la vida útil del proyecto se estima en 20 años, el payback se considera razonable.
Payback Descontado = 9.35 años	
PI= 1.36	El proyecto es rentable, ya que los beneficios futuros superan la inversión.

Tabla No. 13: Resumen e interpretación de indicadores para el sistema de biodigestor propuesto para la granja “El Paraíso”.

4.2.2. Ganadería “Luis Pineda”.

Datos generales:

- Costo total de construcción: $C_o = \$37,788.46$
- Costo anual estimado de operación y mantenimiento: $C_{O\&M} = \$5,000.00$
- Vida útil del proyecto = 20 años
- Ingresos: $I_{año} = (\$39.33 + \$1.71)(365) = \$14,979.60$

Flujo de efectivo anual:

$$F = \$14,979.60 - \$5,000.00 = \$9,979.60$$

CALCULO DE LA TASA INTERNA DE RETORNO (TIR):

$$\sum_1^n \frac{F}{(1 + TIR)^n} - C_0 = 0$$

$$(9,979.60) \left[\frac{1}{(1 + TIR)^1} + \frac{1}{(1 + TIR)^2} + \frac{1}{(1 + TIR)^3} + \dots + \frac{1}{(1 + TIR)^{20}} \right] - 37,788.46 = 0$$

Resolviendo se obtiene: TIR=26.16%

CALCULO DEL VALOR ACTUAL NETO (VAN):

En el presente ejercicio se usará una tasa de descuento del $r=12.5\%$ la cual es sugerida por el CENTA en su informe denominado “Costos De Producción De Cultivos Agropecuarios” de octubre del 2022. [31]

$$VAN = \sum_1^n \frac{F}{(1 + r)^n} - C_0$$

$$VAN = (9,979.60) \left[\frac{1}{(1 + 0.125)^1} + \frac{1}{(1 + 0.125)^2} + \dots + \frac{1}{(1 + 0.125)^{20}} \right] - 37,788.46$$

Resolviendo se obtiene: VAN=\$34,477.35

PERIODO DE RECUPERACIÓN (PAYBACK):

Payback simple

$$Payback\ simple = \frac{C_0}{F}$$

$$Payback\ simple = \frac{37,788.46}{9,979.60} = 3.79\text{ años}$$

Payback Descontado

$$\text{Flujo Descontado en el año } n = \frac{F}{(1 + r)^n}$$

Año	Flujo Descontado [\$]	Flujo Acumulado [\$]
1	\$ 8,870.76	\$ 8,870.76
2	\$ 7,885.12	\$ 16,755.87
3	\$ 7,008.99	\$ 23,764.86
4	\$ 6,230.22	\$ 29,995.08
5	\$ 5,537.97	\$ 35,533.05
6	\$ 4,922.64	\$ 40,455.69

Tabla No. 14: Calculo de payback descontado para la granja “Luis Pineda”.

El periodo en el cual se recupera la inversión está entre 5 y 6 años, se procede a calcular la fracción:

$$\text{Fracción} = \frac{37,788.46 - 35,533.05}{4,922.64} = 0.46 \text{ años}$$

El payback descontado será $5 + 0.46 = 5.46$ años.

ÍNDICE DE RENTABILIDAD (PROFITABILITY INDEX, PI)

$$PI = \frac{VAN + C_o}{C_o} = \frac{\$34,477.35 + \$37,788.46}{\$37,788.46} = 1.91$$

RESUMEN E INTERPRETACIÓN DE INDICADORES

Indicador	Comentario
TIR= 26.16% > r=12.50%	El proyecto presenta una rentabilidad mayor que la rentabilidad mínima requerida.
VAN= \$34,477.35 > 0	La inversión produciría ingresos por encima de la rentabilidad exigida.
Payback Simple = 3.79 años	Dado que la vida útil del proyecto se estima en 20 años, el payback se considera razonable.
Payback Descontado = 5.46 años	
PI= 1.91	El proyecto es rentable, ya que los beneficios futuros superan la inversión.

Tabla No. 15: Resumen e interpretación de indicadores para el sistema de biodigestor propuesto para la granja “Luis Pineda”.

4.2.3. Ganadería “Ángel Guevara”.

Datos generales:

- Costo total de construcción: $C_0 = \$17,568.70$
- Costo anual estimado de operación y mantenimiento: $C_{O\&M} = \$1,500.00$
- Vida útil del proyecto = 20 años
- Ingresos: $I_{año} = (\$11.75 + \$0.50)(365) = \$4,471.25$

Flujo de efectivo anual:

$$F = \$4,471.25 - \$1,500 = \$2,971.25$$

CALCULO DE LA TASA INTERNA DE RETORNO (TIR):

$$\sum_1^n \frac{F}{(1 + TIR)^n} - C_0 = 0$$

$$(2,971.25) \left[\frac{1}{(1 + TIR)^1} + \frac{1}{(1 + TIR)^2} + \frac{1}{(1 + TIR)^3} + \dots + \frac{1}{(1 + TIR)^{20}} \right] - 17,568.70 = 0$$

Resolviendo se obtiene: TIR=16.05%

CALCULO DEL VALOR ACTUAL NETO (VAN):

En el presente ejercicio se usará una tasa de descuento del $r=12.5\%$ la cual es sugerida por el CENTA en su informe denominado “Costos De Producción De Cultivos Agropecuarios” de octubre del 2022. [31]

$$VAN = \sum_1^n \frac{F}{(1 + r)^n} - C_0$$

$$VAN = (2,971.25) \left[\frac{1}{(1 + 0.125)^1} + \frac{1}{(1 + 0.125)^2} + \dots + \frac{1}{(1 + 0.125)^{20}} \right] - 17,568.70$$

Resolviendo se obtiene: VAN=\$3,947.17

PERIODO DE RECUPERACIÓN (PAYBACK):

Payback simple

$$Payback\ simple = \frac{C_0}{F}$$

$$Payback\ simple = \frac{17,568.70}{2,971.25} = 5.91\ años$$

Payback Descontado

Se calcula acumulando los flujos descontados hasta que la suma iguale la inversión inicial.

$$\text{Flujo Descontado en el año } n = \frac{F}{(1 + r)^n}$$

Año	Flujo Descontado [\$]	Flujo Acumulado [\$]
1	\$ 2,641.11	\$ 2,641.11
2	\$ 2,347.65	\$ 4,988.77
3	\$ 2,086.80	\$ 7,075.57
4	\$ 1,854.94	\$ 8,930.51
5	\$ 1,648.83	\$ 10,579.34
6	\$ 1,465.63	\$ 12,044.97
7	\$ 1,302.78	\$ 13,347.75
8	\$ 1,158.03	\$ 14,505.78
9	\$ 1,029.36	\$ 15,535.14
10	\$ 914.98	\$ 16,450.12
11	\$ 813.32	\$ 17,263.44
12	\$ 722.95	\$ 17,986.39

Tabla No. 16: Calculo de payback descontado granja “Angel Guevara”.

El periodo en el cual se recupera la inversión está entre 11 y 12 años, se procede a calcular la fracción:

$$\text{Fracción} = \frac{17,568.70 - 17,263.44}{722.95} = 0.42 \text{ años}$$

El payback descontado será $11 + 0.42 = 11.42$ años.

ÍNDICE DE RENTABILIDAD (PROFITABILITY INDEX, PI)

$$PI = \frac{VAN + C_o}{C_o} = \frac{\$3,947.17 + \$17,568.70}{\$17,568.70} = 1.23$$

RESUMEN E INTERPRETACIÓN DE INDICADORES

Indicador	Comentario
TIR= 16.05% > r=12.50%	El proyecto presenta una rentabilidad mayor que la rentabilidad mínima requerida.
VAN= \$3,947.17 > 0	La inversión produciría ingresos por encima de la rentabilidad exigida.

Payback Simple = 5.91 años	Dado que la vida útil del proyecto se estima en 20 años, el payback se considera razonable.
Payback Descontado = 11.42 años	
PI= 1.23	El proyecto es rentable, ya que los beneficios futuros superan la inversión.

Tabla No. 17: Resumen e interpretación de indicadores para el sistema de biodigestor propuesto para la granja “Ángel Guevara”.

4.2.4. Resumen del análisis para las tres ganaderías

Como se evidencia en los cálculos que preceden este apartado, la implementación de biodigestores presenta rentabilidad en las tres ganaderías, con diferentes cuantías en función de la producción de biogás y biofertilizante.

A continuación, se presenta la tabla resumen de los indicadores para las tres ganaderías en estudio:

Granja “El Paraíso”	Granja “Luis Pineda”	Granja “Ángel Guevara”
TIR= 18.06% > r=12.50%	TIR= 26.16% > r=12.50%	TIR= 16.05% > r=12.50%
VAN= \$6,273.46 > 0	VAN= \$34,477.35 > 0	VAN= \$3,947.17 > 0
Payback Simple = 5.34 años	Payback Simple = 3.79 años	Payback Simple = 5.91 años
Payback Descontado = 9.35 años	Payback Descontado = 5.46 años	Payback Descontado = 11.42 años
PI= 1.36	PI= 1.91	PI= 1.23

Tabla No. 18: Resumen de indicadores para las tres ganaderías en estudio.

5. REDUCCIÓN DE EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI)

La implementación de biodigestores en unidades ganaderas representa una medida efectiva para mitigar el impacto ambiental asociado a las actividades pecuarias, al reducir de forma significativa las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas por la descomposición anaerobia de los estiércoles. En este apartado se cuantifica la contribución potencial de dichos sistemas en la disminución de las emisiones, tomando como referencia la fracción de metano contenida en el biogás producido. Los resultados permiten dimensionar el beneficio ambiental derivado del aprovechamiento energético del biogás, expresado en equivalentes de dióxido de carbono evitados por cada ganadería analizada.

A partir de los cálculos desarrollados en la sección 3.2, correspondientes al dimensionamiento de los reactores, se obtuvo la producción teórica de biogás proyectada para cada una de las ganaderías analizadas, así como la fracción de dicho volumen atribuible al metano. Con base en estos resultados, se procederá a estimar las emisiones de gases de efecto invernadero evitadas mediante la implementación de los biodigestores en cada una de las unidades productivas evaluadas.

Ganadería	Producción diaria de Metano (kg)	Producción anual de Metano (kg)
El Paraíso	14.13	5,157.45
Luis Pineda	40.61	14,822.65
Ángel Guevara	11.79	4,303.35

Tabla No. 19: Producción de fracción de metano proyectada para cada ganadería.

El metano posee un Potencial de Calentamiento Global (GWP, por sus siglas en inglés) de 25. Esto significa que, en un horizonte de 100 años, su capacidad de atrapar calor en la atmósfera es 25 veces mayor que la de una cantidad equivalente de dióxido de carbono (CO₂).

5.1. GEI Evitados ganadería El paraíso.

Se calculará el equivalente de CO₂ evitado con la oxidación del metano producido en el biodigestor diseñado para la granja El paraíso en un periodo de un año.

$$GEI = (5,157.45 \text{ kg CH}_4) \left(25 \frac{\text{kg CO}_{2e}}{\text{kg CH}_4} \right) = 128,936.25 \text{ kg CO}_{2e}$$

De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), un vehículo de gasolina promedio emite aproximadamente 4,600 kg de dióxido de carbono (CO₂) por año. En consecuencia, la reducción alcanzada equivale a evitar las emisiones anuales generadas por aproximadamente 28 vehículos de este tipo.

5.2. GEI Evitados ganadería Luis Pineda.

Se calculará el equivalente de CO₂ evitado con la oxidación del metano producido en el biodigestor diseñado para la granja Luis Pineda en un periodo de un año.

$$GEI = (14,822.65 \text{ kg } CH_4) \left(25 \frac{\text{kg } CO_{2e}}{\text{kg } CH_4} \right) = 370,566.25 \text{ kg } CO_{2e}$$

Con este aporte se estaría evitando las emisiones anuales equivalentes a 80 vehículos gasolina.

5.3. GEI Evitados ganadería Ángel Guevara.

Se calculará el equivalente de CO₂ evitado con la oxidación del metano producido en el biodigestor diseñado para la granja Ángel Guevara en un periodo de un año.

$$GEI = (4,303.35 \text{ kg } CH_4) \left(25 \frac{\text{kg } CO_{2e}}{\text{kg } CH_4} \right) = 107,583.75 \text{ kg } CO_{2e}$$

Con este aporte se estaría evitando las emisiones anuales equivalentes a 23 vehículos gasolina.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

El presente estudio evaluó la factibilidad técnica, económica y ambiental de incorporar sistemas de biodigestión anaerobia en la cadena de valor de la ganadería en el municipio de Chalatenango Centro, utilizando como base el análisis de tres unidades productivas representativas de la zona. A partir de los resultados obtenidos, se presentan las siguientes conclusiones:

6.1.1. Disponibilidad de biomasa.

Se determinó que las tres granjas analizadas generan volúmenes significativos de excretas, con deposiciones promedio estimadas de 41 kg/día/animal (El Paraíso), 36 kg/día/animal (Luis Pineda) y 30 kg/día/animal (Ángel Guevara), considerando pesos promedio de 628 kg, 559 kg y 469 kg por animal, respectivamente. Bajo el criterio de diseño adoptado (50% de deposición en establo), esto permitió dimensionar sistemas con cargas orgánicas suficientes para garantizar procesos de biodigestión estables.

6.1.2. Dimensionamiento de los biodigestores.

Se establecieron volúmenes de reactor acordes a las condiciones de operación y un TRH de 20 días, obteniéndose capacidades de 45.0 m³ (El Paraíso y Ángel Guevara) y 124.0 m³ (Luis Pineda). Estos valores demuestran la factibilidad técnica de adaptar el diseño a diferentes escalas productivas dentro del mismo contexto territorial.

6.1.3. Aprovechamiento energético.

Se cuantificó una producción diaria de biogás equivalente a 28.39 m³/día, 80.32 m³/día y 23.99 m³/día para las tres granjas, respectivamente, lo que corresponde a ahorros equivalentes en GLP de \$13.90/día, \$39.33/día y \$11.75/día. Estos resultados confirman que el uso térmico del biogás en procesos productivos representa la alternativa más eficiente dentro de la cadena de valor ganadera.

6.1.4. Análisis económico.

La evaluación económica realizada demuestra que la implementación de biodigestores es financieramente viable en las tres granjas analizadas, al presentar indicadores que superan los umbrales mínimos de aceptación, incluida la tasa de descuento adoptada del 12.5%. En términos comparativos, la ganadería "Luis Pineda" registra los resultados más favorables, con una TIR de 26.16% y un VAN de \$34,477.35, lo que evidencia un mayor aprovechamiento de economías de escala. Por su parte, la ganadería "El Paraíso" presenta una TIR de 18.06% y un VAN de \$6,273.46,

manteniendo niveles adecuados de rentabilidad. En el caso de la ganadería “Ángel Guevara”, aunque corresponde a una unidad de menor escala, los indicadores obtenidos son positivos y consistentes con los de “El Paraíso”, lo que confirma la viabilidad económica del sistema en distintos tamaños de producción. Asimismo, los periodos de recuperación descontados, de 5.46 años en “Luis Pineda” y 9.35 años en “El Paraíso”, con valores comparables para “Ángel Guevara”, resultan coherentes con una vida útil estimada de 20 años. En conjunto, la comparación de indicadores evidencia que el desempeño económico mejora conforme aumenta la escala productiva, sin comprometer la rentabilidad en sistemas de menor tamaño.

6.1.5. Aprovechamiento de subproductos.

Se estimó una producción de biofertilizante de hasta 2.74 toneladas por ciclo (TRH=20 días) en la granja Luis Pineda, y valores cercanos a 0.96 y 0.81 toneladas en las otras granjas, lo que permite cerrar el ciclo productivo mediante la reutilización de nutrientes en la producción de forraje.

6.1.6. Impactos ambientales positivos

La gestión adecuada de los residuos ganaderos a través de biodigestores contribuye a mitigar significativamente la carga contaminante sobre el suelo y los cuerpos de agua, al tiempo que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero. Asimismo, el uso del digestato como biofertilizante representa un valor agregado en términos de sustitución de insumos, cerrando el ciclo productivo con enfoque agroecológico.

6.1.7. Limitaciones metodológicas asumidas

Es pertinente señalar que esta investigación no contempló la realización de análisis químicos de laboratorio, ni del sustrato utilizado ni de los productos obtenidos mediante el proceso de digestión anaerobia. En su lugar, se recurrió a datos teóricos y valores de referencia ampliamente respaldados por estudios previos. Si bien esta aproximación permitió alcanzar estimaciones razonablemente precisas, se reconoce que futuros estudios podrían afinar los resultados mediante caracterizaciones físico-químicas in situ que permitan validar empíricamente los parámetros utilizados.

6.1.8. Alineamiento con políticas públicas y compromisos climáticos

La adopción de biodigestores en entornos rurales como Chalatenango Centro no solo se alinea con los objetivos nacionales de mitigación del cambio climático y gestión ambiental, sino que constituye una medida concreta para avanzar en el cumplimiento de los compromisos asumidos por El Salvador en el marco de las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC). La incorporación de esta tecnología en las estrategias públicas de desarrollo territorial representa, por tanto, una oportunidad para generar impactos positivos sostenibles en los ámbitos ambiental, productivo y

social. Esta afirmación se sustenta en el cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero evitadas, desarrollado en el apartado 5.

6.1.9. Validación de la hipótesis.

La inclusión de biodigestores dentro de la cadena de valor de la ganadería aumenta su rentabilidad.

6.2. RECOMENDACIONES

Derivado de los hallazgos de esta investigación, se plantean las siguientes recomendaciones, orientadas a facilitar la adopción sostenible de la tecnología de biodigestión anaerobia en el contexto ganadero de Chalatenango Centro:

6.2.1. Fomentar programas de capacitación y asistencia técnica

Es esencial desarrollar estrategias de formación dirigidas a los productores ganaderos, que incluyan talleres prácticos, asesoría técnica continua y visitas demostrativas a proyectos exitosos. La apropiación de la tecnología depende, en gran medida, de la comprensión práctica de sus beneficios y funcionamiento.

6.2.2. Promover esquemas de financiamiento accesibles

Se recomienda diseñar mecanismos financieros que faciliten la inversión inicial en biodigestores, incluyendo créditos blandos, subsidios o incentivos fiscales. La participación de cooperativas, asociaciones de productores y entidades gubernamentales es clave para viabilizar este proceso.

6.2.3. Diseñar un plan de acompañamiento post-instalación

El éxito a largo plazo requiere del monitoreo técnico de los sistemas instalados, seguimiento de parámetros operativos y apoyo en el mantenimiento. Esto permitirá evitar el abandono de los biodigestores y consolidar su funcionamiento continuo.

6.2.4. Incluir estos sistemas en planes de entidades públicas

Las municipalidades y demás instancias territoriales deberían considerar a los biodigestores como herramientas clave dentro de sus estrategias locales de gestión ambiental, manejo de residuos y generación de energía renovable.

6.2.5. Incorporar análisis químicos en futuras investigaciones

Se recomienda realizar estudios complementarios que incluyan caracterización físico-química del estiércol disponible, así como del biogás y del digestato generado. Esto permitiría validar empíricamente los rendimientos energéticos, afinar los diseños de los sistemas y optimizar su funcionamiento bajo condiciones específicas del entorno local.

6.2.6. Incentivar experiencias piloto con monitoreo público

El desarrollo de proyectos demostrativos con biodigestores funcionales y accesibles al público podría mejorar la percepción de los productores respecto a su utilidad, además de servir como centros de formación y referencia para nuevos usuarios.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] MAG, "Anuario de Estadísticas Agropecuarias 2022-2023," 2024.
- [2] David Leonardo Parra-Ortiz, Mónica Andrea Botero-Londoño, and Julián Mauricio Botero-Londoño, "Biomasa residual pecuaria: revisión sobre la digestión anaerobia como método de producción de energía y otros subproductos," *UIS Ingenierías*, vol. 18, no. 1, pp. 149-160, 2019.
- [3] Óscar Antonio Rivera Guardado and Ronal Francisco Umaña Hernández, *Identificación de la disposición del recurso para la producción de biogás y su potencial energético en la industria Ganadera en El Salvador*.: Universidad de El Salvador, 2019.
- [4] Antonio Cañas, Lorena Argueta, and Ernesto Durán, "Primer Informe Bienal de Actualización El Salvador," Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales MARN, 2018.
- [5] Peter R Berti, Julia Krasevec, and Sian FitzGerald, "A review of the effectiveness of agriculture interventions in improving nutrition outcomes," *Public Health Nutrition*, pp. 599-609, 2003.
- [6] Jules N. Pretty, "Agricultural sustainability: Concepts, principles and evidence," *Philosophical Transactions B*, pp. 47–465, 2007.
- [7] Tom Bond and Michael R. Templeton, "History and future of domestic biogas plants in the developing world. ," *Energy for Sustainable Development*, pp. 347–354, 2011.
- [8] The World Bank, "Development and Climate Change," Washington DC, 2010.
- [9] Asamblea Legislativa de El Salvador, Ley especial para la reestructuración municipal, 2023.
- [10] Ayrat M Ziganshin et al., "Bacteria and archaea involved in anaerobic digestion of distillers grains with solubles," *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010.
- [11] Thu Hang Duong et al., "Protein hydrolysis and fermentation under methanogenic and acidifying conditions," *Biotechnology for Biofuels*, 2019.
- [12] Mohammed Kelif Ibro, Venkata Ramayya Ancha, and Dejene Beyene, "Biogas Production Optimization in the Anaerobic Codigestion Process: A Critical Review on Process Parameters Modeling and Simulation Tools," *Journal of Chemistry*, 2024.
- [13] V.A. Vavilin and L.Ya. Lokshina, "Modeling of volatile fatty acids degradation kinetics and evaluation of microorganism activity," *Bioresource Technology*, vol. 57, no. 1, pp. 69-80, 1996.
- [14] Lise Appels, Jan Baeyens, Jan Degreè, and Raf Dewil, "Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 34, no. 6, pp. 755-781, 2008.

- [15] S. Zinder, "Microbiology of anaerobic conversion of organic wastes to methane: recent developments," *Environmental Science, Biology*, 1984.
- [16] Burak Demirel and Paul Scherer, "The roles of acetotrophic and hydrogenotrophic methanogens during anaerobic conversion of biomass to methane: a review," *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, vol. 7, pp. 173–190, 2008.
- [17] Yuchen Liu and William B Whitman, "Metabolic, phylogenetic, and ecological diversity of the methanogenic archaea," *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2008.
- [18] Rudolf K. Thauer, Anne-Kristin Kaster, Henning Seedorf, Wolfgang Buckel, and Reiner Hedderich, "Methanogenic archaea: ecologically relevant differences in energy conservation," *Nature Reviews Microbiology*, pp. 579–591, 2008.
- [19] Ye Chen, Jay J. Cheng, and Kurt S. Creamer, "Inhibition of anaerobic digestion process: a review," *Bioresource Technology*, 2008.
- [20] Irini Angelidaki et al., "Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives," *Biotechnology Advances*, vol. 36, no. 2, pp. 452–466, 2018.
- [21] Yebo Li, Stephen Y. Park, and Jiying Zhu, "Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 1, pp. 821–826, 2011.
- [22] Lettinga G., "Anaerobic digestion and wastewater treatment systems," *Antonie Van Leeuwenhoek*, 1995.
- [23] Dieter Deublein and Angelika Steinhauser, *Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction.*, 2008.
- [24] José L. Contreras et al., "Correlación fenotípica y estimación del peso vivo en bovinos criollos," 2020.
- [25] Daniel Santiago Cortés Ramírez, *Diseño de Biodigestor de estiércol bovino*. Colombia: Universidad de los Andes, 2019.
- [26] MARN, "RTS 13.05.01:24 – Aguas Residuales. Parámetros de Calidad de Aguas Residuales para Descarga y Manejo de Lodos Residuales.," MARN, 2024.
- [27] MARN, "Lineamientos Técnicos Para La Evaluación De Actividades, Obras O Proyectos Que Comprendan La Alternativa De Reúso De Agua Residual Tratada," MARN, 2021.
- [28] David R. Bohnhoff and James C. Converse, "Engineering Properties of Separated Manure Solids*," *Biological Wastes*, vol. 19, pp. 91–106, 1987.

- [29] Jerry Murphy, Peter Weiland, Rudolf Braun, and Arthut Wellinger, "Biogas from Crop Digestion," IEA Bioenergy, 2011.
- [30] A. & LINDBERG WELLINGER, "Proceedings of Biogas Event 2000: Kick-Off for a Future Deployment of Biogas Technology," 2000.
- [31] Enrique José Arturo Parada, Edgardo Reyes Calderón, and Salvador Humberto Zeledón, "COSTOS DE PRODUCCIÓN DE CULTIVOS AGROPECUARIOS ," Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal, 2022.
- [32] Cristhian Andrés Corral Zambrano, Lester Josué Zambrano Solórzano, Dayana Melissa Pincay Vargas, and Selena Gabriela Calo Gómez, "Impactos ambientales generados por la ganadería en la provincia de Santo Domingo de Tsáchilas," *UNESUM-Ciencias: Revista Científica Multidisciplinaria*, vol. 5, no. 2, pp. 69-78, 2021.
- [33] Yeison Olaya Arboleda, *Fundamentos para diseño de biodigestores*. Palmira: Universidad Nacional de Colombia, 2009.
- [34] V. M. Nekhubvi, "An Overview of Anaerobic Digestion of Cow Dung," *Nature Environment and Pollution Technology*, vol. 23, no. 1, pp. 193-201, 2024.
- [35] J. A. Villanueva, "Gestión de residuos ganaderos: un enfoque integrado," *Revista Agroecología*, vol. 10, pp. 34-47, 2021.

ANEXOS

A. ANEXO 1: CÁLCULO DE DEPOSICIONES DIARIAS.

$$PV = -253.41 + 3.24PT$$

Donde: PV = Peso vivo [kg]

PT= Perímetro torácico [cm]

La deposición de heces diaria promedio se estimará como el 6.5% del peso vivo del animal, así:

$$Pe = 0.065 PV$$

Donde: Pe = Peso excretas [kg]

GANADERÍA 1								
Nombre :		Ganadería "El Paraíso"						
Acompaña :		Roberto Lemus (Propietario)						
Ejemplar 1	Raza :	Gyr	Perímetro Torácico [cm] :	260	Peso Vivo Estimado [kg] :	589	Deposición Estimada [kg/día] :	38
Ejemplar 2	Raza :	Holstein	Perímetro Torácico [cm] :	290	Peso Vivo Estimado [kg] :	686	Deposición Estimada [kg/día] :	45
Ejemplar 3	Raza :	Holstein	Perímetro Torácico [cm] :	270	Peso Vivo Estimado [kg] :	621	Deposición Estimada [kg/día] :	40
Ejemplar 4	Raza :	Holstein	Perímetro Torácico [cm] :	270	Peso Vivo Estimado [kg] :	621	Deposición Estimada [kg/día] :	40
Ejemplar 5	Raza :	Gyr	Perímetro Torácico [cm] :	270	Peso Vivo Estimado [kg] :	621	Deposición Estimada [kg/día] :	40
PESO PROMEDIO [kg] :						628	DEPOSICIÓN PROMEDIO [kg/día] :	41

Muestra recuperada : 3 kg

GANADERÍA 2								
Nombre :		Ganadería "Luis Pineda"						
Acompaña :		Amílcar Valdivieso (Director Distrital Agua Caliente)						
Ejemplar 1	Raza :	Holstein	Perímetro Torácico [cm] :	240	Peso Vivo Estimado [kg] :	524	Deposición Estimada [kg/día] :	34
Ejemplar 2	Raza :	Holstein	Perímetro Torácico [cm] :	220	Peso Vivo Estimado [kg] :	459	Deposición Estimada [kg/día] :	30
Ejemplar 3	Raza :	Holstein	Perímetro Torácico [cm] :	240	Peso Vivo Estimado [kg] :	524	Deposición Estimada [kg/día] :	34
Ejemplar 4	Raza :	Holstein	Perímetro Torácico [cm] :	235	Peso Vivo Estimado [kg] :	508	Deposición Estimada [kg/día] :	33
Ejemplar 5	Raza :	Holstein	Perímetro Torácico [cm] :	262	Peso Vivo Estimado [kg] :	595	Deposición Estimada [kg/día] :	39
Ejemplar 6	Raza :	Holstein	Perímetro Torácico [cm] :	270	Peso Vivo Estimado [kg] :	621	Deposición Estimada [kg/día] :	40

GANADERÍA 2													
Nombre		:	Ganadería "Luis Pineda"										
Acompaña		:	Amílcar Valdivieso (Director Distrital Agua Caliente)										
Ejemplar 7	Raza	:	Holstein	Perímetro Torácico [cm]	:	260	Peso Vivo Estimado [kg]	:	589	Deposición Estimada [kg/día]	:	38	
Ejemplar 8	Raza	:	Holstein	Perímetro Torácico [cm]	:	240	Peso Vivo Estimado [kg]	:	524	Deposición Estimada [kg/día]	:	34	
Ejemplar 9	Raza	:	Holstein	Perímetro Torácico [cm]	:	270	Peso Vivo Estimado [kg]	:	621	Deposición Estimada [kg/día]	:	40	
Ejemplar 10	Raza	:	Holstein	Perímetro Torácico [cm]	:	270	Peso Vivo Estimado [kg]	:	621	Deposición Estimada [kg/día]	:	40	
PESO PROMEDIO [kg]									:	559	DEPOSICIÓN PROMEDIO [kg/día]	:	36

Muestra recuperada : 3 kg

GANADERÍA 3													
Nombre		:	Ganadería "Ángel Guevara"										
Acompaña		:	Amílcar Valdivieso (Director Distrital Agua Caliente)										
Ejemplar 1	Raza	:	Holstein	Perímetro Torácico [cm]	:	210	Peso Vivo Estimado [kg]	:	427	Deposición Estimada [kg/día]	:	28	
Ejemplar 2	Raza	:	Holstein	Perímetro Torácico [cm]	:	220	Peso Vivo Estimado [kg]	:	459	Deposición Estimada [kg/día]	:	30	
Ejemplar 3	Raza	:	Holstein	Perímetro Torácico [cm]	:	220	Peso Vivo Estimado [kg]	:	459	Deposición Estimada [kg/día]	:	30	
Ejemplar 4	Raza	:	Holstein	Perímetro Torácico [cm]	:	235	Peso Vivo Estimado [kg]	:	508	Deposición Estimada [kg/día]	:	33	
Ejemplar 5	Raza	:	Holstein	Perímetro Torácico [cm]	:	230	Peso Vivo Estimado [kg]	:	492	Deposición Estimada [kg/día]	:	32	
PESO PROMEDIO [kg]									:	469	DEPOSICIÓN PROMEDIO [kg/día]	:	30

Muestra recuperada : 3 kg



Imagen Anexo 1. Tallaje de animales in situ para determinación de peso por correlación fenotípica.

B. ANEXO 2: CÁLCULO DE HUMEDADES DE MUESTRAS DE EXCRETAS.

El porcentaje de humedad se calcula como sigue:

$$w=100*(h-s)/(h-T)$$

Donde: w = Porcentaje de humedad [%]
 h = Masa de muestra húmeda [g]
 s = Masa de muestra seca [g]
 T = Masa de tara [g]

GANADERÍA 1												
Nombre		:	Ganadería "El Paraíso"									
Fecha Inicio		:	12/12/24									
Fecha Fin		:	13/12/24									
Porción 1	Tara [g]	:	17	Húmedo [g]	:	487	Seco [g]	:	262	Humedad (%)	:	48%
Porción 2	Tara [g]	:	16	Húmedo [g]	:	480	Seco [g]	:	255	Humedad (%)	:	48%
										Promedio (%)	:	48%

GANADERÍA 2												
Nombre		:	Ganadería "Luis Pineda"									
Fecha Inicio		:	26/12/24									
Fecha Fin		:	27/12/24									
Porción 1	Tara [g]	:	16	Húmedo [g]	:	604	Seco [g]	:	331	Humedad (%)	:	46%
Porción 2	Tara [g]	:	16	Húmedo [g]	:	600	Seco [g]	:	340	Humedad (%)	:	45%
									Promedio (%)	:	45%	

GANADERÍA 3												
Nombre		:	Ganadería "Ángel Guevara"									
Fecha Inicio		:	27/12/24									
Fecha Fin		:	28/12/24									
Porción 1	Tara [g]	:	16	Húmedo [g]	:	528	Seco [g]	:	258	Humedad (%)	:	53%
Porción 2	Tara [g]	:	16	Húmedo [g]	:	530	Seco [g]	:	261	Humedad (%)	:	52%
										Promedio (%)	:	53%

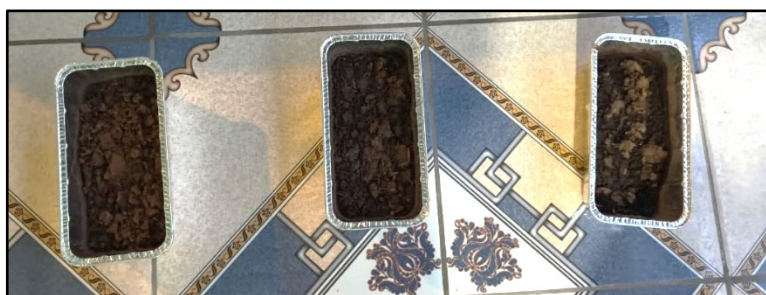


Imagen Anexo 2. Muestras de excretas para determinación de humedad.

C. ANEXO 3: ANÁLISIS DE COSTOS UNITARIOS.

a. TRAZO DE ÁREAS

[R] Rendimiento medio esperado: 200m²/día.

MANO DE OBRA			
FUNCIÓN	CANTIDAD	SALARIO DIA	SUB TOTAL
[A] Maestro de obra	1	\$ 30.00	\$ 30.00
[B] Auxiliar	2	\$ 15.00	\$ 30.00
[C] Costo Mano de Obra / día [A+B]			\$ 60.00
Costo Mano de Obra / m ² [C ÷ R]			\$ 0.30

MATERIALES Y HERRAMIENTAS				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Cal	1	SG/m ²	\$ 0.05	\$ 0.05
[B] Pintura aerosol	1	SG/m ²	\$ 0.10	\$ 0.10
[C] Nylon	1	SG/m ²	\$ 0.05	\$ 0.05
[D] Estacas	1	SG/m ²	\$ 0.10	\$ 0.10
[E] Costos materiales / m ² [A+B+C+D]				\$ 0.30
[F] Costo herramientas / m ² (5%) [E x 0.05]				\$ 0.02
Costo materiales y herramientas / m ² [E + F]				\$ 0.32

TRAZO DE ÁREAS	
DESCRIPCIÓN	COSTO
[A] Mano de obra	\$ 0.30
[B] Materiales y herramientas	\$ 0.32
Costo / m ² [A+B]	\$ 0.62

b. EXCAVACIÓN MATERIAL SEMIDURO EMPLEANDO RETROEXCAVADORA. INCLUYE COSTO DE MAQUINARIA, OPERADOR Y COMBUSTIBLE.

[R] Rendimiento medio esperado: 10m³/h

MANO DE OBRA			
FUNCIÓN	CANTIDAD	SALARIO DIA	SUB TOTAL
[A] Operador	1	\$ 20.00	\$ 20.00
[B] Costo Mano de Obra / día			\$ 20.00
[C] Costo Mano de Obra / hora [B ÷ 8]			\$ 2.50
Costo Mano de Obra / m ³			\$ 0.25

[C ÷ R]				
EQUIPOS Y COMBUSTIBLE				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Retroexcavadora	1	Hora	\$ 50.00	\$ 50.00
[B] Diesel	10	Galón/Hora	\$ 4.00	\$ 40.00
[C] Costos equipo y combustible / h [A+B]				\$ 90.00
Costo equipo y combustible/m³ [C ÷ R]				\$ 9.00

EXCAVACIÓN MATERIAL SEMIDURO EMPLEANDO RETROEXCAVADORA. INCLUYE COSTO DE MAQUINARIA, OPERADOR Y COMBUSTIBLE.	
DESCRIPCIÓN	COSTO
[A] Mano de obra	\$ 0.25
[B] Equipo y combustible	\$ 9.00
Costo / m³ [A+B]	\$ 9.25

c. DESALOJO DE MATERIAL EXCAVADO. INCLUYE CARGA EN CAMIÓN DE VOLTEO USANDO RETROEXCAVADORA Y TRANSPORTE EN UNA DISTANCIA MÁXIMA DE 5KM.

[R] Rendimiento medio esperado: 200m³/día

MANO DE OBRA			
FUNCIÓN	CANTIDAD	SALARIO DIA	SUB TOTAL
[A] Operador	1	\$ 20.00	\$ 20.00
[B] Motorista	2	\$ 20.00	\$ 40.00
[C] Costo Mano de Obra / día [A+B]			\$ 60.00
Costo Mano de Obra / m³ [C ÷ R]			\$ 0.30

EQUIPOS Y COMBUSTIBLE CARGA				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Retroexcavadora	1	Hora	\$ 50.00	\$ 50.00
[B] Diesel	10	Galón/Hora	\$ 4.00	\$ 40.00
[C] Costos equipo y combustible carga / h [A+B]				\$ 90.00
Costo equipos y combustible carga / m³ [Cx8 ÷ R]				\$ 3.60

EQUIPOS Y COMBUSTIBLE TRANSPORTE				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Camión	2	Unidad/día	\$ 150.00	\$ 300.00
[B] Diesel	60	Galón/ día	\$ 4.00	\$ 240.00
[C] Costos equipo y combustible / día [A+B]				\$ 540.00
Costo equipo y combustible/m ³ [C ÷ R]				\$ 2.70

DESALOJO DE MATERIAL EXCAVADO. INCLUYE CARGA EN CAMIÓN DE VOLTEO USANDO RETROEXCAVADORA Y TRANSPORTE EN UNA DISTANCIA MÁXIMA DE 5KM.	
DESCRIPCIÓN	COSTO
[A] Mano de obra	\$ 0.30
[B] Equipo y combustible carga	\$ 3.60
[C] Equipo y combustible carga	\$ 2.70
Costo / m ³ [A+B]	\$ 6.60

d. COMPACTACIÓN DE SUELO-CEMENTO 1:20 AL 95% DE PESO VOLUMÉTRICO SECO MÁXIMO DETERMINADO SEGÚN ASTM D1557.

R] Rendimiento medio esperado: 5m³/día.

MANO DE OBRA			
FUNCIÓN	CANTIDAD	SALARIO DIA	SUB TOTAL
[A] Auxiliar	2	\$ 15.00	\$ 30.00
[C] Costo Mano de Obra / día			\$ 30.00
Costo Mano de Obra / m ³ [C ÷ R]			\$ 6.00

EQUIPOS Y COMBUSTIBLE				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Vibro-compactadora	1	Día	\$ 25.00	\$ 25.00
[B] Carretilla	1	SG/Día	\$ 2.50	\$ 2.50
[C] Gasolina	2	Galón/Día	\$ 4.50	\$ 9.00
[D] Costos equipo y combustible carga / h [A+B+C]				\$ 36.50
Costo equipos y combustible carga /m ³ [D ÷ R]				\$ 7.30

MATERIALES				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Suelo abundamiento 10%	5.5	Unidad/día	\$ 7.00	\$ 38.50
[B] Cemento	7	Sacos/ día	\$ 9.00	\$ 63.00
[C] Costos materiales / día [A+B]				\$ 101.50
Costo equipo y combustible/m ³ [C ÷ R]				\$ 20.30

COMPACTACIÓN DE SUELO-CEMENTO 1:20 AL 95% DE PESO VOLUMÉTRICO SECO MÁXIMO DETERMINADO SEGÚN ASTM D1557.	
DESCRIPCIÓN	COSTO
[A] Mano de obra	\$ 6.00
[B] Equipo y combustible	\$ 7.30
[C] Materiales	\$ 20.30
Costo / m ³ [A+B]	\$ 33.60

e. LOSA DE CIMENTACIÓN DE 20CM DE ESPESOR CONCRETO F'C=210KG/CM2, ACERO CORRUGADO F'Y=4,200KG/CM2 NO. 3 @ 20CM AMBOS SENTIDOS.

R] Rendimiento medio esperado: 10m²/día.

MANO DE OBRA			
FUNCIÓN	CANTIDAD	SALARIO DIA	SUB TOTAL
[A] Albañil	1	\$ 25.00	\$ 25.00
[B] Auxiliar	3	\$ 15.00	\$ 45.00
[C] Costo Mano de Obra / día [A+B]			\$ 70.00
Costo Mano de Obra / m ² [C ÷ R]			\$ 7.00

EQUIPOS Y COMBUSTIBLE				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Vibrador de concreto	1	Día	\$ 25.00	\$ 25.00
[B] Carretilla	1	SG/Día	\$ 2.50	\$ 2.50
[C] Gasolina	1	Galón/Día	\$ 4.50	\$ 4.50
[D] Herramientas varias	1	SG/Día	\$ 5.00	\$ 5.00
[E] Costos equipo y combustible / día [A+B+C+D]				\$ 37.00
Costo equipos y combustible /m ² [E ÷ R]				\$ 3.70

MATERIALES				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Concreto premezclado	0.20	m ³ /m ²	\$ 150.00	\$ 30.00
[B] Acero No. 3	10	m/m ²	\$ 0.65	\$ 65.00
[C] Alambre	1	SG/m ²	\$ 0.25	\$ 0.25
[D] Costo bruto de materiales / m ² [A+B+C]				\$ 95.25
[E] Costo desperdicios (5%) [D x 0.05]				\$ 4.76
Costos materiales / m ² [D+E]				\$ 100.01

LOSA DE CIMENTACIÓN DE 20CM DE ESPESOR CONCRETO F'C=210KG/CM2, ACERO CORRUGADO F'Y=4,200KG/CM2 NO. 3 @ 20CM AMBOS SENTIDOS.	
DESCRIPCIÓN	COSTO
[A] Mano de obra	\$ 7.00
[B] Equipo y combustible	\$ 3.70
[C] Materiales	\$ 100.01
Costo / m ² [A+B+C]	\$ 111.71

f. TOPPING DE NIVELACIÓN CON CONCRETO F'C=210KG/CM2 DESDE H=0CM HASTA H=10CM CON LONGITUD DE 5.10M.

[R] Rendimiento medio esperado: 50m/día.

MANO DE OBRA			
FUNCIÓN	CANTIDAD	SALARIO DÍA	SUB TOTAL
[A] Albañil	1	\$ 25.00	\$ 25.00
[B] Auxiliar	3	\$ 15.00	\$ 45.00
[C] Costo Mano de Obra / día [A+B]			\$ 70.00
Costo Mano de Obra / m [C ÷ R]			\$ 1.40

EQUIPOS Y COMBUSTIBLE				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Vibrador de concreto	1	Día	\$ 25.00	\$ 25.00
[B] Carretilla	1	SG/Día	\$ 2.50	\$ 2.50
[C] Gasolina	1	Galón/Día	\$ 4.50	\$ 4.50
[D] Herramientas varias	1	SG/Día	\$ 5.00	\$ 5.00
[E] Costos equipo y combustible / día [A+B+C+D]				\$ 37.00
Costo equipos y combustible / m [E ÷ R]				\$ 0.74

MATERIALES				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Concreto premezclado	0.26	m ³ /m	\$ 150.00	\$ 39.00
[B] Costo bruto de materiales / m				\$ 39.00
[C] Costo desperdicios (5%) [B x 0.05]				\$ 1.95
Costos materiales / m [B+C]				\$ 40.95

TOPPING DE NIVELACIÓN CON CONCRETO F'C=210KG/CM2 DESDE H=0CM HASTA H=10CM CON LONGITUD DE 5.10M.	
DESCRIPCIÓN	COSTO
[A] Mano de obra	\$ 1.40
[B] Equipo y combustible	\$ 0.74
[C] Materiales	\$ 40.95
Costo / m [A+B+C]	\$ 43.09

g. TOPPING DE NIVELACIÓN CON CONCRETO F'C=210KG/CM2 DESDE H=0CM HASTA H=10CM CON LONGITUD DE 9.10M.

[R] Rendimiento medio esperado: 40m/día.

MANO DE OBRA			
FUNCIÓN	CANTIDAD	SALARIO DIA	SUB TOTAL
[A] Albañil	1	\$ 25.00	\$ 25.00
[B] Auxiliar	3	\$ 15.00	\$ 45.00
[C] Costo Mano de Obra / día [A+B]			\$ 70.00
Costo Mano de Obra / m [C ÷ R]			\$ 1.75

EQUIPOS Y COMBUSTIBLE				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Vibrador de concreto	1	Día	\$ 25.00	\$ 25.00
[B] Carretilla	1	SG/Día	\$ 2.50	\$ 2.50
[C] Gasolina	1	Galón/Día	\$ 4.50	\$ 4.50
[D] Herramientas varias	1	SG/Día	\$ 5.00	\$ 5.00
[E] Costos equipo y combustible / día [A+B+C+D]				\$ 37.00
Costo equipos y combustible / m [E ÷ R]				\$ 0.92

MATERIALES				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Concreto premezclado	0.46	m ³ /m	\$ 150.00	\$ 69.00
[B] Costo bruto de materiales / m				\$ 69.00
[C] Costo desperdicios (5%) [B x 0.05]				\$ 3.45
Costos materiales / m [B+C]				\$ 72.45

TOPPING DE NIVELACIÓN CON CONCRETO F'C=210KG/CM2 DESDE H=0CM HASTA H=10CM CON LONGITUD DE 9.10M.	
DESCRIPCIÓN	COSTO
[A] Mano de obra	\$ 1.75
[B] Equipo y combustible	\$ 0.92
[C] Materiales	\$ 72.45
Costo / m [A+B+C]	\$ 75.12

- h. PARED BLOCK DE CONCRETO DE 15CM. BLOCK SOLERA @40CM CON REFUERZO LONGITUDINAL 1 BARRA ACERO CORRUGADO F'Y=4,200KG/CM2 NO. 3. REFUERZO VERTICAL 1 BARRA ACERO CORRUGADO F'Y=4,200KG/CM2 NO. 3 @40CM LLENADO CELDAS CON CONCRETO FLUIDO F'C=150KG/CM2.

[R] Rendimiento medio esperado: 6m²/día.

MANO DE OBRA			
FUNCIÓN	CANTIDAD	SALARIO DIA	SUB TOTAL
[A] Albañil	1	\$ 25.00	\$ 25.00
[B] Auxiliar	1	\$ 15.00	\$ 15.00
[C] Costo Mano de Obra / día [A+B]			\$ 40.00
Costo Mano de Obra / m ² [C ÷ R]			\$ 6.67

EQUIPOS				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Herramientas varias	1	SG/Día	\$ 5.00	\$ 5.00
Costo equipos/m ² [A ÷ R]				\$ 0.83

MATERIALES				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Block 15x20x40	10	U/m ²	\$ 0.65	\$ 6.50
[B] Block solera 15x20x40	2.5	U/m ²	\$ 0.75	\$ 1.88
[C] Acero No. 3	4	m/m ²	\$ 0.65	\$ 2.60
[D] Alambre	1	SG/m ²	\$ 0.25	\$ 0.25
[E] Mortero	0.02	m ³ /m ²	\$ 100.00	\$ 2.00
[F] Concreto Fluido	0.06	m ³ /m ²	\$ 100.00	\$ 6.00
[G] Costo bruto de materiales / m [A+B+C+D+E+F]				\$ 19.23
[H] Costo desperdicios (5%) [G x 0.05]				\$ 0.96
Costos materiales / m ² [G+H]				\$ 20.19

PARED BLOCK DE CONCRETO DE 15CM. BLOCK SOLERA @40CM CON REFUERZO LONGITUDINAL 1 BARRA ACERO CORRUGADO F'Y=4,200KG/CM2 NO. 3. REFUERZO VERTICAL 1 BARRA ACERO CORRUGADO F'Y=4,200KG/CM2 NO. 3 @40CM LLENADO CELDAS CON CONCRETO FLUIDO F'C=150KG/CM2.	
DESCRIPCIÓN	COSTO
[A] Mano de obra	\$ 6.67
[B] Equipo	\$ 0.83
[C] Materiales	\$ 20.19
Costo / m ² [A+B+C]	\$ 27.69

- i. PARED BLOCK DE CONCRETO DE 20CM. BLOCK SOLERA @40CM CON REFUERZO LONGITUDINAL 1 BARRA ACERO CORRUGADO F'Y=4,200KG/CM2 NO. 3. REFUERZO VERTICAL 1 BARRA ACERO CORRUGADO F'Y=4,200KG/CM2 NO. 3 @40CM LLENADO CELDAS CON CONCRETO FLUIDO F'C=150KG/CM2.

[R] Rendimiento medio esperado: 10m²/día.

MANO DE OBRA			
FUNCIÓN	CANTIDAD	SALARIO DIA	SUB TOTAL
[A] Albañil	1	\$ 25.00	\$ 25.00
[B] Auxiliar	1	\$ 15.00	\$ 15.00
[C] Costo Mano de Obra / día [A+B]			\$ 40.00
Costo Mano de Obra / m ² [C ÷ R]			\$ 10.00

EQUIPOS				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Herramientas varias	1	SG/Día	\$ 5.00	\$ 5.00
Costo equipos/m ² [A ÷ R]				\$ 1.25

MATERIALES				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Block 20x20x40	10	U/m ²	\$ 0.90	\$ 9.00
[B] Block solera 20x20x40	2.5	U/m ²	\$ 1.16	\$ 2.90
[C] Acero No. 3	4	m/m ²	\$ 0.65	\$ 2.60
[D] Alambre	1	SG/m ²	\$ 0.25	\$ 0.25
[E] Mortero	0.07	m ³ /m ²	\$ 100.00	\$ 7.00
[F] Concreto Fluido	0.09	m ³ /m ²	\$ 100.00	\$ 9.00
[G] Costo bruto de materiales / m [A+B+C+D+E+F]				\$ 30.75
[H] Costo desperdicios (5%) [G x 0.05]				\$ 1.53
Costos materiales / m ² [G+H]				\$ 32.28

PARED BLOCK DE CONCRETO DE 20CM. BLOCK SOLERA @40CM CON REFUERZO LONGITUDINAL 1 BARRA ACERO CORRUGADO F'Y=4,200KG/CM2 NO. 3. REFUERZO VERTICAL 1 BARRA ACERO CORRUGADO F'Y=4,200KG/CM2 NO. 3 @40CM LLENADO CELDAS CON CONCRETO FLUIDO F'C=150KG/CM2.	
DESCRIPCIÓN	COSTO
[A] Mano de obra	\$ 10.00
[B] Equipo	\$ 1.25
[C] Materiales	\$ 32.28
Costo / m ² [A+B+C]	\$ 43.53

j. REPELLO Y AFINADO DE PAREDES.

[R] Rendimiento medio esperado: 10m²/día.

MANO DE OBRA			
FUNCIÓN	CANTIDAD	SALARIO DIA	SUB TOTAL
[A] Albañil	1	\$ 25.00	\$ 25.00
[B] Auxiliar	1	\$ 15.00	\$ 15.00
[C] Costo Mano de Obra / día [A+B]			\$ 40.00
Costo Mano de Obra / m ² [C ÷ R]			\$ 4.00

EQUIPOS				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Herramientas varias	1	SG/Día	\$ 5.00	\$ 5.00
Costo equipos/m ² [A ÷ R]				\$ 0.50

MATERIALES				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Mortero para repello	0.01	m ³ /m ²	\$ 130.00	\$ 1.30
[B] Costo bruto de materiales / m				\$ 1.30
[H] Costo desperdicios (5%) [B x 0.05]				\$ 0.07
Costos materiales / m ² [G+H]				\$ 1.37

REPELLO Y AFINADO DE PAREDES.	
DESCRIPCIÓN	COSTO
[A] Mano de obra	\$ 4.00
[B] Equipo	\$ 0.50
[C] Materiales	\$ 1.37
Costo / m ² [A+B+C]	\$ 5.87

k. APLICACIÓN DE IMPERMEABILIZANTE EPOXICO.

[R] Rendimiento medio esperado: 20m²/día.

MANO DE OBRA			
FUNCIÓN	CANTIDAD	SALARIO DIA	SUB TOTAL
[A] Auxiliar	2	\$ 15.00	\$ 30.00
[B] Costo Mano de Obra / día			\$ 30.00
Costo Mano de Obra / m ² [B ÷ R]			\$ 1.50

EQUIPOS				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Instrumentos para pintura	1	SG/Día	\$ 10.00	\$ 10.00
Costo equipos/m ² [A ÷ R]				\$ 0.50

MATERIALES				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Impermeabilizante epóxico	0.04	galón /m ²	\$ 40.00	\$ 1.60
[B] Costo bruto de materiales / m ²				\$ 1.60
[C] Costo solventes (10%) [B x 0.10]				\$ 0.16
Costos materiales / m [G+H]				\$ 1.76

REPELLO Y AFINADO DE PAREDES.	
DESCRIPCIÓN	COSTO
[A] Mano de obra	\$ 1.50
[B] Equipo	\$ 0.50
[C] Materiales	\$ 1.76
Costo / m ² [A+B+C]	\$ 3.76

I. GEOMEMBRANA DE POLIPROPILENO 40MILS (1.0MM) ALTA RESISTENCIA UNIONES TERMOFUSIONADAS

[R] Rendimiento medio esperado: 50m²/día.

MANO DE OBRA			
FUNCIÓN	CANTIDAD	SALARIO DIA	SUB TOTAL
[A] Técnico Instalador	1	\$ 30.00	\$ 30.00
[B] Auxiliar	2	\$ 15.00	\$ 30.00
[C] Costo Mano de Obra / día [A+B]			\$ 60.00
Costo Mano de Obra / m ² [B ÷ R]			\$ 1.20

EQUIPOS				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Equipos de corte y termofusión	1	SG/Día	\$ 150.00	\$ 150.00
Costo equipos/m ² [A ÷ R]				\$ 3.00

MATERIALES				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Geomembrana	1	m ²	\$ 50.00	\$ 50.00
[B] Costo bruto de materiales / m ²				\$ 50.00
[C] Costo desperdicios (10%)				\$ 5.00

	[B x 0.10]	
Costos materiales / m [G+H]		\$ 55.00

GEOMEMBRANA DE POLIPROPILENO 40MILS (1.0MM) ALTA RESISTENCIA UNIONES TERMOFUSIONADAS	
DESCRIPCIÓN	COSTO
[A] Mano de obra	\$ 1.20
[B] Equipo	\$ 3.00
[C] Materiales	\$ 55.00
Costo / m ² [A+B+C]	\$ 59.20

m. BOMBA DE 1HP PARA IMPULSIÓN DE AGUAS NEGRAS. INCLUYE INSTALACIÓN ELECTRICA PARA 220V MONOFÁSICA.

Costos por suma global (SG).

MANO DE OBRA			
FUNCIÓN	CANTIDAD	SALARIO	SUB TOTAL
[A] Electricista	1	\$ 200.00	\$ 200.00
[B] Auxiliar eléctrico	1	\$ 100.00	\$ 100.00
Costo Mano de Obra [A+B]			\$ 300.00

EQUIPOS				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Equipos y herramientas	1	SG	\$ 50.00	\$ 50.00
Costo equipos				\$ 50.00

MATERIALES				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] BOMBA CAMPANA 1 HP 208/240V PARA AGUAS NEGRAS MONOFASICA	1	U	\$ 1,500.00	\$ 1,500.00
[B] Costo bruto				\$ 1,500.00
[C] Costo accesorios y material complementario (10%) [B x 0.10]				\$ 150.00
Costos materiales [G+H]				\$ 1,650.00

BOMBA DE 1HP PARA IMPULSIÓN DE AGUAS NEGRAS. INCLUYE INSTALACIÓN ELECTRICA PARA 220V MONOFÁSICA.	
DESCRIPCIÓN	COSTO
[A] Mano de obra	\$ 300.00
[B] Equipo	\$ 50.00
[C] Materiales	\$ 1,650.00
Costo [A+B+C]	\$ 2,000.00

n. BOMBA DE 2HP PARA IMPULSIÓN DE AGUAS NEGRAS. INCLUYE INSTALACIÓN ELECTRICA PARA 220V MONOFÁSICA.

Costos por suma global (SG).

MANO DE OBRA			
FUNCIÓN	CANTIDAD	SALARIO	SUB TOTAL
[A] Electricista	1	\$ 200.00	\$ 200.00
[B] Auxiliar eléctrico	1	\$ 100.00	\$ 100.00
Costo Mano de Obra [A+B]			\$ 300.00

EQUIPOS				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Equipos y herramientas	1	SG	\$ 50.00	\$ 50.00
Costo equipos				\$ 50.00

MATERIALES				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] BOMBA CAMPANA 2 HP 208/240V PARA AGUAS NEGRAS MONOFASICA	1	U	\$ 1,500.00	\$ 2,000.00
[B] Costo bruto				\$ 2,000.00
[C] Costo accesorios y material complementario (10%) [B x 0.10]				\$ 200.00
Costos materiales [G+H]				\$ 2,200.00

BOMBA DE 2HP PARA IMPULSIÓN DE AGUAS NEGRAS. INCLUYE INSTALACIÓN ELECTRICA PARA 220V MONOFÁSICA.	
DESCRIPCIÓN	COSTO
[A] Mano de obra	\$ 300.00
[B] Equipo	\$ 50.00
[C] Materiales	\$ 2,200.00
Costo [A+B+C]	\$ 2,550.00

o. FILTRO PARA H2S DE FABRICACIÓN ARTESANAL. TUBERÍA PVC RELLENA DE LANA DE ACERO.

Costos por suma global (SG).

MANO DE OBRA			
FUNCIÓN	CANTIDAD	SALARIO	SUB TOTAL
[A] Auxiliar	0.25	\$ 15.00	\$ 3.75
Costo Mano de Obra			\$ 3.75

EQUIPOS				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Equipos y herramientas	1	SG	\$ 2.00	\$ 2.00
Costo equipos				\$ 2.00

MATERIALES				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Tubo PVC 100mm 100PSI	0.40	m	\$ 4.16	\$ 1.66
[B] Bushin reductor de 100mm a 50mm.	2	U	\$ 5.65	\$ 11.30
[C] Conector hembra roscado 50mm	1	U	\$ 3.60	\$ 3.60
[D] Conector macho roscado 50mm	1	U	\$ 3.60	\$ 3.60
[E] Lana de acero	1	kg	\$ 20.00	\$ 20.00
[F] Pegamento PVC	1	SG	\$ 1.00	\$ 1.00
Costos materiales [A+B+C+D+E+F]				\$ 41.16

FILTRO PARA H2S DE FABRICACIÓN ARTESANAL. TUBERÍA PVC RELLENA DE LANA DE ACERO.	
DESCRIPCIÓN	COSTO
[A] Mano de obra	\$ 3.75
[B] Equipo	\$ 2.00
[C] Materiales	\$ 41.16
Costo [A+B+C]	\$ 46.91

- p. ANTORCHA PARA QUEMADO DE EXCEDENTES FABRICADA CON TUBERÍA DE PVC 50MM Y TERMINAL CON 1.50M DE TUBERÍA DE HIERRO GALVANIZADO DE 50MM. SOPORTE ESTRUCTURAL CON TUBO ESTRUCTURAL CUADRADO DE 50MM DESDE LA BASE.

Costos por suma global (SG).

MANO DE OBRA			
FUNCIÓN	CANTIDAD	SALARIO	SUB TOTAL
[A] Soldador	1	\$ 20.00	\$ 20.00
[A] Auxiliar	1	\$ 15.00	\$ 15.00
Costo Mano de Obra			\$ 35.00

EQUIPOS				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Equipos y herramientas	1	SG	\$ 5.00	\$ 5.00
Costo equipos				\$ 5.00

MATERIALES				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Tubo PVC 100mm	2.50	m	\$ 1.15	\$ 2.88
[B] Tubo hierro galvanizado	1.50	m	\$ 12.25	\$ 18.38
[C] Tubo estructural cuadrado 50mm	3.65	m	\$ 4.50	\$ 16.43
[D] Costo bruto de materiales				\$ 37.69
[E] Costo accesorios (20%) [D x 0.20]				\$ 7.54
Costos materiales [D+E]				\$ 45.23

ANTORCHA PARA QUEMADO DE EXCEDENTES FABRICADA CON TUBERÍA DE PVC 50MM Y TERMINAL CON 1.50M DE TUBERÍA DE HIERRO GALVANIZADO DE 50MM. SOPORTE ESTRUCTURAL CON TUBO ESTRUCTURAL CUADRADO DE 50MM DESDE LA BASE	
DESCRIPCIÓN	COSTO
[A] Mano de obra	\$ 35.00
[B] Equipo	\$ 5.00
[C] Materiales	\$ 45.23
Costo [A+B+C]	\$ 85.23

q. INSTALACIÓN DE TUBERÍA PVC DE 50MM. INCLUYE ACCESORIOS (20%)

[R] Rendimiento medio esperado: 30m/día.

MANO DE OBRA			
FUNCIÓN	CANTIDAD	SALARIO DIA	SUB TOTAL
[A] Fontanero	1	\$ 25.00	\$ 25.00
[B] Auxiliar	1	\$ 15.00	\$ 15.00
[C] Costo Mano de Obra / día [A+B]			\$ 40.00
Costo Mano de Obra / m² [B ÷ R]			\$ 1.33

EQUIPOS				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Herramientas varias	1	SG/Día	\$ 5.00	\$ 5.00
Costo equipos/m [A ÷ R]				\$ 0.17

MATERIALES				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Tubo PVC 50mm 100PSI	1	m	\$ 1.08	\$ 1.08
[B] Costo bruto de materiales				\$ 1.08
[C] Costo desperdicios (20%) [B x 0.20]				\$ 0.22
Costos materiales / m [G+H]				\$ 1.30

INSTALACIÓN DE TUBERÍA PVC DE 50MM. INCLUYE ACCESORIOS (20%)	
DESCRIPCIÓN	COSTO/m ²
[A] Mano de obra	\$ 1.33
[B] Equipo	\$ 0.17
[C] Materiales	\$ 1.30
Costo / m²	\$ 2.80

[A+B+C]

r. INSTALACIÓN DE TUBERÍA PVC DE 100MM. INCLUYE ACCESORIOS (20%)

[R] Rendimiento medio esperado: 30m/día.

MANO DE OBRA			
FUNCIÓN	CANTIDAD	SALARIO DIA	SUB TOTAL
[A] Fontanero	1	\$ 25.00	\$ 25.00
[B] Auxiliar	1	\$ 15.00	\$ 15.00
[C] Costo Mano de Obra / día [A+B]			\$ 40.00
Costo Mano de Obra / m ² [B ÷ R]			\$ 1.33

EQUIPOS				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Herramientas varias	1	SG/Día	\$ 5.00	\$ 5.00
Costo equipos/m [A ÷ R]				\$ 0.17

MATERIALES				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Tubo PVC 100mm 100PSI	1	m	\$ 4.16	\$ 4.16
[B] Costo bruto de materiales				\$ 4.16
[C] Costo desperdicios (20%) [B x 0.20]				\$ 0.83
Costos materiales / m [G+H]				\$ 4.99

INSTALACIÓN DE TUBERÍA PVC DE 100MM. INCLUYE ACCESORIOS (20%)	
DESCRIPCIÓN	COSTO/m ²
[A] Mano de obra	\$ 1.33
[B] Equipo	\$ 0.17
[C] Materiales	\$ 4.99
Costo / m ² [A+B+C]	\$ 6.49

s. INSTALACIÓN DE TUBERÍA PVC DE 150MM. INCLUYE ACCESORIOS (20%)

[R] Rendimiento medio esperado: 30m/día.

MANO DE OBRA			
FUNCIÓN	CANTIDAD	SALARIO DIA	SUB TOTAL
[A] Fontanero	1	\$ 25.00	\$ 25.00
[B] Auxiliar	1	\$ 15.00	\$ 15.00
[C] Costo Mano de Obra / día [A+B]			\$ 40.00
Costo Mano de Obra / m ² [B÷ R]			\$ 1.33

EQUIPOS				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Herramientas varias	1	SG/Día	\$ 5.00	\$ 5.00
Costo equipos/m [A÷ R]				\$ 0.17

MATERIALES				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Tubo PVC 100mm 100PSI	1	m	\$ 8.67	\$ 8.67
[B] Costo bruto de materiales				\$ 8.67
[C] Costo desperdicios (20%) [B x 0.20]				\$ 1.73
Costos materiales / m [G+H]				\$ 10.40

INSTALACIÓN DE TUBERÍA PVC DE 150MM. INCLUYE ACCESORIOS (20%)	
DESCRIPCIÓN	COSTO
[A] Mano de obra	\$ 1.33
[B] Equipo	\$ 0.17
[C] Materiales	\$ 10.40
Costo / m ² [A+B+C]	\$ 11.90

t. FILTRO LÁMINA DESPLEGADA 1/2 PULG. DE 1.0M X 1.0M. INCLUYE SOPORTES CON ÁNGULO ESTRUCTURAL PARA SU MONTAJE Y DESMONTAJE.

Costos por suma global (SG).

MANO DE OBRA			
FUNCIÓN	CANTIDAD	SALARIO DIA	SUB TOTAL
[A] Soldador	1	\$ 7.50	\$ 7.50
[B] Auxiliar	1	\$ 3.75	\$ 3.75
Costo Mano de Obra [A+B]			\$ 11.25

EQUIPOS				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Herramientas varias	1	SG	\$ 15.00	\$ 15.00
Costo equipos				\$ 15.00

MATERIALES				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	SUB TOTAL
[A] Lámina desplegada 1/2 pulg.	1	m ²	\$ 17.85	\$ 8.67
[B] Ángulo estructural	4	m	\$ 2.65	\$ 10.60
[B] Costo bruto de materiales				\$ 19.27
[C] Costo desperdicios (20%) [B x 0.20]				\$ 3.85
Costos materiales [G+H]				\$ 23.12

FILTRO LÁMINA DESPLEGADA 1/2 PULG. DE 1.0M X 1.0M. INCLUYE SOPORTES CON ÁNGULO ESTRUCTURAL PARA SU MONTAJE Y DESMONTAJE.	
DESCRIPCIÓN	COSTO
[A] Mano de obra	\$ 11.25
[B] Equipo	\$ 15.00
[C] Materiales	\$ 23.12
Costo [A+B+C]	\$ 49.37