



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES

INSTITUTO DE INGENIERÍA

“Diseño, dimensionamiento y análisis de factibilidad técnica de un sistema de biodigestión y tratamiento de biomasa proveniente de la actividad ganadera en la zona de Metepec, Hidalgo”

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera en Energías Renovables

P R E S E N T A

Gabriela Ruiz Rendón

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Sergio Alberto Gamboa Sánchez



IER
Instituto de Energías
Renovables



**INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM**

Temixco, Mor., a 28 de junio 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



OF/IER/LIER/097/2019
 ASUNTO: Notificación de jurado y
 fecha para examen profesional.

LIC. IVONNE RAMÍREZ WENCE
 DIRECTORA GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
 Presente.

Por medio de la presente le informo que el día viernes 28 de junio de 2019, a las 10:00 hrs., en el Instituto de Energías Renovables, la C. GABRIELA RUIZ RENDÓN, con número de cuenta 311312423 de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables, llevará a cabo la presentación del trabajo de tesis y examen profesional titulado:

“Diseño, dimensionamiento y análisis de factibilidad técnica de un sistema de biodigestión y tratamiento de biomasa proveniente de la actividad ganadera en la zona de Metepec, Hidalgo”

Debido a que la alumna ha cumplido con los requisitos que establece el Reglamento General de Exámenes, el Comité Académico de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables, le asigna el Jurado de Examen Profesional integrado por los siguientes académicos.

| | |
|-------------|---|
| PRESIDENTE: | DR. JORGE MARCIAL ISLAS SAMPERIO |
| VOCAL: | DR. ALBERTO ÁLVAREZ GALLEGOS |
| SECRETARIO: | DR. SERGIO ALBERTO GAMBOA SÁNCHEZ |
| SUPLENTE: | DR. MIGUEL ROBLES PÉREZ |
| SUPLENTE: | DRA. ADRIANA MARGARITA LONGORIA HERNÁNDEZ |

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

Atentamente,
 “Por mi raza hablará el espíritu”
 Temixco, Mor., a 18 de junio de 2019

Dr. Jorge Alejandro Wong Loya
 Coordinador Académico de la LIER
 IER-UNAM

IAW/1 mfn



AV. AZCAPOZALCO
 CP. 06700
 México, Distrito Federal, México
 T. 52 (0) 55 5623 40 00
 55 56 19 33 43 00

www.ier.unam.mx

DEDICATORIA

A todas las personas que estuvieron ahí durante este largo viaje, sobre todo a mis padres y hermanos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme permitido cursar mis estudios en la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables (LIER) y facilitarme las herramientas para concluirla en un lugar privilegiado que me llenó de maravillosas experiencias.

Agradezco al proyecto interno del grupo de trabajo del IER-UNAM, Presupuesto 606 “Combustibles limpios y eficiencia energética” dentro del cual se desarrolló este trabajo de investigación.

Al jurado de tesis: Dr. Jorge Maciel Islas Samperio, Dr. Alberto Álvarez Gallegos, Dr. Miguel Robles Pérez y la Dra. Adriana Margarita Longoria Hernández.

A mi tutor, maestro y consejero el Dr. Sergio Alberto Gamboa Sánchez, quien me acompañó, asesoró y guió mi trabajo siempre con una palabra amable, motivadora y llena de apoyo y confianza.

A todos mis profesores de la licenciatura, en especial al Dr. Mariano López de Haro, el Dr. J. Antonio del Río Portilla quienes me apoyaron para continuar mis estudios a través de una beca como ayudante de investigación. También a quienes me apoyaron durante la realización de este trabajo como la Dra. Genice Kirat Grande Acosta de la Coordinación de Planeación Energética que me asesoró en la parte financiera del proyecto.

A la comunidad del IER-UNAM que hizo de mi estancia en la LIER una travesía llena de compañerismo, amabilidad y aprendizaje.

A los profesores que marcaron mi vida académica y el rumbo de mis decisiones, en especial al profesor René Ramírez, Jorge Daniel Marroquín y Thelma Martínez.

A mis compañeros de generación y amigos con quienes formé una familia.

A mis amigos de toda la vida y familia, que siempre han creído en mí y en mi capacidad de lograr grandes cosas.

A mis padres y hermanos, su sacrificio, apoyo y amor han sido el pilar de mi vida.

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| LISTA DE FIGURAS..... | 9 |
| LISTA DE TABLAS..... | 11 |
| RESUMEN..... | 13 |
| INTRODUCCIÓN..... | 14 |
| Capítulo 1. ANTECEDENTES..... | 18 |
| 1.1 Justificación..... | 18 |
| 1.1.1. Cambio climático..... | 18 |
| 1.1.2 Gases de Efecto Invernadero..... | 18 |
| 1.1.3 Actividad ganadera..... | 19 |
| 1.1.4 Gestión de residuos..... | 21 |
| 1.1.5 Precio de combustibles convencionales..... | 22 |
| 1.1.6 Costo de fertilizantes..... | 23 |
| 1.1.7 Diversificación de la matriz energética..... | 23 |
| 1.1.8 Situación actual de la bioenergía..... | 24 |
| 1.2 Planteamiento del problema..... | 25 |
| 1.3 Objetivos del proyecto..... | 27 |
| Capítulo 2. MARCO TEÓRICO..... | 29 |
| 2.1 LA BIOENERGÍA..... | 29 |
| 2.2 BIOMASA..... | 29 |
| 2.3 BIODIGESTORES..... | 30 |
| 2.3.1 Principio de funcionamiento..... | 30 |
| 2.3.2 Factores que afectan el proceso de biodigestión..... | 32 |
| 2.3.2.2 Relación C/N..... | 33 |
| 2.3.3 Productos de la biodigestión..... | 39 |
| 2.3.4 Operación y componentes de un sistema de biodigestión..... | 45 |
| 2.3.5 Regulación de diseño y construcción..... | 54 |
| 2.3.6 Retos y oportunidades en la implementación de biodigestores..... | 57 |
| Capítulo 3. METODOLOGÍA Y DESARROLLO..... | 62 |
| 3.1 PARAMETROS DE DIMENSIONAMIENTO DE LA BIOMASA..... | 62 |
| 3.1.1 Peso y edad..... | 62 |

| | |
|--|-----------|
| 3.1.2 Tiempo de estación..... | 63 |
| 3.1.3 Tasa de excreción diaria | 63 |
| 3.1.4 Cantidad de estiércol generado al día | 66 |
| 3.1.5 Cantidad de estiércol disponible al día | 66 |
| 3.1.6 Producción de biogás por kg de excreta..... | 66 |
| 3.1.7 Relación Carbono/Nitrógeno..... | 68 |
| 3.1.8 Porcentaje de sólidos totales | 70 |
| 3.2 PARÁMETROS DE DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR | 71 |
| 3.2.1 Tiempo de Retención Hidráulica | 71 |
| 3.2.2 Número de animales/Especies vegetales disponibles | 71 |
| 3.2.3 Formulación | 71 |
| 3.2.4 Cantidad total diaria de biomasa/Carga total diaria | 72 |
| 3.2.5 Volumen total diario..... | 72 |
| 3.2.6 Flujo másico | 72 |
| 3.2.7 Carga durante el TRH | 73 |
| 3.2.8 Volumen durante el TRH | 73 |
| 3.2.9 Volumen teórico de biogás..... | 73 |
| 3.2.10 Volumen del biodigestor | 73 |
| 3.3 DIMENSIONAMIENTO DE LOS COMPONENTES ADICIONALES AL REACTOR..... | 73 |
| 3.3.1 Tanque de acondicionamiento | 73 |
| 3.3.2 Laguna de secado..... | 74 |
| 3.3.3 Tanque de almacenamiento de rastrojo | 74 |
| 3.3.4 Bomba de alimentación..... | 74 |
| 3.3.5 Sistema de agitación..... | 75 |
| 3.4 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO | 75 |
| 3.5 GENERACIÓN ENERGÉTICA | 78 |
| 3.6 BALANCE ENERGÉTICO | 78 |
| 3.7 MODELO DE CÁLCULO ECONÓMICO | 79 |
| 3.7.1 Cálculo de ahorro/venta de fertilizantes | 79 |
| 3.7.2 Cálculo de ahorro/servicio de tratamiento de aguas..... | 81 |
| 3.7.3 Cálculo de ahorro en electricidad..... | 82 |

| | |
|---|----|
| 3.7.4 Cálculo de ahorro en gas | 82 |
| 3.7.5 Calculo del sistema de calentamiento..... | 83 |
| 3.7.6 Escenarios de producción energética | 84 |
| 3.7.7 Periodo de evaluación | 85 |
| 3.7.8 Tasa de descuento nominal | 85 |
| 3.7.9 Tasa de inflación | 85 |
| 3.7.10 Tasa de descuento real | 85 |
| 3.7.11 Valor Presente Neto | 85 |
| 3.7.12 Valor Anual Equivalente | 86 |
| 3.7.13 Tasa Interna de Rendimiento | 86 |
| 3.7.14 Relación Beneficio-Costo | 87 |
| 3.7.15 Periodo de Recuperación de la Inversión..... | 87 |
| 3.8 CÁLCULO DE AHORRO EN EMISIONES DE CO ₂ | 87 |
| 3.9 DISEÑO DEL SISTEMA DE BIODIGESTIÓN | 88 |
| 3.9.1 Consideraciones para el Layout del sistema | 88 |
| Capítulo 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 89 |
| 4.1 PARÁMETROS DE DIMENSIONAMIENTO DE LA BIOMASA | 89 |
| 4.1.1 Relación Carbono/Nitrógeno..... | 89 |
| 4.1.2 Selección de la formulación..... | 89 |
| 4.1.3 Porcentaje de sólidos y cantidad de agua añadida | 90 |
| 4.2 PARÁMETROS DE DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR | 90 |
| 4.2.1 Tiempo de Retención Hidráulica | 90 |
| 4.2.2 Número de animales/Especies vegetales disponibles | 91 |
| 4.3 DIMENSIONAMIENTO DE LOS COMPONENTES ADICIONALES AL REACTOR..... | 92 |
| 4.4 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO | 92 |
| 4.5 GENERACIÓN ELÉCTRICA | 95 |
| 4.6 BALANCE ENERGÉTICO | 95 |
| 4.7 MODELO DE CÁLCULO ECONÓMICO | 96 |
| 4.7.1 Ahorro/Venta de fertilizantes | 96 |
| 4.7.2 Ahorro/Servicio de tratamiento de aguas..... | 96 |
| 4.7.3 Ahorro en electricidad | 96 |

| | |
|---|------------|
| 4.7.4 Ahorro en gas..... | 97 |
| 4.7.5 Costo del sistema de calentamiento | 97 |
| 4.7.6 Escenarios de producción energética | 97 |
| 4.8 AHORRO EN EMISIONES DE CO ₂ | 99 |
| 4.9 DISEÑO DEL SISTEMA DE BIODIGESTIÓN | 99 |
| CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS..... | 104 |
| REFERENCIAS..... | 106 |
| ANEXOS..... | 114 |
| ANEXO 1. CLIMATOLOGÍA DE METEPEC, HIDALGO. | 114 |
| ANEXO 2. CLASIFICACIÓN DE ESPECIES ANALIZADAS. | 119 |
| ANEXO 3. RESULTADOS | 126 |
| ANEXO 4. CORRIDA FINANCIERA | 130 |
| ANEXO 5. LAYOUT DEL SISTEMA | 134 |

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Participación por fuente de energía en el consumo mundial final, 2014

Figura 1.2 Generación de electricidad por fuente de energía 2015.

Figura 1.3 Inventario Nacional de Emisiones de GEIs 201

Figura 1.4 Precio histórico e importaciones de petróleo crudo en México 1976-2017.

Figura 1.5 Ubicación de Metepec, Hidalgo.

Figura 1.6 Temperatura media mensual, Metepec, Hidalgo.

Figura 2.1 Esquema del proceso de digestión anaerobia.

Figura 2.2 Producción de biogás en función de la temperatura.

Figura 2.3 Variación de la actividad metanogénica en función del pH.

Figura 2.4 Curva de la actividad bacteriana dentro de un biodigestor.

Figura 2.5. Tratamiento y uso final del gas natural.

Figura 2.6 Elementos de un sistema de biodigestión.

Figura 2.7 Ejemplos de biodigestores continuos.

Figura 2.8 Biodigestor de doble cámara.

Figura 2.9 Biodigestor discontinuo.

Figura 3.1 Peso vs excreción diaria, bovinos por etapas.

Figura 3.2 Peso vs excreción diaria, bovinos por raza.

Figura 3.3 Peso vs excreción diaria, porcinos.

Figura 3.4 Porcentaje de excretas por peso vivo, bovinos.

Figura 3.5 Porcentaje de excretas por peso vivo, porcinos.

Figura 4.1 Eficiencia del colector a lo largo del año.

Figura 4.2 Radiación Mensual Metepec, Hidalgo.

Figura 4.3 Requerimiento energético a lo largo del año.

Figura 4.4 Número de colectores requeridos.

Figura 4.5 Vista aérea del sistema de digestión.

Figura 4.6 Vista aérea-sur del sistema de digestión.

Figura 4.7 Vista este del sistema de digestión.

Figura 4.8 Vista oeste del sistema de digestión.

Figura 4.9 Diagrama final del sistema de digestión.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Métodos de tratamiento y disposición de desechos con aplicaciones

Tabla 1.2 Climatología de Metepec, Hidalgo.

Tabla 2.1 Ventajas y desventajas de los procesos de digestión

Tabla 2.2 Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica.

Tabla 2.3 Concentración de sustancias inhibidoras.

Tabla 2.4 Características del biogás.

Tabla 2.5 Comparación de las características del biogás vs otros combustibles comunes.

Tabla 2.6 Energía equivalente a 1 m³ de biogás.

Tabla 2.7 Comparación de análisis químicos y microbiológicos en materiales estabilizados de distinto origen.

Tabla 2.8 Propiedades básicas para la selección de la geomembrana.

Tabla 3.1 Producción de biogás de especies animales.

Tabla 3.2 Producción de biogás de especies vegetales/residuos de alimento.

Tabla 3.3 Valores promedios de la relación C/N de algunos residuos disponibles en el medio rural.

Tabla 3.4 Rango de valores reportados de sólidos totales en diversos residuos.

Tabla 3.5 Temperatura y radiación promedio mensual en Metepec, Hidalgo.

Tabla 3.6 Características del colector seleccionado.

Tabla 3.7 Cantidad de nutrientes en 1000 lts de sustrato.

Tabla 3.8 Porcentaje de nutrientes en el fertilizante.

Tabla 3.9 Costo de los fertilizantes comerciales.

Tabla 3.10 Porcentaje de remoción de nutrientes en la digestión.

Tabla 3.11 Descripción de la planta de tratamiento

Tabla 4.1 Relación C/N en cada escenario.

Tabla 4.2 Porcentaje de sólidos en la materia prima seleccionada.

Tabla 4.3 Cantidad de agua añadida a cada residuo.

Tabla 4.4 Número y tipo de animal.

Tabla 4.5 Parámetros de dimensionamiento del digestor.

Tabla 4.6 Componentes adicionales al reactor.

Tabla 4.7 Balance de energía en los E1 y E2.

Tabla 4.8 Costos de fertilizantes.

Tabla 4.9 Costo de tratamiento de aguas.

Tabla 4.10 Costo de la electricidad generada anualmente.

Tabla 4.11 Costo del gas generado anualmente.

Tabla 4.12 Costo del sistema de calentamiento por colectores solares.

Tabla 4.13 Escenario 1. Caso 1. Producción de gas sin calentamiento.

Tabla 4.14 Escenario 1. Caso 2. Producción de electricidad sin calentamiento.

Tabla 4.15 Escenario 2. Caso 3. Producción de gas con calentamiento.

Tabla 4.16 Escenario 2. Caso 4. Producción de electricidad con calentamiento.

Tabla 4.17 Ahorro en emisiones de CH₄/CO₂eq.

Tabla 4.18 Posible aplicación final.

RESUMEN

El presente trabajo aborda una problemática real de gestión de residuos en la región lechera-ganadera de Metepec, Hidalgo cuyo clima se clasifica como templado-subtropical húmedo, donde se desea dar un uso a los residuos producidos por una granja como el estiércol de ganado vacuno y bovino y el suero de leche. Como solución se generó una base de datos sobre las características físico-biológicas de diferentes especies, principalmente de ganado, con el fin de unificar datos existentes dispersos en la literatura y facilitar el dimensionamiento y diseño de un biodigestor a partir de desechos agropecuarios con diferentes formulaciones de insumos. Así mismo, en este trabajo se propuso una metodología de diseño para la instalación y operación de un biodigestor que opere en condiciones críticas de temperatura mínima. El procedimiento estuvo basado en la normativa y legislación vigente en el área, relacionada con la formulación adecuada para la utilización de los desechos disponibles, ello requirió del dimensionamiento de un sistema de biodigestión asistido con un sistema de calentamiento auxiliar, basado en colectores solares, que permite aumentar la temperatura de operación del sistema hasta la temperatura adecuada para que se favorezca el proceso termofílico, beneficiando la eficiencia de digestión, elevando la producción de biogás y otros bioproductos. Finalmente se evaluó la factibilidad tecno-económica del sistema propuesto. Se espera que los logros alcanzados en este proyecto promuevan el uso de tecnologías de fuentes renovables de energía en el aprovechamiento y gestión de residuos, contribuyendo a un beneficio ambiental, tanto en el ámbito local y regional.

Palabras clave: *Biomasa, bioenergía, biol, biofertilizante, biodigestor, biogás, calentamiento, estiércol, ganadería, residuos.*

INTRODUCCIÓN

Antes de la aparición del *Homo sapiens*, hace más de 800 mil años, los primeros homínidos iniciaron los esfuerzos para satisfacer sus necesidades primitivas como la alimentación y el calentamiento de espacios. Es así como a través del instinto surge la primera forma de energía manipulada por el hombre: el uso del fuego.

Con el tiempo las técnicas y herramientas utilizadas en las actividades cotidianas se fueron sofisticando y alternando, avanzando a la par de la tecnología. Como consecuencia de la revolución industrial comenzó el desarrollo de las máquinas de vapor y de combustión interna, junto con la explotación masiva de recursos como la madera, leña, carbón, agua, gas y petróleo.

Para abastecer el requerimiento energético en todo el planeta, y sostener el ritmo de vida, así como las actividades cotidianas se necesita cada vez de mayores cantidades de energía, y por lo tanto de recursos naturales. La demanda energética actual tiene una tendencia creciente de 50 MWh per cápita al año, (IEA, 2018)- debido principalmente a la tasa anual de crecimiento poblacional (1.2 %) que implica un mayor consumo de energía y un cambio tecnológico para producirla a un ritmo más acelerado.

Hoy en día, los combustibles de origen fósil (petróleo, gas y carbón mineral) son la principal fuente de energía en el mundo, y la gran mayoría de las máquinas (motores, calderas, generadores) están diseñadas para funcionar a partir de ellos, debido a las ventajas que representan respecto a otras fuentes (en términos energéticos). No obstante, las desventajas en su mayoría ambientales y económicas de los combustibles convencionales han orillado a la búsqueda de nuevas alternativas en el sector como lo son las fuentes de energía renovables, que hoy en día representan una opción clave en la transición energética.

La diversificación en el proceso de obtención y transformación de energía permite abastecer nuestro consumo con menores impactos al medio ambiente y en algunos casos a la economía. Siempre y cuando se tomen en cuenta criterios de eficiencia y ahorro energético que garanticen la sustentabilidad.

El consumo mundial final de energía en 2014 (REN21, 2016) fue constituido por el 78.3% de combustibles fósiles, 2.5% de energía nuclear y el 19.2% de energías renovables (ER) dentro de las cuales se incluyen las fuentes “tradicionales” como la biomasa tradicional (principalmente leña) y fuentes “modernas” como hidroenergía, geotermia, eólica, solar fotovoltaica y térmica, entre otras (ver Figura 1.1).

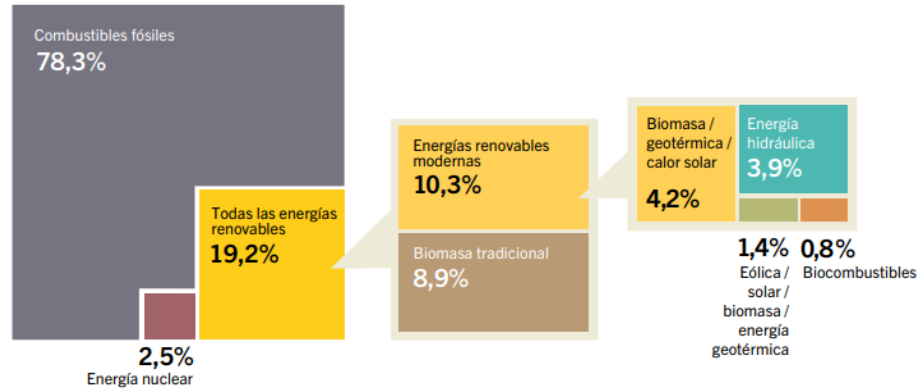


Figura 1.1 Participación por fuente de energía en el consumo mundial final, 2014. Fuente: (Sawin, 2016).

En el marco de la Reforma Energética constitucional aprobada en México en el año 2013, además de abrir gradualmente al mercado los precios de la gasolina, Diesel y gas LP, modernizar las empresas estatales y atraer mayor inversión al sector energético, se estableció una meta de 35% de generación eléctrica a través de energías limpias* (SENER, 2017), mientras que el promedio de generación mundial es de 23.7% (ver Figura 1.2).

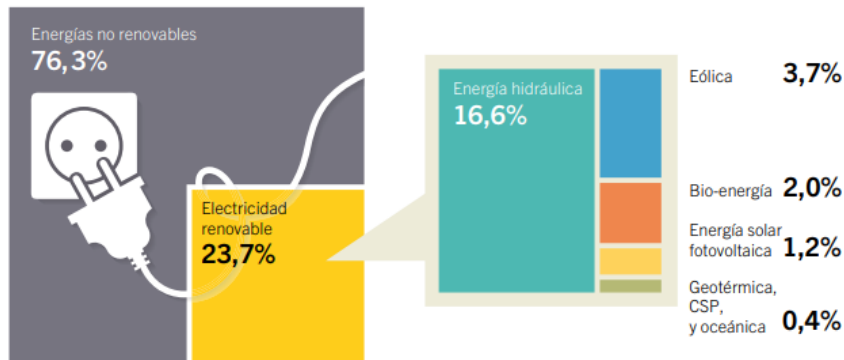


Figura 1.2 Generación de electricidad por fuente de energía 2015. Fuente: (Sawin, 2016).

Del consumo final total de energía registrado en México en el año 2016 (8,528 PJ), las fuentes renovables representaron el 7.1% incluyendo la energía generada por las centrales hidroeléctricas del cual la biomasa ocupó el 5.5% siendo la fuente de ER más consumida.

En los últimos 10 años (de 2006 a 2016) la capacidad instalada de ER en el país aumentó un 40.9% pasando de 14,147 a 18,529 MW de energía renovable instalados (SENER, 2017). Lo que actualmente representa casi el 1% de la capacidad mundial de energías renovables instalada.

*Dentro de las cuales se considera el Gas Natural, de acuerdo con la definición de la Secretaría de Energía.

Asimismo, durante el 2015, el empleo en el sector de la energía a nivel mundial se elevó a 8.1 millones de puestos de trabajo (directos e indirectos), de los cuales casi el 70% se generó en la industria de la energía solar y los biocombustibles (Sawin, 2016).

El sector energético está directamente ligado a la economía, ya que se considera un factor de desarrollo de un país, debido a que incide directamente en todos los sectores económicos como el residencial, industrial, comercial, transporte, agrícola y ganadero.

Para el funcionamiento de estos sectores se requiere de energía de uso final especialmente en forma de calor y electricidad, de entre los combustibles más utilizados para ambos propósitos se encuentra el gas natural, aprovechado en las llamadas centrales térmicas y termoeléctricas (GNU, 2015) que representan aproximadamente el 56% de la capacidad instalada de energía eléctrica. Aunque en el país se cuenta con importantes reservas de gas natural (cuarto a nivel mundial), actualmente se importa de otros países (Jaramillo, 2014), Estados Unidos en mayor medida y se planea aumentar la importación en los siguientes años para garantizar el abasto.

El gas natural se origina en yacimientos y está compuesto principalmente de metano (CH_4) en un 85-95% y de otras sustancias como etano, propano, butano, dióxido de carbono y nitrógeno en menor medida (PEMEX, 2015).

Este insumo se considera una de las principales y más relevantes fuentes de energía por ser un combustible accesible, de bajo costo, de alto rendimiento (CNCGN, 2018) y aunque se considera una de las fuentes más limpias dentro de los combustibles convencionales, es un producto de origen no renovable y su explotación no es sustentable debido a su obtención a través de técnicas como el *fracking* y los problemas ambientales que esto genera como la contaminación atmosférica y de los mantos freáticos, además de las emisiones por combustión y el ruido (GreenPeace, 2018).

En la búsqueda por reemplazar este tipo de combustibles, contar con alternativas que amplíen la matriz energética, y atacar las grandes desventajas que conllevan sin poner en riesgo la seguridad energética, surgen los combustibles limpios, como lo es el biogás, un biocombustible de origen orgánico, formado en su mayoría por metano (55-70%) que puede ser obtenido a través del tratamiento de materia orgánica en sistemas de digestión anaerobia conocidos como biodigestores.

Entre sus ventajas están el tratamiento y gestión integral de residuos orgánicos de distinto origen, control y disminución de contaminantes, generación de empleos locales, crecimiento económico tanto en comunidades rurales como urbanas, la obtención de

subproductos de alto valor agregado además del biogás, como biofertilizantes, mejoradores de suelo y servicios como el tratamiento de aguas residuales.

En este trabajo se propone un sistema de gestión de residuos ganaderos a partir de tecnologías de fuentes renovables de energía como son los biodigestores y un sistema de calentamiento por medio de colectores solares, en el caso de que el biodigestor se instale en lugares de clima fríos-templado (debajo de los 25°C de temperatura promedio diaria en el lugar).

En el Capítulo 1 se describen los antecedentes que justifican el uso de las tecnologías de fuentes renovables de energía como solución y medida de mitigación ambiental para la problemática que se presenta en la segunda sección. Posteriormente se muestran los objetivos a cumplir a lo largo del trabajo.

A lo largo del Capítulo 2 se detallan los conceptos bajo los cuales se desarrolla el proyecto, así como la legislación/normativa vigente y los principales retos y oportunidades en el área de los biodigestores.

El Capítulo 3 contiene la metodología seguida (propuesta y con base en la literatura existente) así como la descripción del trabajo, y las ecuaciones utilizadas, desde la selección y caracterización de la biomasa, las diferentes formulaciones y escenarios propuestos, hasta el dimensionamiento y diseño del digestor y sus componentes adicionales, así como su análisis tecno-económico y ambiental.

En el Capítulo 4 se muestran los resultados obtenidos en cada sección descrita en la metodología, así como los criterios de selección y optimización, además del diagrama y diseño final del sistema de biodigestión.

Finalmente, se presentan las conclusiones y alcances del trabajo realizado, así como futuros trabajos derivados del proyecto, recomendaciones y sugerencias.

Capítulo 1. ANTECEDENTES

1.1 Justificación

1.1.1. Cambio climático

El cambio climático se encuentra directamente relacionado con las actividades humanas, ya que el uso de cualquier recurso altera la composición natural de la Tierra y la atmósfera.

Una de las principales causas de este efecto es la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEIs) como el dióxido de carbono (CO₂) al que corresponde el 63.3% de las emisiones mundiales, seguido del metano (CH₄) con el 26.6% y otros en menor medida como el vapor de agua (H₂O), ozono (O₃) y óxido nitroso (N₂O) (WWF, 2018). Se estima que el consumo mundial de energía se incremente en un 47% para el año 2035 y las emisiones de GEIs crezcan de manera proporcional en un 41% (IEA, 2018).

1.1.2 Gases de Efecto Invernadero

El 68% de las emisiones mundiales vienen de sólo diez países. México registró un aumento del 55% en emisiones de GEIs entre los años de 1990 y 2015 (INEEC, 2015), y actualmente ocupa el lugar número 10, con una contribución del 1.68% a nivel mundial (WWF, 2018).

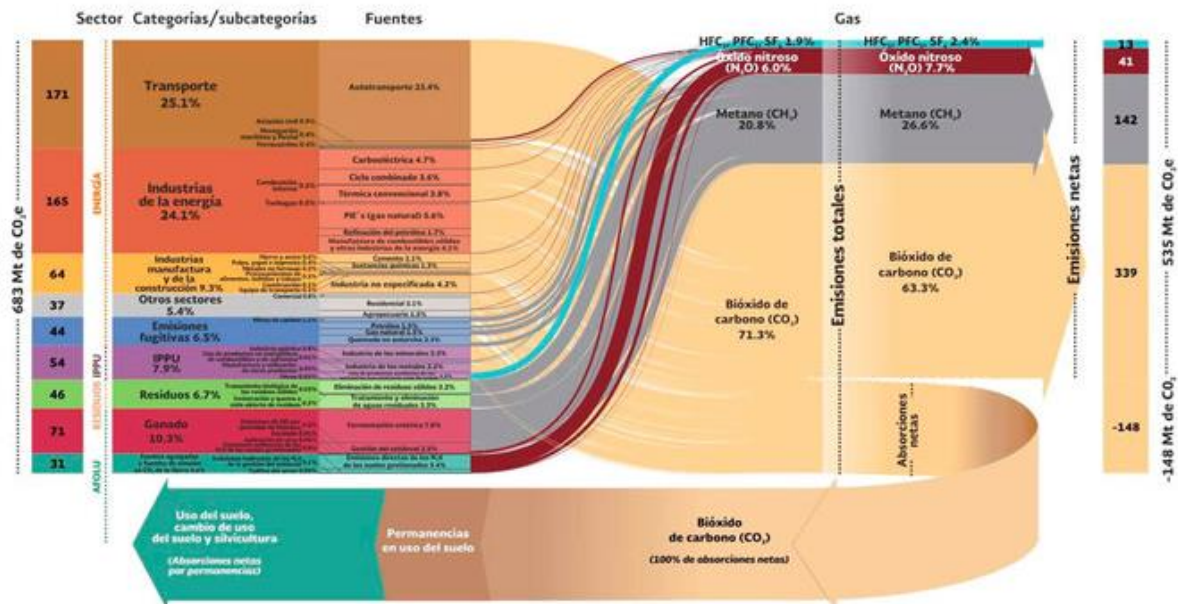


Figura 1.3 Inventario Nacional de Emisiones de GEIs 2015. Fuente: (INEEC, 2015).

A nivel mundial el sector con mayores emisiones de GEIs es el sector de la energía que aporta el 78%, seguido de la agricultura con el 10.1%. Mientras que el sector transporte es el mayor consumidor de energía de uso energético final en el país (46.8%), seguido del sector industrial (31.7%), residencial (18.1%) y agropecuario (3.4%) (SENER, 2017). La

cantidad de emisiones de cada sector, así como el tipo de GEI emitido en cada subsector, se aprecia en la Figura 1.3.

El gas que emite nuestro país en mayor cantidad es el dióxido de carbono, en un 71%, seguido del metano con 21%, y los combustibles fósiles son responsables del 61% de estas emisiones (Ver Figura 1.3). Sin embargo, el CH₄ es un GEI con un impacto 23 veces mayor en la atmósfera que el CO₂ debido a su potencial de calentamiento (IDEAM, 2007).

El metano es generado por la descomposición de materia orgánica en sistemas biológicos, siendo la actividad agropecuaria (ganadería y agricultura) la principal contribuidora a las emisiones de ese gas, seguida de la disposición de residuos sólidos y el tratamiento de aguas (IDEAM, 2007).

El aumento de los niveles de contaminación atmosférica ha causado un incremento en los casos de enfermedades cardiovasculares y pulmonares, lo que a su vez ha aumentado la mortandad a nivel mundial, causando la muerte de siete millones de personas anualmente (Steiner, 2014). Siendo las comunidades más pobres las más vulnerables a los efectos de los contaminantes, como el estiércol, descargas de aguas residuales y por el uso no sustentable del carbón y la leña para la cocción y calefacción.

1.1.3 Actividad ganadera

Los subproductos de mayor demanda provenientes de la ganadería son la carne de ave (pollo), seguida de la carne de res y los lácteos (FIRCO, 2017). Por lo que se cuenta con una gran cantidad de unidades productivas (en particular granjas de cerdos y establos lecheros) que generan además de los productos de consumo final, desechos orgánicos, estos representan una condición desfavorable para el medio ambiente, que como se mencionó causa un grave problema de contaminación y salud pública.

La generación de residuos agropecuarios registrada hasta el año 2008 fue 26,726,780 toneladas anuales, de los cuales el 96.6% provienen de la actividad pecuaria (estiércol), siendo Jalisco, Veracruz y Chiapas los estados de mayor aportación (28%), y los bovinos de carne los mayores generadores de estiércol (66.5%). Se prevé que para el año 2030 la cantidad de excretas producidas aumente en un 60% debido a la tecnificación de los sistemas productivos (RMB, 2011).

La actividad ganadera se clasifica de acuerdo con el sistema de producción utilizado en autoconsumo, extensiva e intensiva (Arronis, 2003). En el caso de la producción de leche en México, de acuerdo con el nivel tecnológico las modalidades de sistemas productivos se clasifican como especializados, semi-especializados, doble propósito, familiar y extensivo

(FIRCO, 2009). Hasta el año 2008 más del 50% de la producción nacional de leche provenía de granjas especializadas.

Sin embargo, la situación económica ha traído como consecuencia el encarecimiento de granos y con ello el abandono de granjas, sobre todo en las áreas de la ganadería porcina y bovina productora de leche (Sawin, 2016).

En los últimos años los países en su mayoría desarrollados y algunas grandes ciudades han migrado gradualmente a los sistemas de producción ganadera intensiva, cuyo objetivo es aumentar la producción en el menor tiempo posible y con el mínimo espacio requerido, utilizando todos los recursos técnicos y humanos disponibles, es decir maximizar la productividad (AGENEX, 2008).

Los sistemas intensivos de producción también se pueden clasificar en (Arronis, 2003):

- Ganadería estabulada: Los animales permanecen confinados todo el tiempo en instalaciones funcionales y adecuadas para su alimentación.
- Ganadería semi-estabulada: Se mantiene el confinamiento sólo durante ciertas horas del día, lo que demanda menor mantenimiento y mano obra.

La ganadería extensiva no es estabulada y se conoce como de libre pastoreo.

Una desventaja de los sistemas intensivos desde el punto de vista energético es que la demanda energética para la operación de una granja con este tipo de prácticas es alta, ya que se requiere mantener el confort térmico (ventilación y calefacción/enfriamiento) y lumínico, movilizar alimento y desechos, obtener agua, y satisfacer necesidades adicionales para los operarios y/o habitantes (Oviedo-Rondón, 2009). Las cargas térmicas y eléctricas requeridas dependerán del tamaño de la granja, cabezas de ganado, nivel tecnológico de las instalaciones y habitantes.

Adicionalmente, con la adopción cada vez más común de las prácticas de ganadería intensiva, también se ha rebasado la capacidad de la tierra para absorber los desechos de manera natural. Dichos residuos además de estiércoles y purines también están formados por deyecciones sólidas, líquidas y camas del ganado, lactosuero, restos de comida, así como residuos zoonosológicos (envases, jeringas, medicamento vencido) restos de animales, subproductos de origen animal no destinados a consumo humano, y fauna nociva como moscas y otros agentes infecciosos (AGENEX, 2008).

Lo anterior, sumado al uso de productos como herbicidas para el control de la maleza, fertilizantes para el enriquecimiento de pastos para alimentación del ganado, mejoradores de suelos y productos de control para los productos finales antes de su llegada al

consumidor, el contenido de contaminantes en los residuos puede aumentar considerablemente.

1.1.4 Gestión de residuos

Los sistemas de tratamiento y disposición final de residuos ganaderos dependen del estado físico de los desechos y de la naturaleza de los procesos a los que son sometidos, ya sean físicos, químicos o biológicos (aerobios y anaerobios).

| | Aplicado a fracción (T: Residuo íntegro, S: Fracción sólida, L: Fracción Líquida) | Objetivo | Necesidades energéticas limitantes |
|--|--|--|---|
| Balsas, homogenización, estercoleros | T,S,L | Regular la producción continua al consumo estacional de cultivos. Regular entradas discontinuas a plantas de tratamiento. Reducir patógenos. | |
| Separación de fases | T | Separar para propiciar líneas específicas de tratamiento, transporte o aplicación a fracción S o L | Energía eléctrica resultante |
| Aplicación de enzimas y bacterias a balsas | T | Aumentar concentración de sólidos. Transformar N amoniacal a orgánico | |
| Nitrificación | L | Transformar N amoniacal a nítrico | Energía eléctrica |
| Desnitrificación | L | Transformar N nítrico a N ₂ . Eliminar materia orgánica fácilmente degradable. | |
| Descomposición aeróbica heterótrofa | T,L | Eliminar materia orgánica | Energía eléctrica |
| Digestión Anaerobia | T,S,L | Eliminar materia orgánica | |
| Compostaje | S | Producir CH ₄ (energía). Eliminar materia orgánica. Higienizar | Energía eléctrica/ mecánica |
| Reducción biológica de fósforo | L | Eliminar/Estabilizar materia orgánica. Higienizar. Obtener abono orgánico de calidad. | Energía eléctrica |
| Precipitación química | L | Transferir algunos componentes a fase sedimentable. Separar P (apatitas, estruvita) | |
| Secado/Peletización | S | Separar agua. Reducir volumen | Energía térmica |
| Evaporación/ Concentración | L | Separar agua. Reducir volumen | Energía térmica |
| Stripping/Absorción | L | Recuperar N amoniacal | Energía eléctrica/ térmica |
| Higienización térmica | T | Eliminar/Inactivar patógenos. Hidrólisis térmica | Energía térmica |
| Dosificación de aditivos | T,S,L | Modificar composición para adecuarla a cultivos o posibilitar otros procesos | |
| Ozonización | L | Oxidación compuestos orgánicos recalcitrantes | Energía eléctrica |
| Filtración en membrana/Osmosis inversa | L | Separar sales. Reducir conductividad | Energía eléctrica |

Algunos de los tratamientos y tecnologías más utilizados, el tipo de desechos, así como su descripción y aplicación, en especial para purines de cerdo, se muestran en la Tabla 1.1.

En el caso de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) se puede recurrir a métodos como la incineración, deshidratación o más comúnmente a los rellenos sanitarios, siguiendo las normas del Programa Nacional para la Prevención y Gestión de los Residuos (SEMARNAT, 2009). Sin embargo, la mayoría de estos procesos tienen limitaciones ya que únicamente

trabajan con los desechos que se encuentran en una fase, y los subproductos resultantes son nulos o requieren algún subproceso adicional.

1.1.5 Precio de combustibles convencionales

El petróleo crudo en México registró su precio máximo histórico en el año 2011, con un valor de 2200 MXN por barril (ver Figura 1.4), mientras que en el último año (2017-2018) el precio mundial ha aumentado en un 24.1% (DatosMacro, 2019). Actualmente la mezcla mexicana tiene un valor de 950 MXN por barril y se espera que este valor siga aumentando en función del comportamiento del mercado, entre otros acontecimientos y decisiones políticas.

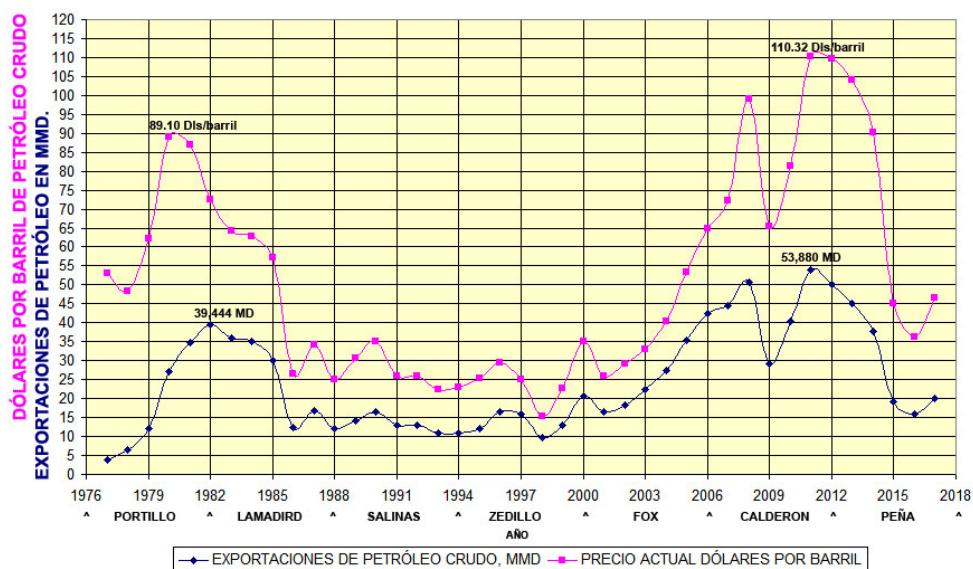


Figura 1.4 Precio histórico e importaciones de petróleo crudo en México 1976-2017. Fuente: (SENER, Estadísticas Energéticas Nacionales, Hidrocarburos, 2018).

De la misma manera, el precio del Gas LP en octubre del 2018 en la región centro del país, se registró hasta en \$21.85 por kg (en gas de cilindro), que aumentó un 23.9% respecto a 2017, cuando se registró en \$16.84 por kg (CRE, 2018).

El consumo final de Gas LP en México fue de 419 PJ en el año 2016, del cual casi el 40% (158 PJ) proviene de importaciones de EUA a México (BNE, 2017), lo que equivale a abastecer poco más de 1.5 veces el consumo del hidrocarburo en la región centro del país (110 PJ).

Asimismo, en el primer semestre del año 2018 el precio del Gas Natural mantuvo una fluctuación entre 73 y 89 MXN/GJ (CRE, 2018) en la región centro del país, finalizando con 114 MXN para su distribución en el mercado residencial.

1.1.6 Costo de fertilizantes

Los precios de los hidrocarburos ejercen una influencia importante en el costo de los insumos para la producción agropecuaria y las decisiones en materia de política energética. En este sentido, el precio de los fertilizantes mantiene una correlación directa con el del gas natural, debido a que el costo principal en la fabricación de fertilizantes nitrogenados es dicho energético (SEMARNAT, 2009).

El uso de fertilizantes de ciertos tipos y en ciertas proporciones es necesario para mantener la calidad y los nutrientes en los cultivos. Algunos de los fertilizantes más usados en la agricultura son los nitrogenados como el nitrato de amonio, sulfato de amonio y urea; los fosfatados como el ácido fosfórico y los fosfatos mono y di amónicos y los potásicos como el cloruro de potasio y sulfato de potasio (AGRICULTURERS, 2017).

Sin embargo, los residuos agroquímicos como los fertilizantes, el estiércol y los plaguicidas son las causas principales de la contaminación del agua (FAO, 1992), debido a que cuando los fertilizantes son utilizados en mayor cantidad de la necesaria, los cultivos ya no son capaces de absorberlos y estos excesos son filtrados o arrastrados a cuerpos de agua, con lo que se provoca una eutrofización (enriquecimiento de nutrientes) en las aguas y surge o aumenta la población de algas y a su vez un desequilibrio en ese sistema ambiental.

Durante 2008, se estimó un incremento máximo histórico en los precios de los fertilizantes internacionales de alrededor de 51% (SAGARPA, 2018). No obstante, para 2009 se calculó una reducción de alrededor de 16.5% en los precios de estos insumos, como consecuencia de la caída del precio del petróleo y de la situación económica mundial, sin embargo, para 2010 los precios se elevaron nuevamente en un 7.5% y desde entonces se mantienen en un alza constante de entre 6% y 0.5% anual.

1.1.7 Diversificación de la matriz energética

Diversos países han comenzado a responder al reto de integrar a las energías renovables a la matriz energética mundial favoreciendo las circunstancias para su uso, como condiciones de financiamiento y otorgamiento de recursos, creación y modernización de un marco legislativo e inversión en investigación y desarrollo de tecnologías sustentables, lo que ha propiciado la reducción de costos y una alta competitividad, y con ello el interés de la inversión pública y privada (Sawin, 2016) para la generación de energía a través de la geotermia, hidroenergía, solar fotovoltaica y térmica, eólica, bioenergía, entre otras.

Así pues, la bioenergía se presenta como un nicho con tecnologías cuyo manejo de manera sustentable representa numerosas ventajas socioeconómicas y ambientales: es versátil, almacenable, comercialmente madura, escalable, brinda aplicaciones para los principales usos finales de la energía como lo son la producción de electricidad, calor y combustibles;

permite crear sinergias con otros sectores económicos del país como el forestal, agropecuario, industrial, transporte y manejo de residuos; promueve la creación de empleos y la inversión en áreas rurales; promueve un impacto positivo en los distintos ejes de la sustentabilidad (ambiental, social, económico e institucional) y brinda sobre todo de carácter ambiental de forma local y global, al otorgar la posibilidad de transformar los residuos urbanos y agrícolas en recursos económicos, controlar la erosión del suelo, regular los ciclos naturales de la tierra, preservar el hábitat de las especies de flora y fauna, reducir emisiones de GEIs, la contaminación del agua y del aire, así como los riesgos sanitarios que ocasiona una inadecuada gestión de residuos (RMB, 2011).

1.1.8 Situación actual de la bioenergía

La bioenergía a nivel internacional representa cerca del 10% del consumo total de energía y el 77% de las energías renovables y se estima que en 20 años sobrepase el 25% de la energía requerida a nivel mundial. En México, la bioenergía abastece el 5% consumo de energía primaria del país principalmente a través de fuentes como la leña, el bagazo de caña y el carbón vegetal (SENER, 2017).

No obstante, aún existe un gran potencial energético del recurso biomásico en el país, que podría producir sosteniblemente 3,569 PJ, el equivalente al 46% de la oferta interna bruta de energía primaria y 10 veces más que su uso actual (Maser, 2006).

Actualmente se ha visto una gran oportunidad en el aprovechamiento de los residuos agropecuarios como una fuente de energía renovable a través del uso de biodigestores para la producción de biogás. En el mundo, existe una amplia experiencia en esta área, que brinda aplicaciones en como la producción de energía eléctrica y térmica, así como el tratamiento de aguas residuales y la obtención de subproductos de alto valor agregado como fertilizantes o bioabono. Estas aplicaciones pueden abastecer el autoconsumo energético o escalarse hasta llegar a abastecer a comunidades o industrias, dependiendo entre otros factores, de la disponibilidad de la materia prima.

En los últimos años, muchas unidades productivas (granjas de cerdos y establos lecheros, entre otros) han incorporado sistemas de biodigestión como parte de sus sistemas productivos, esta iniciativa fue impulsada en principio a nivel internacional, por la comercialización de Bonos de Carbono y el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) del Protocolo de Kioto. Debido a que el uso de biogás en la generación eléctrica es capaz de mitigar del 30% al 90% de emisiones de GEI (RMB, 2011) en comparación con combustibles fósiles como el carbón (80%) o el gas natural (20%).

Tan es así que en el mundo países como China, India, Alemania, Australia y Dinamarca son los pioneros en las tecnologías de biogás y en capacidad instalada de plantas de este tipo

de sistemas (Paniagua S., Gamboa, & Téllez, 2017). Mientras que otros países en América Latina y Sudamérica como Costa Rica, Nicaragua, Brasil, Chile y Argentina también realizan esfuerzos importantes en el área y en la última década se han incrementado los programas en otros países de Asia y África (Ortiz Espinosa, 2010).

Desde los años setentas en China, se inició un programa con resultados parcialmente positivos que dieron lugar a más de 7 millones de biodigestores, posteriormente se logró la instalación y operación exitosa de más de 5 millones de biodigestores. En Europa se desarrolló la infraestructura para la integración del biometano en vehículos de gas natural comprimido y estaciones de combustible, para el 2010 se contaba con una capacidad de 2,300 MWel en plantas de biogás, de los cuales se esperaba incrementar al menos un 50% en 5 años (RMB, 2018). En la India existían alrededor de 4.75 millones de biodigestores instalados hasta el año 2014 (Ortiz Espinosa, 2010) con potencial de instalar 12 millones más.

Los mayores casos de éxito reportan que la recuperación de la inversión es inmediata y se alcanzan ahorros del 100% en combustibles, 50% en electricidad y 40% en fertilizantes (Borges, 2011), aunque en algunos otros casos el ahorro en fertilizantes puede ser mayor que el ahorro por la sustitución de combustibles para cocción, en función del tamaño y tipo de plantas.

1.2 Planteamiento del problema

El municipio de Metepec, Hidalgo (INAFED, 2018), se localiza al norte del estado (ver Figura 1.5). con coordenadas norte latitud $20^{\circ} 14' 17''$ y oeste longitud $98^{\circ} 19' 19''$.



Figura 1.5 Ubicación de Metepec, Hidalgo. Fuente: INAFED, 2010.

La climatología del lugar se resume en la Tabla 1.2 y se puede ver con detalle en el Anexo 1.

| Tabla 1.2 Climatología de Metepec, Hidalgo. | |
|--|-----------------------|
| Parámetro | Valor |
| Temperatura media anual | 22.27 °C |
| Precipitación media anual | 800-1500 mm |
| Uso de suelo y vegetación | Chaparral/Agricultura |
| Climas | C(f)/C(m)(f) |
| Rangos de humedad | Húmedo (f) (53%-88%) |
| Fuente: Elaboración propia con datos de (CONABIO, Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Portal de geoinformación, 2018) | |

Por sus bajas temperaturas, la región alcanza una clasificación climatológica de clima C templado-subtropical húmedo con temperaturas mínimas medias de 17.15°C y máximas de 25.89°C (NASA, POWER Data Access Viewer, 2019). Con heladas en los meses de febrero-marzo y con abril y mayo como los meses más calurosos. En la Figura 1.6 se grafican las temperaturas promedio de la zona de manera mensual.

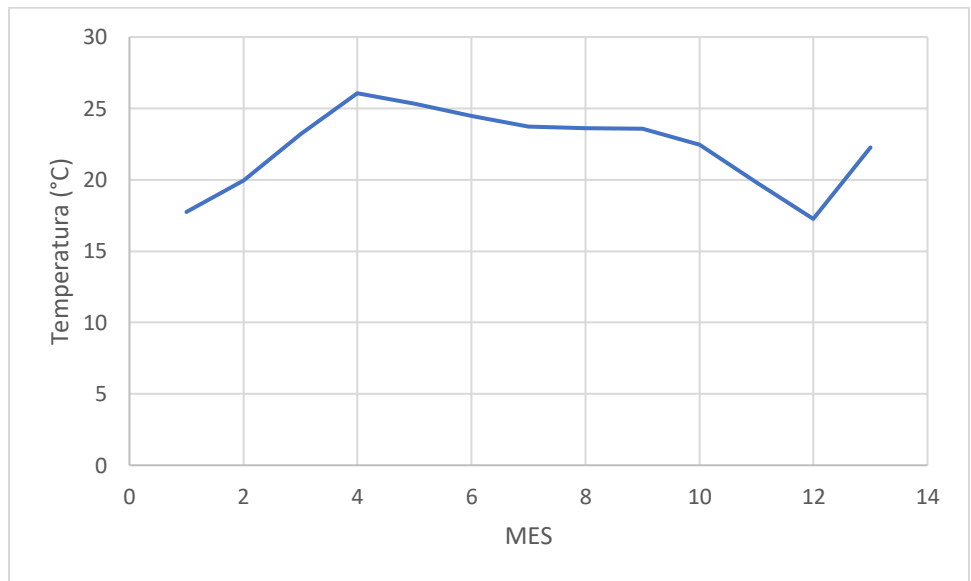


Figura 1.6. Temperatura media mensual, Metepec, Hidalgo. Fuente: Elaboración propia con datos de (NASA, POWER Data Access Viewer, 2019).

En el municipio cruzan los ríos Masillas y Metepec, cuyas aguas son utilizadas en su mayoría para la agricultura y ganadería. Ambos desembocan en la presa Metepec, donde se realizan actividades de pesca.

La producción agrícola ocupa un 85% de la superficie del municipio y se compone en un 50% de alfalfa verde y en un 25% de grano de maíz lo que se traduce en una producción de 5,517 toneladas de alfalfa y 4,699 toneladas de maíz. La producción ganadera se compuso principalmente de carne de bovino (63%), porcino (23%) y ovino (10%). Y se produjeron alrededor de 7,819 litros de leche de bovino en el año 2018 (INEGI, 2010).

En el municipio de Metepec se localiza una granja lechera que cuenta con un ganado permanente de 500 vacas lecheras, 5 sementales, becerros y toretes diversos (del orden de 300 en total). Además de 60 hembras porcinas, 300 cerdos en procesos de crecimiento y 1 semental.

Las excretas en dicho lugar no se someten a ningún tratamiento, únicamente son separadas de forma natural y apiladas para su aprovechamiento como “fertilizante”.

La granja cuenta con una quesería en donde se producen quesos de varios tipos, para la cual se utilizan 3 calderas de 10,000 lts de capacidad, que consumen aproximadamente 4m³ de gas natural por hora para calentar agua y pasteurizar la leche a 60-80°C. Los residuos provenientes de esta actividad se desechan en un campo de oxidación al aire libre

En este caso particular el productor desea dar un uso alternativo a los desechos y evaluar distintas alternativas para realizar una inversión en su unidad productiva. Por nuestra parte, resulta importante proponer el diseño de un biodigestor que pueda aprovechar las excretas disponibles, evitar la contaminación ambiental, producir biogás para autoconsumo y lo más importante, que pueda operar dicho biodigestor a las condiciones ambientales del lugar.

1.3 Objetivos del proyecto

a) Objetivo General

Dimensionar y proponer un sistema de biodigestión de residuos agropecuarios a través de una evaluación técnica para una granja en Metepec, Hidalgo.

b) Objetivos Específicos

- i) Identificar la necesidad del usuario, así como la cantidad y tipo de desechos disponibles para la producción energética.
- ii) Detectar posibles escenarios para la propuesta de un sistema de biodigestión a través de diferentes combinaciones de la biomasa.

- iii) Diseñar y dimensionar un sistema de biodigestión del escenario propuesto
- iv) Realizar una evaluación técnica de las propuestas.
- v) Identificar los posibles bioproductos producidos, así como su uso y aplicación.

Capítulo 2. MARCO TEÓRICO

2.1 LA BIOENERGÍA

La bioenergía es una de las fuentes de energía renovable más antiguas y usadas en el mundo, se basa en el uso de materia orgánica para producir combustibles como lo son el biodiesel, bioetanol, biogás, e hidrógeno, o energía de uso final como calor y/o electricidad (RMB, 2011).

Varias aplicaciones tecnológicas de la bioenergía actualmente son maduras y competitivas en el mercado nacional e internacional, entre ellas la captura de metano y generación de electricidad en rellenos sanitarios, las estufas eficientes de leña para la cocción de alimentos en zonas rurales, así como iniciativas importantes en el área de producción de biocombustibles líquidos, particularmente biodiesel.

Por lo anterior, sumado a las iniciativas lanzadas alrededor del mundo para su legislación y promoción, la bioenergía se considera como una de las fuentes de mayor potencial para facilitar la transición energética de fuentes convencionales a sustentables.

2.2 BIOMASA

La materia orgánica que sirve como materia prima para la producción bioenergética se conoce como biomasa, su origen es variado y puede encontrarse en distintos estados: madera, leña, carbón vegetal, residuos agrícolas, cultivos energéticos como lo son la caña de azúcar y la palma de aceite, residuos municipales y ganaderos que pueden incluir desde desperdicios de comida hasta orina y estiércol, e inclusive residuos de cultivos acuáticos como algas y malezas (RMB, 2018).

El producto o forma de energía final obtenidos, así como la “renovabilidad” en aspectos sociales y de uso de suelo dependerán del origen, contenido inicial y el proceso al que sea sometida la biomasa (Islas Samperio, 2007). Por ejemplo, los cultivos energéticos, así como algunos microorganismos silvestres o cultivados en laboratorio, por su alto contenido de grasas son usados en su mayoría para la producción de biocombustibles (de primera a tercera generación) como bioetanol y biodiesel. La leña y el carbón suelen someterse a la combustión directa para la calefacción y cocción de alimentos o implementarse en dispositivos de combustión eficientes como las estufas ahorradoras de leña.

En distintas proporciones y sometidas a un tratamiento previo simple, casi cualquier tipo de biomasa seca o húmeda de uso común puede integrarse a un proceso de digestión aerobia o anaerobia principalmente para la obtención de biogás y biometano.

2.3 BIODIGESTORES

Un biodigestor es un equipo que bajo las condiciones adecuadas es capaz de procesar la biomasa para transformarla en gas de origen orgánico con un alto contenido de metano, además de otros subproductos como el bioabono también llamado biofertilizante y servicios adicionales como el tratamiento de aguas residuales.

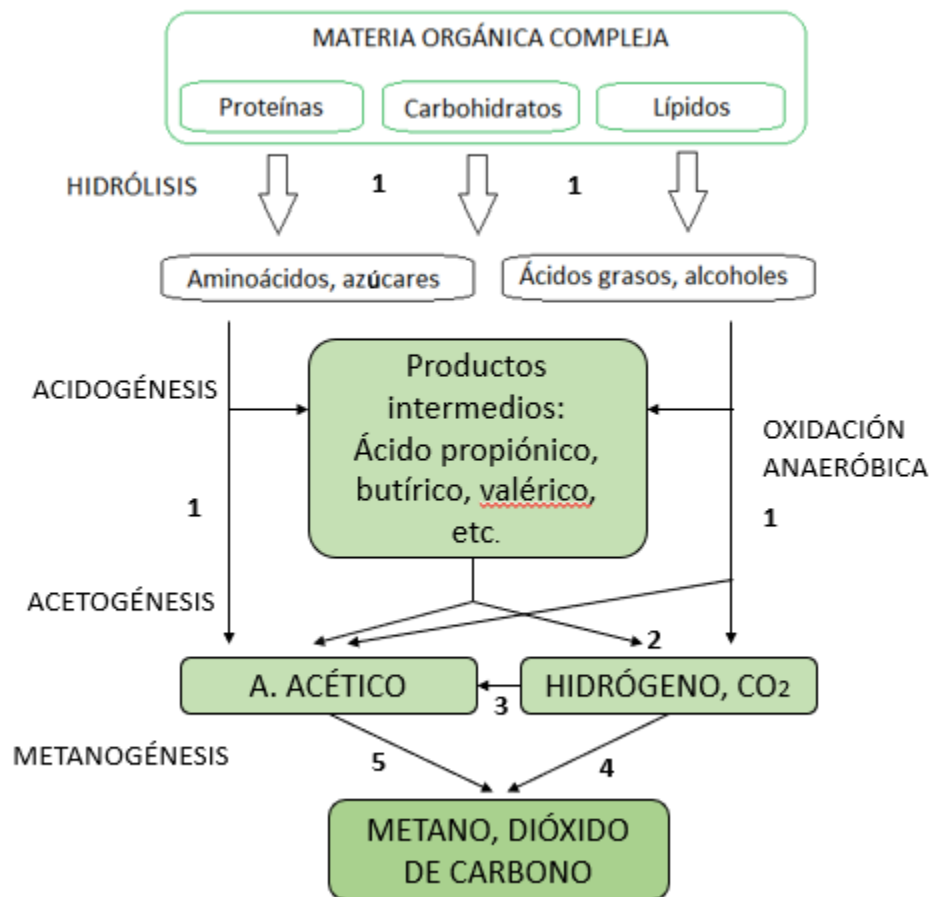
Esto se logra a través de la digestión anaerobia de la biomasa que se lleva a cabo dentro del biodigestor (Paniagua S., Gamboa, & Téllez, 2017), proceso en el cual los desechos pueden transformarse en energía y donde más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, frente al 50% en un sistema aeróbico (Pérez, 2010). En la Tabla 2.1 se describen las ventajas que presentan tanto la digestión anaerobia como la anaerobia para el tratamiento de residuos.

| Tabla 2.1 Ventajas y desventajas de los procesos de digestión. Fuente: (Pérez, 2010). | |
|---|--|
| Aeróbico | Anaeróbico |
| Ventajas | Ventajas |
| Simplificación en la disposición de los lodos | Permite utilizar el metano generado como fuente de energía |
| Bajo capital de inversión | Las bacterias requieren menor energía para su crecimiento |
| | Óptimo funcionamiento con altas cargas orgánicas |
| Desventajas | Desventajas |
| Requiere una alta cantidad de energía adicional para el suministro de aire | Alto capital de inversión |
| Altos costos de operación por el consumo energético | Mayor complejidad operativa |
| Falta de parámetros claros para el diseño | |
| Dificultad de los lodos digeridos para ser separados | |

2.3.1 Principio de funcionamiento

La digestión es un proceso biológico complejo que se divide en diferentes etapas de degradación de la materia (FAO, 2011) que se dan de manera simultánea (ver Figura 2.1) e involucran un gran número de reacciones, además de la interacción de diferentes microorganismos. En cada etapa los componentes orgánicos contenidos en la biomasa se

degradan hasta obtener una mezcla de gases en distintas concentraciones (Paniagua S., Gamboa, & Téllez, 2017).



Los números indican la población bacteriana responsable del proceso: 1. Bacterias fermentativas; 2. Bacterias acetogénicas; 3. Bacterias homoacetogénicas; 4. Bacterias metanogénicas hidrogenotróficas; 5. Bacterias metanogénicas acetoclásticas

Figura 2.1 Esquema del proceso de digestión anaerobia. Fuente Elaboración propia con datos de: (FAO, 2011).

Etapas de la descomposición anaeróbica:

1. *Hidrólisis o etapa hidrolítica:* En esta etapa los compuestos orgánicos poliméricos son solubilizados por enzimas excretadas por bacterias hidrolíticas que actúan al exterior celular, por lo que se consideran exoenzimas. Esta parte del proceso permite degradar la materia orgánica inicial (proteínas, carbohidratos y lípidos) en compuestos solubles más sencillos y proporcionar sustratos orgánicos para la digestión.

La hidrólisis es, por tanto, la conversión de polímeros en sus respectivos monómeros. Los principales productos de esta primera etapa son la celobiasa y

glucosa, provenientes de la celulosa, pentosas, hexosas y ácidos urónicos de la hemicelulosa (Pérez, 2010).

La velocidad de esta fase del proceso se verá limitada por el contenido de sólidos y el tamaño de las partículas de la materia, además de otros factores analizados en la sección 2.3.2.

2. *Acidogénesis/ Etapa fermentativa o acidogénica*: En esta etapa actuarán las bacterias acidogénicas o formadoras de ácidos que se encargarán de metabolizar los productos de la hidrólisis, mismos que serán oxidados por las bacterias acetogénicas como los ácidos acético y fórmico y utilizados directamente por las metanogénicas como los ácidos acético, propiónico, butírico, láctico (ácidos grasos de cadena corta) y el etanol. Además de preparar alimento para las siguientes etapas del proceso, es aquí donde se eliminan trazas de oxígeno que hayan quedado disueltas en el sistema (Paniagua S., 2013).
3. *Acetogénesis o etapa acetogénica*: Los productos de la acidogénesis que no pueden ser metabolizados directamente por las bacterias metanogénicas, son transformados en productos más sencillos durante esta etapa, de la que resultan compuestos como el acetato (producido por los organismos homoacetogénicos) dióxido de carbono e hidrógeno. Al haber digerido todo el alimento proveniente de la biomasa hasta esta etapa, las bacterias producen sus propios desechos, mismos que serán el sustrato para las bacterias metanogénicas.
4. *Metanogénesis*: Los organismos metanogénicos son parte fundamental para la formación de metano y completan el proceso de digestión, mediante la transformación de los sustratos resultantes de las etapas anteriores: acetatos, hidrógeno, dióxido de carbono, metanol, entre otros. La mayoría de las bacterias metanogénicas son capaces de reaccionar con el hidrógeno, mientras que sólo dos de ellas, denominadas acetotróficas pueden utilizar el acetato para producir dicho gas (mediante el ácido acético) que es de donde proviene la mayor cantidad del metano producido. Los ácidos carbónico, fórmico y metanol obtenido de la etapa anterior reducido por el hidrógeno producen el metano restante (FAO, 2011).

2.3.2 Factores que afectan el proceso de biodigestión

El desempeño de un sistema de biodigestión se puede evaluar de acuerdo con la tasa de generación de metano que se produce en la etapa metanogénica de la digestión. Diversos factores químicos y físicos pueden intervenir en este proceso y generar las condiciones ideales para maximizar la producción de biogás o en el caso contrario inhibir la actividad de las bacterias metanogénicas y como consecuencia disminuir el rendimiento del sistema e

incluso colapsarlo (FAO, 2011). A continuación, se describen algunos de los factores más importantes.

2.3.2.1 Composición bioquímica de la biomasa

Una ventaja al elegir la materia prima que será digerida en el sistema es que su origen puede ser amplio y variado, abarcando desde residuos de origen animal, vegetal, humano, agroindustrial, forestal y de cultivos acuáticos.

Las características bioquímicas de estos desechos deben de garantizar los nutrientes necesarios para que las bacterias involucradas en la digestión cumplan su función específica. Primero se necesita una fuente de carbono y otra de nitrógeno en proporciones específicas, energía y una serie de minerales en equilibrio como azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, níquel, cobalto, entre otras. La composición promedio de la materia orgánica seca es: 48%C; 44%O, 7%H, 2%N. Los minerales presentes son del orden de 1 a 10% del peso seco (Urra-Balcazar, 2009).

Los materiales con alto contenido de lignina no son directamente aprovechables, como lo son algunos residuos vegetales, por lo que deben ser sometidos a ciertos pretratamientos como la trituración, maceración y compostaje. En el caso del estiércol, su composición va a variar dependiendo del tipo de animal y de alimentación que hayan recibido (FAO, 2011).

No se recomienda cambiar frecuentemente la materia prima de alimentación, ni añadirla en estado de descomposición, ya que esto podría provocar una grave deficiencia en el funcionamiento del sistema (Pérez, 2010).

2.3.2.2 Relación C/N

El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación para las bacterias metanogénicas por lo que la razón de concentraciones C/N tiene una gran importancia en el proceso fermentativo.

Por un lado, el carbono constituye la fuente de energía y es consumido 30 veces más que el nitrógeno cuya función es la formación de nuevas células. Por lo que la relación óptima de C/N recomendada va desde 20:1 hasta 30:1, es decir, de 20 a 30 unidades de carbono por una de nitrógeno (FAO, 2011). Si la relación es superior a 35:1 la multiplicación de bacterias será baja y la descomposición ocurrirá de manera lenta debido a la falta de nitrógeno además de que se desacelerará la humificación del proceso. Si la relación es menor de 8:1 se formará amonio en exceso lo que inhibirá el proceso y añadirá toxicidad a la mezcla (AGENEX, 2008).

2.3.2.3 Temperatura

Uno de los principales parámetros de diseño del biodigestor es la temperatura de operación, ya que como sucede en otros procesos físicos y bioquímicos el aumento de temperatura en cierto rango va a favorecer la digestión de los desechos.

Al aumentar la temperatura de operación la velocidad de crecimiento de las bacterias también aumenta y con ello se acelera la digestión, lo que provoca una mayor producción de biogás.

En cada etapa del proceso las bacterias necesitan de diferentes temperaturas para llevar a cabo su función, en la Tabla 2.1 se pueden observar estos rangos y los valores óptimos de operación donde se da la velocidad máxima específica de crecimiento (μ_{max}) de las bacterias (FAO, 2011).

| Tabla 2.2 Rangos de temperatura y tiempo de digestión anaeróbica. Fuente: (FAO, 2011) | | | | |
|---|---------|---------|---------|---------------------|
| Fermentación | Mínimo | Óptimo | Máximo | Tiempo de digestión |
| Psicrofílica | 4-10°C | 15-18°C | 20-25°C | Sobre 100 días |
| Mesofílica | 15-20°C | 25-35°C | 35-45°C | 30-60 días |
| Termofílica | 25-45 | 50-60°C | 75-80°C | 10-15 días |

Con el fin de mantener una temperatura uniforme y adecuada en el sistema se debe contar con un sistema de monitoreo y control de temperatura en conjunto con uno de agitación, que pueden ir desde dispositivos simples para pequeños volúmenes hasta sistemas de calentamiento y movimiento complejos dependiendo de la temperatura del lugar y las condiciones en las que se desee operar.

El rango mesofílico actualmente es el más estudiado y recomendado, ya que brinda cierta estabilidad al proceso, no provoca el aumento de compuestos tóxicos como pasaría en un régimen termofílico y el volumen requerido es menor que el requerido por el régimen psicrofílico. Sin embargo, puede utilizarse la combinación de dos fases de digestión para aprovechar los beneficios de ambas para maximizar la producción de biogás (ver Figura 2.2) y mantener la eficiencia.

A pesar de que un aumento de temperatura es benéfico para la rapidez del proceso, la viscosidad de sólidos y semisólidos y la solubilidad de algunas sales, a su vez podría disminuir la solubilidad de algunos compuestos no sólo tóxicos sino importantes como el CO_2 lo que implica un aumento del pH y generaría una alta concentración de NH_3 que como se verá más adelante es uno de los principales inhibidores en la digestión anaerobia.

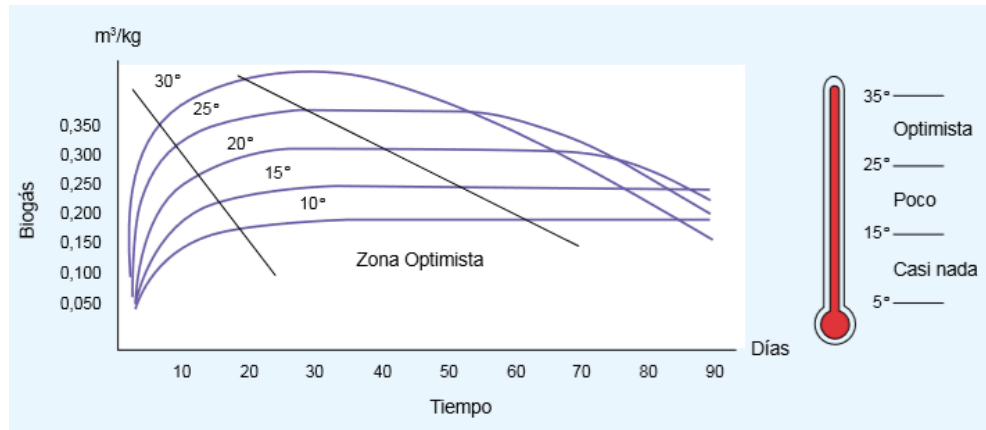


Figura 2.2 Producción de biogás en función de la temperatura. Fuente: (FAO, 2011)

Por lo anterior, la variación ideal de temperatura a lo largo del día deberá permanecer en el rango de 0.6-1.2°C para evitar la desestabilización y desbalance del proceso (Pérez, 2010).

2.3.2.4 Tiempo de Retención Hidráulico

El Tiempo de Retención Hidráulico o TRH es la relación entre la carga volumétrica diaria que se va a añadir al biodigestor y el tiempo que ésta debe permanecer en el sistema para completar el ciclo de digestión. A medida que la carga aumenta el tiempo de retención disminuye.

Las bacterias requieren de un cierto tiempo para degradar la materia orgánica, factor que como se trató anteriormente es proporcional a la temperatura de operación, y a su vez inversamente proporcional al TRH, es decir que, entre mayor sea la temperatura de operación, menor será el TRH; y mientras menor sea el TRH, menor será el tamaño del digestor y los costos tanto de instalación como operación y mantenimiento. Por lo que es conveniente optimizar la relación de TRH-Temperatura en función del costo-beneficio.

Otro factor importante para determinar el TRH es el tipo de sustrato, ya que los materiales con mayor relación de carbono como la celulosa requieren de un mayor tiempo de retención para su degradación.

Los valores de TRH van desde 20 a 90 días, con cargas diarias de 1 a 5 kg de sólidos volátiles dependiendo del lugar de instalación, y del contenido y origen de la materia orgánica (ICE, 2011) aunque la producción de biogás a través de la conversión de sólidos volátiles comienza desde los 10 días (Pérez, 2010).

2.3.2.5 Contenido de sólidos volátiles y totales

De acuerdo con la NMX-AA-034-SCFI-2015 el término de Sólidos Volátiles (SV) se refiere a la cantidad de materia orgánica e inorgánica que se volatiliza por el efecto de la calcinación

a 550°C +/- 50°C mientras que los Sólidos Totales (ST) son los residuos que permanecen en una cápsula luego de evaporar y secar una muestra a temperatura de 105°C +/- 2°C.

Es decir, la fracción de sólidos totales contenidos en la materia orgánica, la cual está conformada por agua y una parte sólida, que cuando es sometida a dicha temperatura se oxida y libera esa fracción sólida en forma de gas metano.

En la caracterización de residuos orgánicos, los porcentajes de SV y ST permiten conocer el uso potencial de estos en la producción de biogás (Mojica, 2016).

La fracción de sólidos en la mezcla es un factor importante ya que la movilidad y acción de las bacterias metanogénicas se verá afectada por un aumento en el contenido de sólidos y por lo tanto se alterará la eficiencia del sistema.

Valores experimentales (Venegas-Venegas J., 2015) demuestran que la carga de sólidos totales se debe encontrar entre el 8 y 12% para biodigestores continuos y semicontinuos (Martínez, 2007) y entre 40% y 60% para biodigestores discontinuos.

La mayoría de los residuos por sí solos no cumplen con el porcentaje de sólidos requerido por lo que para cumplir con este requerimiento deben ser mezclados con agua en proporciones definidas de acuerdo con el porcentaje de sólidos inicial.

2.3.2.6 Nivel de acidez/alcalinidad

Los organismos participantes en la digestión anaerobia son altamente propensos a las variaciones del nivel de alcalinidad-acidez, como consecuencia el proceso podría desarrollarse de manera ineficaz en cuanto a la producción y composición del biogás.

Los valores ideales de pH se encuentran entre 6 y 8. Si este valor baja de 6 el biogás generado tendrá una composición baja en metano, debido a la baja actividad de las bacterias metanogénicas. Si el valor aumenta de 8 se promoverá la formación de amoníaco lo que inhibirá la degradación de algunos compuestos (ver Figura 2.3).

Las principales causas de la caída del pH tienen que ver con la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV) y/o por la acumulación de dióxido de carbono, que puede prevenirse al agregar algún compuesto químico que ajuste el pH (sustancia buffer), o al reducir la carga orgánica para dar tiempo a que se consuman los AGV contenidos en el sistema antes de agregar una nueva carga, hasta que el valor de pH se establezca dentro del rango deseable (Pérez, 2010).

Por otro lado, algunos compuestos como los que tienen un alto contenido de nitrógeno orgánico (proteínas) pueden contribuir a aumentar la alcalinidad del sistema, al neutralizar

de manera natural a los AGV. Pueden usarse algunos suplementos de alcalinidad como bicarbonato y carbonato de sodio, hidróxido de sodio y potasio e incluso cal.

Incluir medidores de pH con distintas tecnologías de control y monitoreo garantizará mantener los niveles de acidez y alcalinidad óptimos.

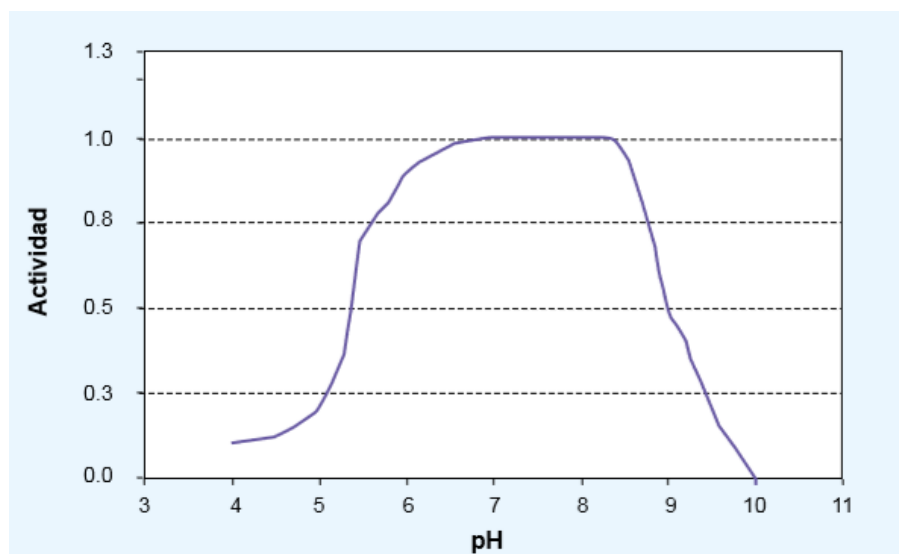


Figura 2.3 Variación de la actividad metanogénica en función del pH. Fuente: (FAO, 2011)

2.3.2.7 Agitación y mezclado

Un factor esencial para estimular la actividad bacteriana es evitar el estancamiento y la formación de costras en la mezcla, particularmente en biodigestores continuos. Al contar con un sistema de agitación además de prevenir la sedimentación, se remueven los metabolitos producidos por la digestión de las bacterias metanogénicas, se mezcla el sustrato nuevo con el pasado, se evitan espacios “muertos” es decir sin actividad biológica (FAO, 2011) que afectarían el volumen aprovechable del biodigestor y se previene la formación de espumas o natas.

Adicionalmente se puede reducir el TRH con un sistema efectivo de agitación ya que se facilita la transferencia de calor y con ello uniformar la temperatura en el sustrato, además de promover el contacto de las bacterias con cada elemento de la mezcla.

Los sistemas de agitación de acuerdo con su principio de funcionamiento pueden ser de tipo mecánico (vertical o horizontal), hidráulico o de recirculación/burbujeo de biogás. Su elección dependerá principalmente de la geometría del sistema y del volumen de biomasa en el biodigestor.

2.3.2.8 Potencial redox

Las bacterias anaerobias necesitan de un ambiente con un potencial de oxidación altamente reductor por lo que el valor de potencial redox se debe mantener entre -220 mV y -350 mV (Paniagua S., Gamboa, & Téllez, 2017).

2.3.2.9 Inhibidores (sustancias tóxicas)

Ciertas sustancias tóxicas en el sistema pueden inhibir la actividad bacteriana en distintas etapas de la digestión, por lo que se debe evitar en lo posible su formación y la exposición de dichos compuestos al sustrato.

Estos compuestos pueden estar presentes en la biomasa inicialmente agregada, como algunos metales pesados, fenoles, compuestos halogenados y cianuro o formarse durante el proceso degradativo como los ácidos grasos de cadena larga, sulfuro y amoníaco (en ambos casos), por las razones que fueron tratadas en secciones anteriores (Velasco, 2016).

| Tabla 2.3 Concentración de sustancias inhibidoras. (Velasco, 2016) | |
|--|--------------------------|
| Inhibidores | Concentración inhibidora |
| SO ₄ ⁻ | 5000 ppm |
| NaCl | 40000 ppm |
| NO ₃ ⁻ | 0.05 mg/ml |
| Cu | 100 mg/ml |
| Cr | 200 mg/ml |
| Ni | 200-500 mg/ml |
| CN ⁻ | 25 mg/l |
| NaCl | 3500-5500 mg/l |
| K | 2500-4500 mg/l |
| Ca | 2500-4500 mg/l |
| Mg | 1000-1500 mg/l |
| ABS (Detergente sintético no biodegradable) | 20-40 mg/l |
| AGVs | 2000-3600 ppm |
| Amoníaco-N | 1500-3000 mg/L |

El efecto tóxico dependerá de la cantidad del compuesto, ya que en ciertas cantidades algunos compuestos incluso pueden resultar benéficos para el proceso (ver Tabla 2.3).

2.3.2.10 Inoculantes (promotores)

El crecimiento bacteriano dentro del biodigestor se rige por tres etapas, la de arranque, estabilización y caída (ver Figura 2.4). La etapa de arranque puede ser acortada agregando

inoculantes, estabilizadores o promotores de la digestión, como puede ser la materia prima en la etapa estable de otro biodigestor, cuyas bacterias metanogénicas ya se encuentran en actividad y serán capaces de aumentar la eficacia de la digestión en este nuevo proceso. Esta medida es recomendada sobre todo en biodigestores discontinuos.

2.3.3 Productos de la biodigestión

La digestión anaerobia tiene principalmente dos productos: el biogás y el bioresiduo de la materia digerida. Ambos tienen diferentes usos dependiendo de la cantidad y calidad, y del tratamiento posterior a su salida del biodigestor y previo a su uso final. Un tercer servicio de la biodigestión es el uso de aguas residuales para la alimentación del sistema, con lo cual se obtiene agua tratada que al pasar por otros métodos de remoción de contaminantes puede resultar en agua potable.

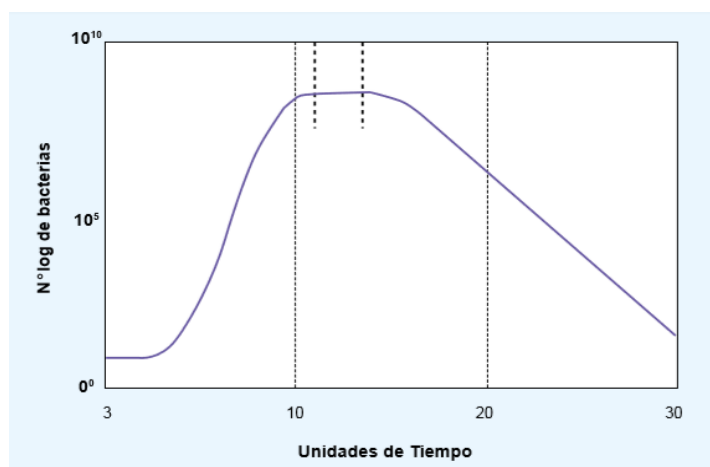


Figura 2.4 Curva de la actividad bacteriana dentro de un biodigestor. Fuente: (FAO, 2011)

2.3.3.1 Biogás

El biogás es un combustible producido a través de la biodigestión de residuos por lo que es considerado un biocombustible o combustible limpio (Paniagua S., Gamboa, & Téllez, 2017), está compuesto de diferentes gases principalmente CH₄ y CO₂ y otros como vapor de agua, N, H y H₂S en menor cantidad.

Las características generales de este combustible han sido reportadas por diversas fuentes con variaciones mínimas, como se muestra en la Tabla 2.4

| Tabla 2.4 Características del biogás. Fuente: Elaboración propia con datos de (FAO, 2011); (RMB, 2018) | |
|--|---|
| Contenido (compuestos) | 55-75% Metano (CH ₄) |
| | 45-25% Dióxido de Carbono (CO ₂) |
| | 3% Trazas de otros gases (H ₂ O, H ₂ S, H, N) |
| Contenido energético (kWh/m ³) | 6-6.5 |
| Temperatura de ignición/encendido (°C) | 650-750 |
| Presión crítica (MPa) | 7.5-8.9 |
| Temperatura crítica (°C) | -82.5 |
| Presión de almacenamiento (mbar) | 7-20 |
| Densidad (kg/m ³) | 1.2 |
| Masa molar (kg/kmol) | 16.043 |
| Equivalente de combustible | 0.60-0.65 L petróleo/m ³ biogás |
| Densidad relativa (respecto al agua) | 0.83 |
| Olor | Huevo podrido (sin desulfurar) |

En la Tabla 2.5 se muestran las características del biogás en comparación con otros gases.

| Tabla 2.5 Comparación de las características del biogás vs otros combustibles comunes. Fuente: (Pérez, 2010); (FAO, 2011) | | | | | |
|---|----------|-------------|-------------|------------|-----------|
| Valores | Biogás | Gas natural | Gas propano | Gas metano | Hidrógeno |
| Poder calorífico (kWh/m ³) | <u>7</u> | 10 | 26 | 10 | 3 |
| Densidad (kg/m ³) | 1.08 | 0.7 | 2.01 | 0.72 | 0.09 |
| Densidad relativa (respecto al aire) | 0.81 | 0.54 | 0.51 | 0.55 | 0.07 |
| Límite de explosión/ignición (% en el aire) | 6-12 | 5-15 | 2-10 | 5-15 | 4-80 |
| Temperatura de encendido/ignición (°C) | 687 | 650 | 470 | 650 | 585 |
| Máxima velocidad de encendido en el aire (m/s) | 0.31 | 0.39 | 0.42 | 0.47 | 0.43 |
| Requerimiento teórico de aire (m ³ /m ³) | 6.6 | 9.5 | 23.9 | 9.5 | 2.4 |

El poder calorífico del biogás (Tabla 2.5) equivale más o menos al de 0.4 kg de diésel, 0.6 kg de petróleo o 0.8 kg de carbón. Esta cantidad de energía sería suficiente para calentar 60 L de agua de 1 a 100°C o generar 1.25 kWh de electricidad, y abastecer la potencia requerida por cualquiera de los electrodomésticos de uso común que se observan en la Tabla 2.6.

| Tabla 2.6 Energía eléctrica equivalente a 1 m ³ de biogás. Fuente: Elaboración propia con datos de (PROFECO, 2018) | |
|---|-----------------------------------|
| Electrodoméstico (Potencia) (PROFECO, 2018) | Tiempo encendido (Calculo propio) |
| 1 Foco LED (8 W) | 156 horas-6.5 días |
| 1 Horno de microondas (1300 W) | 1 hora |
| 1 Refrigerador (575 W) | 2.2 horas |
| 1 Aire acondicionado (1000 W) | 1.25 horas |
| 1 Computadora portátil (250 W) | 5 horas |

El gas obtenido en la biodigestión es de bajo poder calorífico y el rendimiento neto de la generación de electricidad en las plantas de biomasa es del orden del 20% (Noyola, 2001), sin embargo, el rendimiento energético puede ser incrementado con el uso de la cogeneración. Además, es útil en aplicaciones térmicas de baja temperatura, como la cocción de alimentos.

El metano es el componente de mayor valor energético en el biogás, por lo que se busca purificar el biogás para obtener el mayor porcentaje de metano y menor cantidad de otros compuestos considerados impurezas como el H₂S que, además de agregar mal olor al producto aún en bajas concentraciones, es una sustancia altamente corrosiva y tóxica para el ser humano.

Por otro lado, el CO₂ disminuye el poder calorífico del biogás, pero se aconseja no ser removido en su totalidad por sus características antidetonantes principalmente si será utilizado como combustible en el transporte (Contreras & Vilches, 2007).

El “rendimiento teórico de metano” es la producción de metano a partir de la cantidad de sólidos volátiles destruidos de la materia prima, lo que indica en que porcentaje fueron degradados los compuestos orgánicos del digestato.

Aplicaciones y uso final

Entre las principales aplicaciones del biogás destacan la producción de calor, electricidad, la co-generación, reemplazo del gas natural y su uso como combustible en vehículos. El tratamiento del biogás previo a su utilización dependerá del uso final que se le quiera dar (ver Figura 2.5).

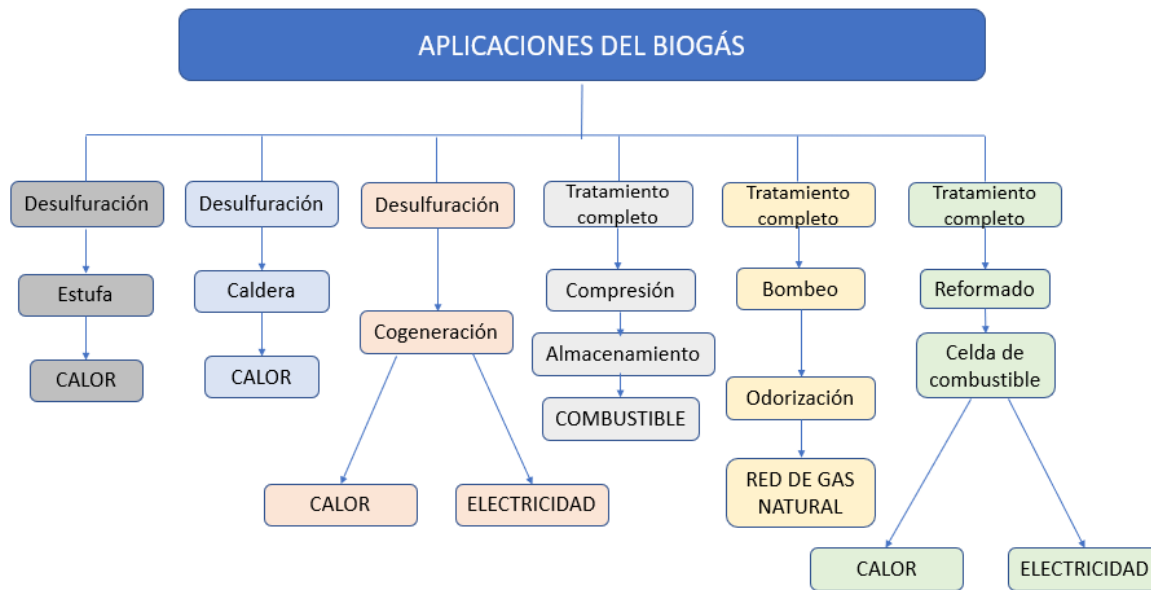


Figura 2.5. Tratamiento y uso final del gas natural. Fuente: (Paniagua S., Gamboa, & Téllez, 2017)

2.3.3.2 Efluentes y lodos de digestión

La materia orgánica tiene un papel importante en la formación y enriquecimiento de los suelos, influye en diversos procesos físicos, químicos y biológicos que representan factores importantes en la fertilidad y el uso de suelo.

Una práctica común pero poco recomendable es la integración directa de residuos orgánicos a la tierra, ya que de esta forma el tiempo requerido para su degradación y asimilación será mucho más prolongado.

Los bioprocesos de tipo aerobio y anaerobio ofrecen un pretratamiento de los residuos orgánicos ya sea a través del compostaje y lombricultura o la fermentación, lo que brinda una composición química variable de acuerdo con el tipo de materia prima y el tiempo de “estabilización”.

Una forma de medir la calidad de cualquier material orgánico es a través del Índice de Madurez de los Compost (Varnero, 2004) que considera tres aspectos:

1. La relación C/N
2. La estabilidad biológica
3. La madurez química

Los cuales pueden medirse a través de distintos métodos físicos, químicos y biológicos que ya han sido reportados.

Un producto estabilizado contiene una menor cantidad de coliformes totales (que indican el índice de contaminación fecal), mayor calidad sanitaria, buena actividad biológica y un adecuado desarrollo de fermentos nitrosos y nítricos, de la microflora, hongos y levaduras (FAO, 2011).

A su vez el valor agrícola de los bioproductos dependerá de parámetros como el contenido de materia orgánica y nutrientes totales/disponibles, la capacidad de intercambio catiónico, el contenido de sales solubles, la relación C/N y el pH.

Los residuos provenientes del biodigestor se pueden clasificar en dos tipos: los efluentes y los lodos. Los efluentes corresponden al residuo de la materia fermentada en el biodigestor, ya sea sólido (en el caso de los biodigestores discontinuos) o líquido (biodigestores continuos), no tiene olor y posee un pH cercano al 7.5. Así mismo, los lodos se tratan de la materia sólida-pastosa, con un elevado contenido de agua que se encuentra en el fondo del biodigestor y que se extrae cada seis o doce meses de acuerdo con el mantenimiento de un sistema continuo.

Aplicaciones y uso final

El uso final de los lixiviados dependerá de sus características bioquímicas, por ejemplo, como acondicionador de suelos cuyo objetivo es la restitución de la materia orgánica estable para prevenir la erosión, aumentar la permeabilidad del suelo y funcionar como base para el desarrollo de los microorganismos responsables de la conversión de nutrientes.

Los lodos recuperados del biodigestor también pueden ser utilizados como cubierta vegetal para rellenos sanitarios

Por otra parte, si el contenido de nutrientes de la materia orgánica es alto se generarán productos con características de fertilizantes orgánicos conocidos como biofertilizante o bioabono ya sea en estado sólido o líquido.

Se ha encontrado que, por ejemplo, la aplicación del biofertilizante proveniente de un biodigestor operado con estiércol de res, en comparación con el uso directo del estiércol, mejoró en un 28% los rendimientos agrícolas del maíz, al contener un 1.5% de nitrógeno, contra 0.4% de la materia prima sin tratamiento (Corona, 2007), además de mejorar las características del suelo facilitando la aireación, aumentando la capacidad de retención de humedad, infiltración de agua y la capacidad de intercambio catiónico.

En la Tabla 2.7 se pueden observar los valores promedio de análisis químicos reportados para materiales orgánicos estabilizados por medio de procesos aerobio (compostaje) y anaerobio (biodigestión).

| Tabla 2.7 Comparación de análisis químicos y microbiológicos en materiales estabilizados de distinto origen. Fuente: (FAO, 2011) | | |
|--|---------|----------|
| Análisis químico | | |
| Parámetros | Compost | Bioabono |
| pH (H2O 1:5) | 7.2 | 7.9 |
| MO (W-B) 1:5 | 20 | 45 |
| MO (Calcinac, %) | 39 | 58 |
| N total (Kjeldal %) | 1 | 1.8 |
| P total (%) | 4.1 | 8.4 |
| K total (%) | 0.4 | 0.7 |
| Relación C/N | 19 | 25 |
| N mineral (mg/kg) | 550 | 30 |
| C.E. (dS/m) | 10 | 14.4 |
| Análisis microbiológico | | |
| Actividad biológica | 357 | 1054 |
| Microflora total | 10 | 68 |
| Hongos y levaduras | 250 | 25 |
| Fermentosos nitrosos | 1200 | 1100 |
| Fermentosos nítricos | 800 | 50 |
| Coliformes totales | 0.1 | 0 |

Los biofertilizantes representan una oportunidad para la fertilización natural del suelo y la promoción de la agricultura autosustentable ya que desplaza el uso de fertilizantes químicos aumentando la productividad de los cultivos.

El intercambio catiónico es la capacidad que tiene el suelo de retener y liberar iones positivos, esto es posible gracias al contenido orgánico del suelo y es una de las características principales en un suelo rico en nutrientes.

En la regulación de suelos el bioabono permite mejorar el intercambio catiónico, contribuye a aumentar y retener la humedad lo que propicia un clima adecuado para el crecimiento de las plantas, además es una fuente de fitoreguladores (Contreras & Vilches, 2007) que promueven las actividades fisiológicas y la estimulación del desarrollo de especies vegetales ya que fortalece la raíz y amplía el follaje, mejora la floración, germinación y producción de biomasa vegetal.

Otro factor que se ve favorecido con el uso de bioabono es la cohesión de suelos arenosos y la retención de nutrientes, lo que mejora la estructura del suelo y ayuda a controlar la erosión y los ciclos biogeoquímicos del suelo. También mejora la porosidad y como consecuencia la permeabilidad y aeración (FAO, 2011).

El efluente del biodigestor contiene hasta el 2% de los sólidos totales, a diferencia de la carga del afluente que contiene el del 8% al 12%. Dependiendo su composición química puede ser utilizado como fuente de riego en cultivos hidropónicos y huertas de hortalizas, como medio de cultivo para microorganismos como es la biomasa microalgal o someterse a procesos posteriores de purificación para ser utilizado como agua tratada (Varnero, 2004).

2.3.4 Operación y componentes de un sistema de biodigestión

La implementación de un biodigestor implica un proceso operativo integral que abarca desde la disposición y transporte de la biomasa para su tratamiento previo e integración al biodigestor, el diseño del reactor y los componentes y requerimientos adicionales de acuerdo con el tamaño, complejidad del sistema y el uso final de los productos digeridos (ver Figura 2.6).

A continuación, se describirán las partes básicas de este sistema.

2.3.4.1 Depósito y pretratamiento de residuos

Inicialmente se requiere disponer de los residuos que alimentarán al sistema idealmente en un depósito para facilitar su cuantificación y dimensionado de acuerdo con el TRH. Durante la recolección de los residuos se debe separar otro tipo de materiales como rocas, piedras, arena, tierra o paja (FIRCO, 2009). En el caso de los sistemas de tipo continuo (sección 2.3.4.2) esta actividad debe realizarse diario o cada tercer día.

Una vez que la materia prima sea recolectada y cuantificada, se someterá a un proceso de molienda o trituración que permita igualar el tamaño de las partículas y asegurar el contacto entre el sustrato y las bacterias anaeróbicas (Velasco, 2016). La elección de este sistema dependerá del tipo y cantidad de biomasa que será utilizada. El tanque del depósito residual puede estar conectado con el sistema de trituración a través de un canal o rampa para facilitar el abastecimiento por gravedad. Esta última recomendación es aplicable en cualquier parte del sistema mientras las condiciones del suelo lo permitan o se adapten a tal requerimiento, en caso de no ser posible se hará uso de una bomba.

Posteriormente los residuos se enviarán al tanque de mezclado junto con el agua residual necesaria para obtener la concentración del 8-12% de sólidos totales en la mezcla completa.

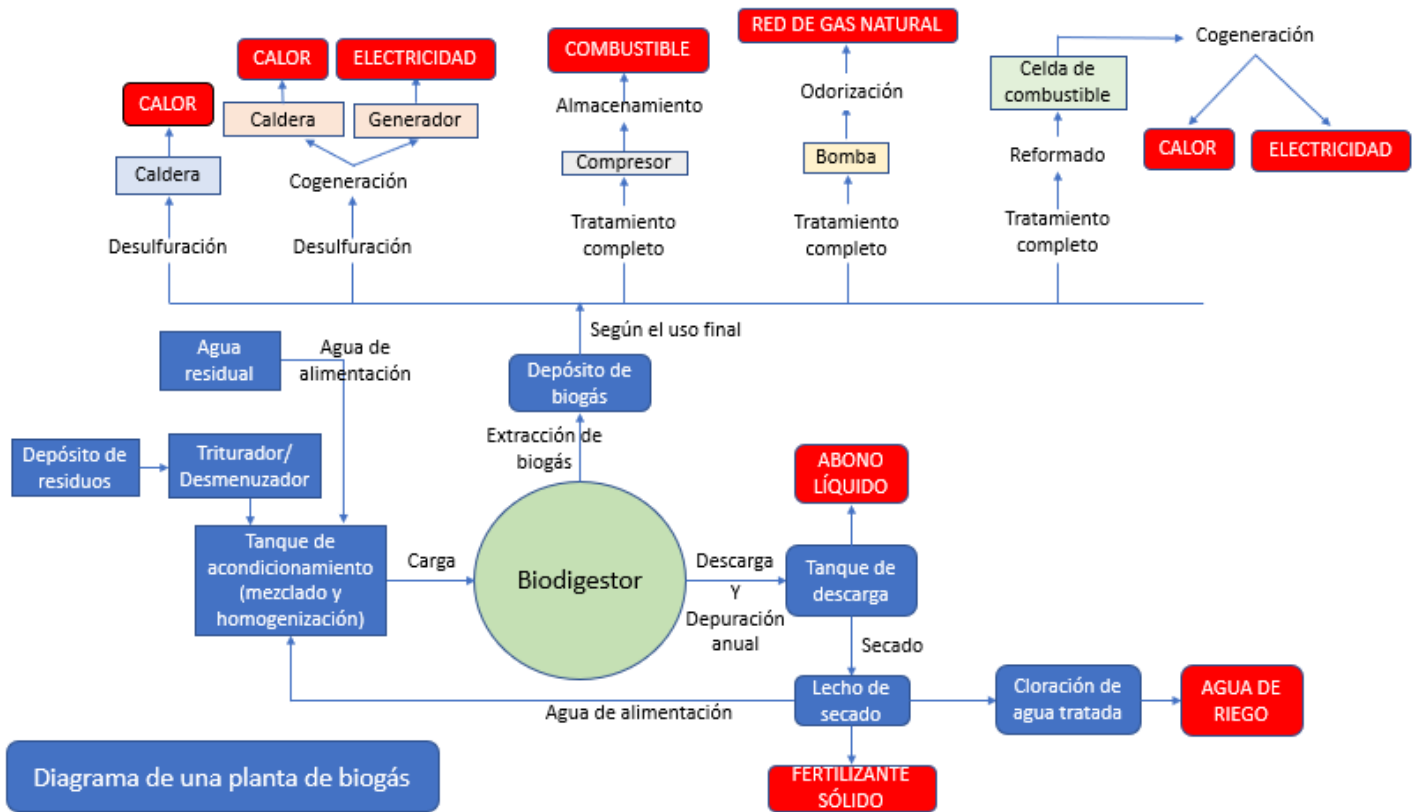


Figura 2.6 Elementos de un sistema de biodigestión. Elaboración propia con datos de (Velasco, 2016).

Ahí el agua y los residuos molidos serán mezclados homogéneamente para ser enviados al reactor.

2.3.4.2 Reactor, operación y control

Está constituido principalmente por un contenedor cerrado, hermético e impermeable llamado reactor o cámara de digestión, dentro del cual se deposita el desecho orgánico que se va a fermentar en ausencia de oxígeno y diluido en agua, cuenta con una entrada de materia orgánica (afluente) y dos salidas, una de depuración de gas y otra de salida para los bioresiduos (efluente). Su geometría puede ser cilíndrica, cúbica, ovoide o rectangular, aunque actualmente la mayor parte es de forma cilíndrica y los materiales utilizados pueden ir desde concreto, acero inoxidable, PVC y piscinas cubiertas de HDPE (FAO, 2011).

Los tipos de biodigestores pueden clasificarse de acuerdo con el proceso de carga de la materia orgánica lo que influirá directamente en los materiales y el diseño y cuya elección dependerá principalmente del tipo y cantidad de materia prima. A continuación, se describen algunos modelos:

A) Biodigestores continuos

En estos sistemas la cantidad de materia orgánica se ingresa de manera constante o diaria, al igual que la extracción del gas. El tiempo en que se mantiene la biomasa dentro del reactor es corto en comparación con los sistemas discontinuos. Este tipo de sistemas es recomendable para quienes tienen animales de granja o huertos (Abate, 2015). Dentro de estos sistemas se encuentran los llamados biodigestores tipo laguna, tubulares o salchicha, de cúpula fija (chino), de cúpula móvil (indio), flotante y de lecho de lodos (ver Figura 2.7).

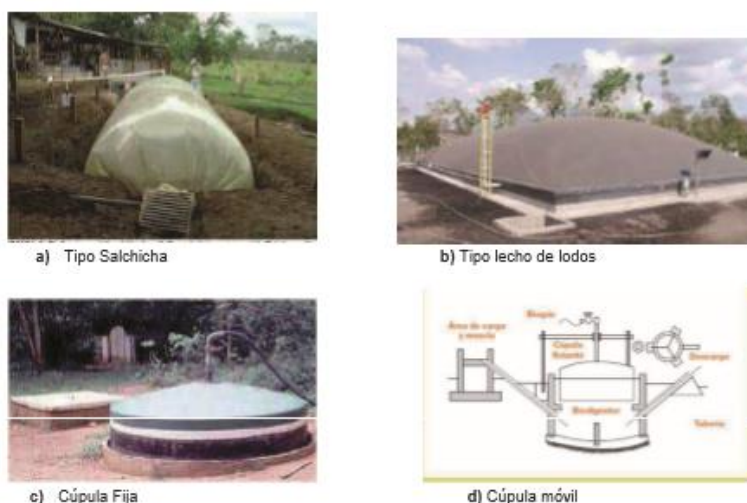


Figura 2.7 Ejemplos de biodigestores continuos. Foto de Sergio Damián Abate, UNRN

B) Biodigestores semicontinuos o por lotes/etapas

Este tipo consta de 2 biodigestores en serie en los que se divide el proceso de degradación. En el primero se llevará a cabo la mayor parte del proceso digestivo por lo que el TRH será mayor que en el segundo donde se terminará el proceso y se producirá el biogás. Como ejemplo se encuentran los sistemas modulares o por lotes. El tipo de materia prima puede ir desde desechos de comida, residuos sólidos urbanos (RSU) hasta residuos agropecuarios (ver Figura 2.8).

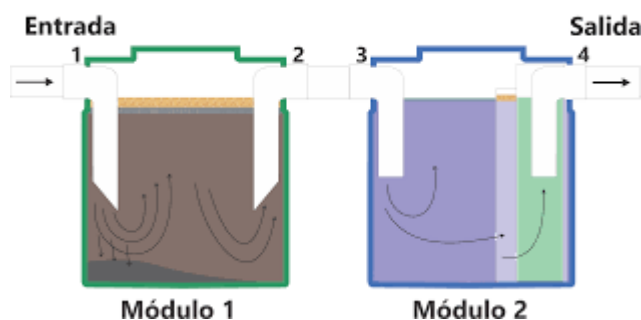


Figura 2.8 Biodigestor de doble cámara. Fuente: (Rotomoldeo, 2017)

C) Discontinuos, de régimen estacionario

Los sistemas discontinuos son capaces de mantener la materia en el reactor por periodos prolongados (2-4 meses), por lo cual, la carga de materia entra y sale sólo una vez, por ejemplo, los llamados biodigestores tipo Batch. La ventaja de este tipo de biodigestores es que no se tienen que alimentar diariamente y requieren menor seguimiento y mantenimiento, siempre y cuando se mantengan controladas las condiciones de trabajo. Es recomendable para aplicaciones industriales o municipales (ver Figura 2.9).



Figura 2.9 Biodigestor discontinuo. Foto: Fernando Bustos Olivera. RMR Perú, 2011.

En los biodigestores instalados en México la tecnología reportada más utilizada es la de tipo laguna (94.2%), seguida de la modular y la de tipo bolsa (FIRCO, 2009).

Conforme a lo anterior, la descripción a lo largo de las siguientes secciones se basa en los sistemas tipo laguna cubierta (geomembrana).

2.3.4.3 Agitación y calentamiento

Con el fin de garantizar una correcta operación del sistema y aumentar al máximo la producción de biogás se recurre a sistemas adicionales al reactor que auxilian el proceso de digestión, uno de ellos es el de agitación, el cual se puede llevar a cabo a través de 3 principios de funcionamiento (FAO, 2011):

- a) Mecánico: Se realiza a través de agitadores manuales o motores eléctricos
- b) Hidráulico: Por medio de bombas de flujo lento de recirculación de biomasa
- c) Burbujeo de biogás: A través de la recirculación del biogás producido al fondo del biodigestor mediante tuberías para producir un burbujeo que movilice la biomasa.

Otro componente importante (opcional) es el sistema de calentamiento, que se recomienda utilizar en los casos en los que la temperatura promedio del lugar se encuentra por debajo del rango mesofílico (25-35°C).

La utilización del biogás obtenido para alimentar un sistema de calentamiento es lo más recomendable ya que no se requeriría de un combustible adicional, esto se logra a través de la circulación de agua caliente proveniente de una caldera, en un intercambiador de calor

(Pérez, 2010). Otro método menos estudiado, pero con gran potencial es la implementación de tecnologías de fuentes renovables de energía como los colectores solares, que de igual forma utilicen agua como fluido de trabajo y que pueden suplir o combinarse con el anterior y así disminuir la dependencia de un solo sistema.

Con cualquiera de las opciones se debe tomar en cuenta el gasto de combustible que implicaría abastecer el calor únicamente con el biogás, restándolo de otras aplicaciones. Una ventaja es que no se requieren temperaturas y gradientes altos para esta función.

2.3.4.4 Reguladores e instrumentos de medición

Con el fin de monitorear las condiciones de operación del proceso se debe contar con un sistema de control a través de diferentes puntos de muestreo en el reactor (SEMARNAT, 2010) que mida los parámetros de presión (manómetro), temperatura interna (termopares), pH y otros parámetros fisicoquímicos del afluente y efluente.

2.3.4.5 Tuberías

El biodigestor deberá contar con un sistema de tuberías, empezando por la tubería del influente que conectará el tanque de mezclado con la entrada de alimentación del biodigestor, esta tubería se dimensionará en función del gasto diario del influente (m^3/h o l/h) y el tamaño de partícula. El material para esta tubería puede ser PVC tipo norma o alcantarillado. En este punto también se debe contar con un registro para verificar el flujo y permita el acceso a la tubería en caso de taponamientos (SEMARNAT, 2010).

La tubería de conducción de biogás se debe seleccionar con un espesor suficiente para soportar la presión de diseño del biodigestor y resistir cargas externas previstas, además de las características termodinámicas del gas. En este caso también pueden utilizarse conductos de PVC, polietileno de alta densidad, polipropileno, o cualquier otro material que resista la corrosión (con RD 26 o 3" - 12").

La tubería del efluente se dimensionará bajo los mismos criterios que la tubería del influente.

Por último, se instalará una tubería de extracción de sólidos para remover el material sedimentado en el interior del digestor, esta será paralela a la pared interior del biodigestor para poder extraer los sólidos del fondo. Se debe localizar a 60 cm de profundidad sobre la corona y a 1 m del talud, hecha de PVC hidráulico (céd 40 o RD 26.5) de 4" de diámetro. Sobre esta, se conectará una bomba con la capacidad de extraer el volumen total de lodos (SEMARNAT, 2010).

En la Sección 2.3.5.2 se especifica la normatividad a seguir para la elección y diseño de este y otros componentes del sistema.

2.3.4.6 Separadores de sedimentos

El separador de sedimentos consiste en un contenedor situado en la parte superior del digestor que se une con la cúpula de gas donde la humedad del gas y trozos grandes de algunos elementos quedan retenidos para evitar su entrada al sistema de gas.

2.3.4.7 Sistema de gas

En cuanto a la producción de biogás, se cuenta con un sistema encargado de su traslado que va desde su origen en el reactor hasta el punto de almacenamiento para su consumo posterior.

El sistema de biogás se conforma por una cúpula, domo o campana en la parte superior del digestor, en el caso de los sistemas tipo laguna, esta cúpula está hecha de un material denominado geomembrana (GSI, 2016) hecha de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) cuyos criterios mínimos a cumplir se especifican en la Tabla 2.8.

Adicionalmente el proveedor y/o instalador deberá garantizar la resistencia de la geomembrana a factores climáticos y las características del biogás; presentar certificados de calidad de las pruebas de inicio, rendimiento y destructivas (presión de aire y vacío).

| Tabla 2.8 Propiedades básicas para la selección de la geomembrana. Fuente: (SEMARNAT, 2010) | |
|---|-------|
| Propiedad | Valor |
| Densidad (kg/m ³) | 940 |
| Resistencia al agarre (N) | 210 |
| Resistencia al Límite elástico (N/mm) | 25 |
| Estiramiento al Límite elástico (%) | 13 |
| Resistencia a la rotura (N/mm) | 43 |
| Estiramiento a la rotura (%) | 700 |

El espesor deberá tener al menos 60 milésimas de pulgada de espesor tanto en la base como en la cubierta. La vida útil de estos domos va desde 10 hasta más de 20 años.

Válvulas y elementos de seguridad

Para mantener el biogás en condiciones seguras de operación, el sistema de gas contará con al menos una válvula de seguridad en caso de que la presión del gas exceda el límite del tanque de almacenaje, y de este modo se deje escapar durante algunos minutos antes de romper el cierre de agua. También con una válvula rompedora de vacío que cumpla con la misma función sólo que para presiones negativas. En tercer lugar, se colocará una válvula térmica que actuará en caso de que surja una llama de la cúpula de gas y genere el calor suficiente para fundir un fusible de la válvula, este a su vez cortará el paso del gas (SEMARNAT, 2010).

Por último, se colocarán apagallamas en las zonas de mayor exposición y peligro al paso de los gases, como por ejemplo entre cada válvula, después del separador de sedimentos (en la tubería de gas), en el quemador de gases sobrantes y delante de cada caldera o llama (FAO, 2011).

Filtros

La limpieza básica recomendada para cualquiera de los usos finales del biogás consiste en la colocación de filtros en la salida del biodigestor correspondiente al flujo de combustible y antes de cualquier otro tratamiento para prevenir el deterioro de los dispositivos posteriores. Primeramente, se necesita un filtro, trampa o purgador del agua condensada que se encuentra en el gas, ya que puede causar corrosión al generar ácidos en los componentes mecánicos. Algunas técnicas para la retención del agua pueden ser simples y de bajo costo como lo es la utilización de un absorbente de líquidos, por ejemplo, la sílica gel, o las trampas de humedad con sales (Paniagua S., Gamboa, & Téllez, 2017), ambas sustancias se regeneran y son auxiliadas por la diferencia de gravedad en las tuberías.

En segundo lugar, se requiere remover el ácido sulfhídrico precursor del ácido sulfúrico, causante de la corrosión y de la disminución del tiempo de vida útil de los equipos (SEMARNAT, 2009). Además de producir un olor desagradable es altamente tóxico y venenoso para los seres vivos. Este filtro es seleccionado de acuerdo con el volumen del biogás producido, y la concentración del ácido sulfúrico. La tecnología más común consiste en un recipiente hermético, relleno con material de hierro que forme un lecho poroso que logre retener la sustancia, generalmente son de bajo costo.

Otros componentes para remover en el biogás previo a su aplicación final son los óxidos de azufre, este procedimiento es requerido en caso de que el biogás sea destinado a su uso como combustible en motores, turbinas o pilas, ya que pueden ser causantes de la oxidación de los equipos (Ontiveros, 2007). Algunos métodos utilizados para este fin son las reacciones controladas a través de esponjas de hierro o zeolitas que son de las más utilizadas y baratas, la adsorción por carbón activado y la eliminación biológica que son sofisticadas y menos comunes, por lo mismo aumentan considerablemente el costo del biodigestor, y por último la absorción con sosa cáustica la cual no es renovable.

Por último, el dióxido de carbono que por un lado es uno de los GEI con mayor impacto ambiental y disminuye la flamabilidad del biogás, sin embargo, juega el papel de agente extintor al enfriar el fuego y dificultar el contacto con el oxígeno. En algunos casos se recomienda su remoción (Ontiveros, 2007) debido a que no tiene ningún valor calorífico y su presencia disminuye el contenido energético del biogás por unidad de volumen, además de que en reacción con el agua puede formar sustancias corrosivas. Algunas técnicas utilizadas para remover el CO₂ son el “endulzamiento” por adsorción, las zeolitas, el lavado

a presión, el uso de cal y carbón activado (Paniagua S., Gamboa, & Téllez, 2017). Una ventaja de separar el dióxido de carbono es que este también puede ser un subproducto de valor agregado.

Medidores de biogás

El propósito de estos equipos es cuantificar en todo momento el flujo de biogás hacia los sistemas de almacenamiento y aprovechamiento. Su selección va a depender de diversos factores como la cantidad de biogás producida, la ubicación, la concentración de metano, entre otros. Existen diversos tipos, que van desde fuelles y molinetes, aunque se recomienda instalar medidores digitales que faciliten y transfieran los datos para su procesamiento en computadora (FAO, 2011).

Manómetros y reguladores de presión

Además de los manómetros colocados para medir la presión interna del reactor, se requiere su instalación en otros puntos de flujo para indicar la presión del biogás, de igual manera se instalarán reguladores de presión (antes y después del quemador de gases sobrantes y en calderas, calentadores y motores). Los más comunes son tipo diafragma, en los cuales se establece una columna de agua que al rebasar los 20 cm abre el regulador dejando que el gas sobrante pase al quemador (FAO, 2011).

Almacenamiento del gas

Además de la cúpula de gas en algunos casos se puede implementar un tanque de almacenamiento de biogás como lo es un gasómetro, estos pueden ser a presión (3.4 atm) o de cubierta flotante (SEMARNAT, 2010). La ventaja de estos equipos es que se puede disponer del gas en cantidad suficiente para la aplicación que se requiera.

Quemador de gases sobrantes

Una antorcha o quemador de gases se necesitará para eliminar los gases que se encuentren en exceso en el sistema de digestión para que cualquier excedente que pase por el regulador se quemé a través de una llama piloto (FAO, 2011).

Usos finales

Dependiendo de los usos finales del gas (figura 2.6) se requerirá dimensionar y diseñar elementos adicionales para los cuales se seguirá la normativa vigente en dicha aplicación, ya sean calderas para su uso como fuente de calor; generadores eléctricos de acuerdo con la cantidad de gas generado y la potencia requerida; compresores y filtros adicionales de limpieza como sustituto o complemento de combustible; sistemas de bombeo y remoción de sustancias contaminantes para la distribución en la red de gas natural y el reformado en celdas de combustible para la cogeneración de energía.

2.3.4.8 Muestreador

Con el fin de monitorear las condiciones de la digestión se instalará una tubería que atraviese el reactor (8-10 cm de diámetro y profundidad de 30 cm en los lodos). Con este sistema se tomarán las muestras del lodo en el momento que sea requerido, sin perder presión o desestabilizar el ambiente bacteriano de digestión (FAO, 2011).

2.3.4.9 Descarga

La descarga del residuo orgánico se realizará a través de un ducto que expulsará el material ya procesado a causa de la presión ejercida en el otro extremo del reactor (ducto de entrada), como un efecto del principio de Pascal. Los lodos serán dirigidos a un tanque de descarga del que pueden utilizarse directamente como abono líquido o enviarse a una cama o lecho de secado para que a través de diversos métodos de secado (como los sistemas de secado solar directo o indirecto y de foto oxidación) se lleve a cabo la fijación de nutrientes en lo que resultaría un fertilizante sólido.

En condiciones controladas el agua obtenida de la descarga contiene una Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) adecuada para su reincorporación a la tierra como agua de riego (150 mg/l promedio mensual) y con tratamientos posteriores de remoción de contaminantes se puede reutilizar en el biodigestor e incluso en otras aplicaciones (SEMARNAT, 2017) como agua tratada (75 mg/l promedio mensual).

2.3.4.10 Mantenimiento

En los digestores de carga continua se recomienda que cuando el reactor sea vaciado por completo se realice un mantenimiento general del sistema (Velasco, 2016), que incluya los siguientes puntos:

- Raspar la superficie del fondo y en caso de roturas aplicar varias capas de pasta de cemento.
- Lavar la cámara de digestión al finalizar la reparación de roturas o directamente en caso de no haberlas.
- Cuando se producen filtraciones en tuberías y demás elementos se deberán quitar, reparar y fijar nuevamente.
- Revisar y reparar filtraciones de agua y aire

De forma periódica se sugiere (FAO, 2011):

- Realizar inspecciones del estado de la cubierta para evitar rasgaduras, fugas, acumulación de agua u otros daños.
- Verificar diariamente las tuberías, válvulas y equipo de medición en todo el sistema para detectar y reparar daños de forma inmediata.

- Revisar que los filtros y trampas no estén saturados y reemplazarlos de acuerdo con los datos del fabricante.
- Hacer limpieza y ajuste de las válvulas
- Lavar el depósito donde se hacen las mezclas de la materia prima, con agua limpia
- Remover basura y escombros de los elementos expuestos al aire para evitar su deterioro y/o mal funcionamiento.

Y en general seguir las recomendaciones de los fabricantes para cada uno de los equipos instalados.

2.3.4.11 Seguridad

Las medidas de seguridad básicas (SEMARNAT, 2010) incluyen la restricción del acceso personal no capacitado, establecer un cerco perimetral de por lo menos 2 m de altura al menos alrededor del sistema de biogás, ubicar el quemador al menos a 30 metros del digestor, colocar las señalizaciones de acceso restringido, peligro por gas y no fumar, instalar sellos hidráulicos y etiquetar con colores adecuados en las tuberías, e indicar la dirección y tipo de fluido en cada tubería.

También se deberá determinar el riesgo de incendio y colocar los equipos adecuados contra incendios, así como las señalizaciones indicadas.

En cuanto al personal, este debe portar la vestimenta adecuada: casco, overol y zapatos de seguridad, y respirador o mascarilla contra gases en el caso de la exposición al sistema de gas.

En el caso de las instalaciones eléctricas se deberá contar con una caseta de seguridad de acceso restringido, situada a no menos de 30 m del biodigestor.

A rasgos generales el personal debe ser capacitado para enfrentar cualquiera de los riesgos descritos anteriormente, así como en las medidas de seguridad antes y durante la operación del sistema (SEMARNAT, 2010).

2.3.5 Regulación de diseño y construcción

El proceso desde el diseño, instalación, puesta en marcha y disposición de los productos de un biodigestor están sujetos a la regulación técnica y legislativa vigentes de cada país, a continuación, se enlistan las normas oficiales mexicanas y leyes involucradas en cuanto a los sistemas de biodigestión en México.

2.3.5.1 Legislación vigente

- a) La **Ley General para el Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)** a través de sus reglamentos establece los términos en los cuales, de acuerdo con la magnitud

del Proyecto, la Unidad Productiva deberá presentar una evaluación de Impacto Ambiental o un informe preventivo.

Así mismo, el sitio deberá darse de alta como “empresa con actividades altamente riesgosas” y presentar ante la SEMARNAT un estudio de riesgo y programa de prevención de accidentes cuando se trate de proyectos diseñados para generar, manejar y usar 500 kg de metano en adelante, de acuerdo con el “Segundo Listado de Actividades Altamente Riesgosas” emitido por dicha instancia.

b) A través del manual de “**Especificaciones Técnicas para el Diseño y Construcción de Biodigestores en México**” publicado en 2010 por SEMARNAT y SAGARPA en conjunto con FIRCO se establecen las restricciones mínimas para la ubicación de un biodigestor (de tipo laguna cubierta), que se citan a continuación:

- 1) Evitar la cercanía de aeródromos de servicio público o aeropuertos.
- 2) No ubicarlo dentro de áreas naturales protegidas.
- 3) Instalarlo a una distancia mínima de 500 m de cualquier núcleo poblacional.
- 4) No ubicarlo en zonas de marismas, manglares, esteros, pantanos, humedales, estuarios, planicies aluviales, fluviales, recarga de acuíferos, zonas arqueológicas, fracturas o fallas geológicas.
- 5) La distancia con respecto a cuerpos de aguas superficiales con caudal continuo, lagos y lagunas, debe de ser de 500 m como mínimo.
- 6) Se debe localizar fuera de zonas de inundación.
- 7) La ubicación entre el límite del sistema y cualquier pozo de extracción de agua, deberá de ser de 500 m.
- 8) El manto freático deberá encontrarse a una profundidad mínima de 7 metros.

c) Por otro lado, la **Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (LPDB)** establece la promoción en la producción de insumos para bioenergéticos sin comprometer la seguridad y soberanía alimentaria de productos básicos y estratégicos (establecidos por la **Ley de Desarrollo Rural Sustentable**) como el maíz, caña de azúcar, frijol, trigo, arroz, sorgo, café, huevo, leche, carne de bovinos, porcinos, aves y pescado. Dichos lineamientos deberán seguirse por toda persona que se dedique a las actividades de producción, comercialización, distribución, transporte y almacenamiento de manera individual o colectiva con el fin de reactivar el sector rural, la generación de empleo y una mejor calidad de vida.

Además, se establecen los permisos otorgados por la SENER, requeridos para la operación de las actividades relacionadas con los bioenergéticos, así como su revocación y las sanciones establecidas en caso del incumplimiento de las normas y los términos del Reglamento de la LPDB.

- d) La **Ley Federal de Sanidad** estipula el procedimiento y requerimientos para la aplicación de los lodos residuales en terrenos con fines agrícolas y de mejoramiento de suelos.
- e) La **Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos**. Conviene fomentar la valorización de residuos, así como el desarrollo de mercados de subproductos, bajo criterios de eficiencia ambiental, tecnológica y económica, y esquemas de financiamiento adecuados.
- f) Por último, la **Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS)** establece que las actividades y el aprovechamiento de los recursos o materias primas forestales (como la madera, carbón vegetal, leñas, ramas, entre otras) deben ajustarse a las prácticas establecidas en el Reglamento de la LGDFS para un manejo sustentable que procure la conservación de los bosques.

2.3.5.2 Normatividad vigente

a) La **NOM-003-SECRE-2002** establece los criterios técnicos para la selección de tuberías de conducción del biogás, de acuerdo con el contenido de metano (apartado 5.1) y el material.

b) El Instituto de Investigación en Geosintéticos especifica los requerimientos de la geomembrana utilizada en los biodigestores tipo laguna, a través de los estándares GM13 y GM17, así como lineamientos a seguir para los certificados (pruebas de inicio, rendimiento y destructivas con presión de aire y de vacío) que deben ser presentados por los instaladores de la cubierta. De ser posible, los instaladores de la geomembrana deberán estar certificados por la Asociación Internacional de Instaladores de Geosintéticos (IAGI).

c) La **NOM-085-SEMARNAT-1994** deberá seguirse para la determinación de contaminantes en forma de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno y sus límites máximos permisibles, en función de la capacidad del quemador y de la localización geográfica del proyecto.

d) La **NOM-001-SEDE-2005** determinará el diseño, instalación, dispositivos, seguridad y operación de la instalación eléctrica para el aprovechamiento energético del biogás. En particular lo establecido en el artículo 110 sobre los Requisitos de las Instalaciones Eléctricas, Inciso A, en cuanto a: Instalación y uso de los equipos, niveles de tensión, tensión eléctrica nominal de utilización, conductores, aislamiento, ejecución mecánica de los trabajos, montaje y enfriamiento de equipo, sistema de alambrado, cargas eléctricas, balanceo entre líneas; el artículo 445 para Generadores; el artículo 705 para Fuentes de Producción de Energía Eléctrica Conectada en los rubros de Protección contra

sobrecorriente, capacidad de conducción de corriente de los conductores, características de la energía generada, sistema de sincronización; el artículo 380 para desconectores y protecciones; artículo 430-141 para la puesta a tierra para todas las tensiones eléctricas y el artículo 280 para apartarrayos.

e) A través de la **NOM-001-SEMARNAT-1996** se determinarán los Límites Máximos Permisibles de Contaminantes Básicos, Metales Pesados, Contenidos de patógenos y parásitos en la descarga de aguas residuales del biodigestor destinada a ríos, embalses naturales y artificiales, aguas costeras, humedales naturales y su uso en riego agrícola. Cuando los efluentes sean destinados al alcantarillado urbano o municipal se seguirá la **NOM-002-SEMARNAT-1996**. Para las aguas que se reusarán en servicios públicos se deberán acatar los límites establecidos en la **NOM-003-SEMARNAT-1996**.

En cada una de las normas anteriores se especifican también los métodos de muestreo, número de muestras y metodologías de análisis.

f) La utilización, metodologías de muestreo y análisis para determinar el tipo de lodos de digestión, así como los límites máximos permisibles de metales pesados, cantidad de coliformes fecales, presencia de *Salmonella* y cantidad de huevos de helmintos en el residuo orgánico son estipulados en la **NOM-004-SEMARNAT-2002**.

g) En la **NOM-026-STPS-2008** se realiza una clasificación de seguridad en tuberías por colores de acuerdo con el riesgo del fluido. En el caso del biogás la tubería debe ser color amarillo, por ser un fluido “peligroso” de características inflamables, explosivas y de alta presión. También se especifica el texto a colocar para identificar el fluido.

h) La **NOM-002-STPS-2000** asienta el grado de riesgo de incendio y las zonas para colocar extintores y el tipo de equipos contra incendios indicado para cada sistema.

2.3.6 Retos y oportunidades en la implementación de biodigestores

El consumo de biomasa destinada a su uso en biodigestores, así como otras tecnologías de aprovechamiento bioenergético, enfrentan barreras de diversos tipos que deben ser abordadas desde distintos sectores como nichos de oportunidad, para lograr que estos sistemas sean desarrollados e implementados de forma sustentable (Masera, 2006):

2.3.6.1 Barreras

2.3.6.1.1 Regulatorias e institucionales

En México existe una política pública deficiente orientada hacia el aprovechamiento de la bioenergía, esto se refleja en la inexistencia de un marco jurídico específico o de incentivos fiscales particulares. Los esquemas de incentivos legales, financieros e impositivos aplicados para el biogás en México sólo existen en los rubros de *Inversión o de créditos fiscales a la*

producción y en Inversión pública, préstamos o donaciones. Mientras que los incentivos en subsidio de capital, concesión o rebaja; reducción en ventas, energía, CO2 y pago de producción de energía, son inexistentes (Teymoori & Amjady, 2017).

Algunos aspectos en las leyes están relacionadas al tema de los biodigestores, pero no terminan siendo instrumentos claros, ni la favorecen.

Otra de las principales barreras institucionales es que la política energética en el país es priorizada por encima de la política ambiental, al considerarse el desarrollo energético como desarrollo económico y optar por tecnologías más “baratas” y ya conocidas para la generación energética, en lugar de las más “limpias”.

Por otra parte, la falta de coordinación institucional y objetivos en común entre los diferentes sectores frenan el desarrollo integral de la bioenergía.

El esfuerzo por promover la bioenergía ha recaído en iniciativas individuales y organizaciones independientes, como consecuencia se tiene una ausencia de mecanismos específicos de financiamiento para la investigación y el desarrollo, así como escasos grupos de investigación con recursos limitados y pobre desarrollo tecnológico.

2.3.6.1.2 Sociales y culturales

Un factor determinante para establecer la sustentabilidad en el uso de la biomasa es asegurar que la materia prima destinada a la producción de bioenergéticos no comprometa la seguridad alimentaria, tal como lo establece la LDPB. Al estar en riesgo la suficiencia alimentaria, se tiene que optar por alternativas que en ocasiones implican una mayor complejidad en la operación o costos.

A su vez, el uso de bioenergéticos no siempre está asociado con mejores condiciones para las poblaciones rurales, como generación de empleos locales o acceso a energía de calidad.

El hecho de que México sea un país con abundantes recursos no renovables como el petróleo y el gas natural genera la idea de que se cuenta con recursos ilimitados por lo que las alternativas para sustituirlos no son altamente promovidas y apoyadas.

La leña es uno de los recursos de biomasa más utilizados, sobre todo en comunidades rurales, lo que se asocia a un bajo nivel económico, por lo que su desarrollo es percibido como negativo o un sinónimo de subdesarrollo. Además, su uso en el sector rural es en su mayoría debido a la escasez de otros recursos y a las costumbres arraigadas, por lo cual la inserción de tecnologías eficientes de aprovechamiento de biomasa es una tarea compleja.

2.3.6.1.3 Económicas

La electricidad en México cuenta con subsidios de diferente porcentaje para cada una de las tarifas domésticas, industriales y comerciales, debido a lo cual el precio final de los energéticos no refleja sus costos, y bajo este esquema la rentabilidad de los proyectos se ve reducida.

Siendo los usuarios del sector rural los mayores consumidores de biomasa, su poder adquisitivo es bajo y la posibilidad de pagar por tecnologías aun siendo las más básicas es limitada (RMB, 2011).

Los costos en proyectos de tecnologías de fuentes renovables de energía siguen siendo mayores a los de fuentes convencionales en parte a la poca experiencia en cuanto a evaluación de impacto ambiental, trámites de pequeña y gran escala y sobre todo al personal capacitado en el área que se requiere para su instalación, sumado a la ausencia de incentivos fiscales y subsidios en este sector.

2.3.6.1.4 Ambientales

Las tecnologías de aprovechamiento de energías renovables se consideran limpias siempre y cuando cumplan con algunos requerimientos durante su ciclo de vida, en el caso de la bioenergía, se considera que la explotación de las tierras que se destinen a la producción de bioenergéticos en el aspecto ambiental debe limitarse para evitar la sobreexplotación y conducir a problemas como a la deforestación por monocultivos.

En el caso en que la explotación sea justificada, se requiere de una mitigación efectiva del daño ambiental que este pueda ocasionar.

2.3.6.1.5 Técnicas

Actualmente, los bancos de datos confiables sobre recursos de bioenergía son pocos e imprecisos lo cual representa una barrera técnica importante para el desarrollo de proyectos en el área, esto se debe en parte al bajo nivel de investigación y trae como consecuencia un bajo desarrollo de tecnologías sobre todo en áreas rurales.

Otro reto se deriva de la falta de electrificación en comunidades aisladas, dado que para ser incorporadas a la red eléctrica se prioriza la extensión de la red a través de tecnologías convencionales y se reduce la participación de energías renovables mediante generación distribuida o sistemas independientes.

Hasta el 2009 en México, únicamente el 8% de las granjas porcícolas formales contaban con un sistema de biodigestión (SAGARPA, 2009).

El análisis del diseño de los biodigestores arroja que el 47% de los biodigestores instalados en el país no se encuentra diseñado correctamente y por lo tanto su funcionamiento es deficiente. Esto se debe al sobredimensionamiento de la capacidad del biodigestor debido a cálculos basados en la capacidad instalada y no en el inventario real de la unidad de producción (regularmente las granjas tienen un porcentaje de ocupación del 40% en promedio), considerando tiempos de retenciones mayores a 60 días y una relación agua-excreta mayor a 9:1.

Otras fallas técnicas comunes registradas son fallas en los sistemas de agitación, falla en el quemador y falta de mantenimiento regular.

2.3.6.2 Oportunidades

Las problemáticas antes descritas representan oportunidades de desarrollo en cada uno de los sectores que intervienen, que pueden ser resumidas en 5 ejes principales de acción, con base en la experiencia en otros países (RMB, 2011):

- Partir de un enfoque integrado hacia el uso sustentable.
- Desarrollar un marco regulatorio que incluya metas claras y un conjunto de incentivos fiscales, así como facilidades para realizar inversión.
- Impulsar el desarrollo de mercados de productos y tecnologías asociados a la bioenergía.
- Fomentar la investigación, el desarrollo tecnológico y la formación de redes de trabajo.
- Promover el fortalecimiento institucional y campañas de información pública en vías de una mejor valoración social de la bioenergía.

Actualmente casi un 15% de personas en el mundo en poblaciones urbanas y 27% en poblaciones rurales no tiene acceso a la energía eléctrica (BancoMundial, 2018), por lo cual, el uso de tecnologías alternas promueve una solución de acceso a la energía para al menos 5 millones de personas en México.

A partir del establecimiento de un marco jurídico para los biocombustibles, primero con la Ley de Promoción y desarrollo de los bioenergéticos (2008) y posteriormente con la Reforma Energética (2013), el gobierno federal a través de la Secretaría de Ganadería, Agricultura, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) ha impulsado más de 960 proyectos de biocombustibles en México y destinado más de 275 millones de pesos a la investigación, cultivos y plantas productoras de biocombustibles.

A nivel nacional se promueve la implementación de biodigestores a través de distintos programas de financiamiento derivados de la SAGARPA, como el Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO) para fomentar el uso de las energías renovables en el sector

agropecuario, el Fideicomiso Instituido en Relación con la Agricultura (FIRA), y la Financiera Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero (FND).

De estos programas se derivan componentes específicos de apoyo, PROGAN es uno de los más recientes (SAGARPA, 2018) y su objetivo es brindar servicios y apoyo a las Unidades Económicas Pecuarias para incentivar su productividad.

Así mismo, el Proyecto de Apoyo al Valor Agregado de agronegocios con esquema de riesgo compartido (PROVAR), fue creado para apoyar a empresas y personas en la construcción de biodigestores hasta con un millón de pesos o hasta 250 mil pesos para generar electricidad con un aporte del 50% o más de los beneficiarios. Para productores primarios y empresarios del sector rural, con unidades productivas lecheras (al menos 300 vientres en producción) o porcinas (al menos 200 vientres porcinos en sistemas de ciclo completo).

En general, los propietarios de los sistemas de biodigestión activos en México están conscientes de los beneficios que les aporta el contar con biodigestores, el 46% de los encuestados opinan que la generación de energía es el principal beneficio que obtienen de éstos, mientras que el 33% opinan que es la disminución de la contaminación ambiental el beneficio más importante.

Capítulo 3. METODOLOGÍA Y DESARROLLO

Conforme a la legislación y normativa vigente y la información disponible por instancias como SEMARNAT, SAGARPA, FIRCO, la Red Mexicana de Bioenergía, FAO, así como diferentes empresas de instalación de biodigestores y literatura en el área, en este trabajo se propone una metodología que ofrece una solución a la problemática particular presentada, con posibilidad de ser escalada a sistemas similares de mayor o menor tamaño.

La biomasa que puede ser utilizada como materia prima en los biodigestores tiene un origen variado, por lo que en este trabajo se abordan como principales insumos, los residuos provenientes del sector agropecuario, ya sea estiércol de diversas especies ganaderas, algunos residuos de cultivo y restos provenientes de la producción lechera como el suero de leche.

Para poder cuantificar el residuo animal disponible, se requiere identificar la especie de la que proviene, así como la edad, peso y cantidad de alimento. Otros factores como el uso final de la especie, el sistema ganadero y tipo de alimentación determinarán las características bioquímicas de la materia, de ahí que la comparación de resultados en cuanto a rendimiento y calidad de los productos de la digestión sea compleja.

En la tarea de unificar los datos de especies ganaderas de diversas fuentes, se tomaron en cuenta los siguientes criterios: peso, etapa, edad, tiempo de estación, tasa diaria de excreción por etapa, producción diaria de estiércol, cantidad de materia seca, cantidad de sólidos volátiles y producción potencial de biogás.

3.1 PARAMETROS DE DIMENSIONAMIENTO DE LA BIOMASA

3.1.1 Peso y edad

El peso promedio (Pp) de un animal corresponde a una edad (E) determinada (Vera-Romero, 2014) o a una etapa de crecimiento (SEMARNAT, 2010). En el caso del ganado bovino se realizó una clasificación de acuerdo con la etapa de crecimiento (Ver Anexo 2, tabla A2.1) que abarca desde los 0 a los 3 años, con un peso correspondiente a los 40 kg al nacer y puede alcanzar hasta los 323 kg. Posteriormente en la etapa de madurez se realizó una segunda clasificación con base en la raza (Blanco Ochoa, 2004), tomando en cuenta algunas de las razas más comunes en México destinadas para carne, leche y doble propósito (Ver Anexo 2, tabla A2.2). Así, los vacunos pueden alcanzar un peso de hasta 1200 kg, con un peso promedio de 543 kg para las especies en desarrollo.

En cuanto al ganado porcino, se realizó una sola clasificación de acuerdo con la etapa de crecimiento (Ver Anexo 2 tabla 2.3), que va desde la cuna o pre-inicio, hasta los sementales y hembras lactantes-gestantes (SEMARNAT, 2010). Los pesos varían desde los 2 kg al nacer, hasta los 191 kg, con un promedio de 86.45 kg.

Para otras especies animales tanto de ganado como domésticas, exóticas y seres humanos, se recopiló la información encontrada (Ver Anexo 2 tabla A2.4) en una sola clasificación (Martínez, 2007) por peso, debido a la falta de datos reportados. Aquí se pueden encontrar aves de corral, caprinos y ovinos (Gipuzkoa, 2005) que además de ser especies comunes de cría en el país, también presentan un alto potencial de obtención de biogás a través de sus excretas.

Estos datos se recopilaron y promediaron de la literatura reportada alrededor del mundo con condiciones de semi-estabulación y crianza similares a las que se tiene en el país.

3.1.2 Tiempo de estación

El tiempo de estación o estabulación (T_{est}) variará dependiendo del sistema ganadero, en los sistemas tecnificados o semi-estabulados el tiempo de pastoreo del ganado bovino es en promedio de 8 horas diarias (ICE, 2011), mientras que el ganado porcino permanece confinado las 24 horas del día en los sistemas semi-estabulados, en otras especies el tiempo de estación dependerá de la domesticación o confinamiento, en este caso se supone un tiempo de estación de 24 horas para los porcinos y 16 horas para los bovinos. Este parámetro determina el porcentaje de estiércol que puede ser recolectado a partir del estiércol generado.

3.1.3 Tasa de excreción diaria

Se infiere que la cantidad de estiércol generado (E_g) al día por animales de mayor tamaño será mayor, en función del proceso digestivo y la cantidad proporcionada de alimento diaria.

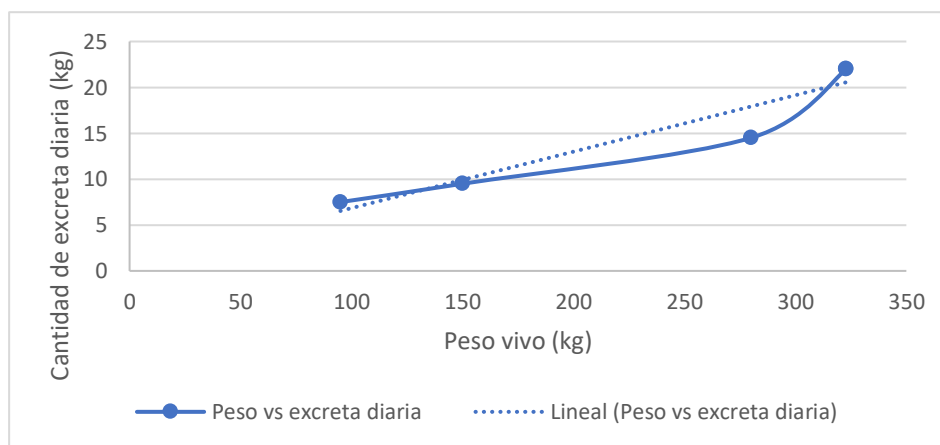


Figura 3.1 Peso vs excreción diaria, bovinos por etapas. Fuente: Elaboración con datos de Tabla A2.1.

En el caso de los bovinos, (ver Figura 3.1) la relación entre el peso y la cantidad de excreta diaria aumenta de manera lineal, tanto en la clasificación por etapas como en la clasificación por raza (ver Figura 3.2) a excepción de las vacas no productivas, que, a pesar de tener un

peso mayor comparado con razas más pequeñas, al no encontrarse en producción tanto su alimentación como sus excreciones son bajas.

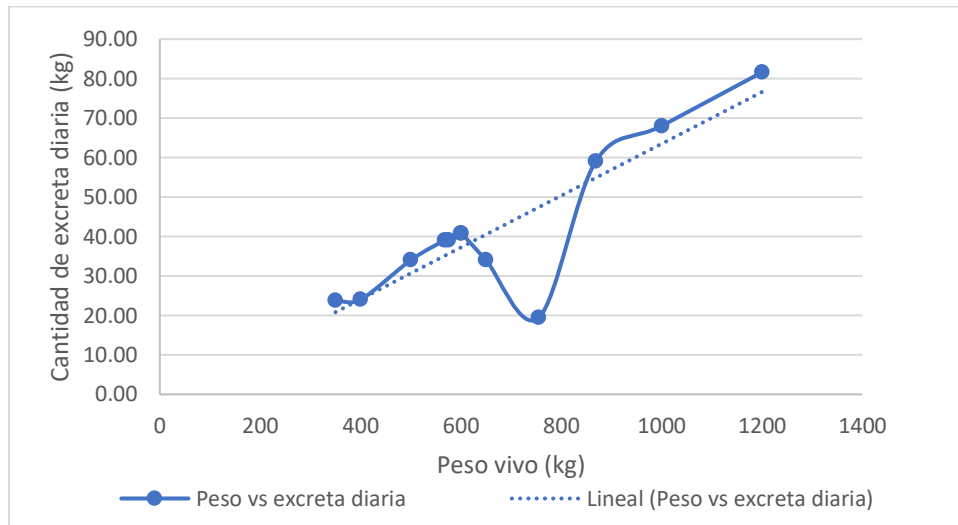


Figura 3.2 Peso vs excreción diaria, bovinos por raza. Fuente: Elaboración con datos de Tabla A2.2.

De igual manera sucede en los porcinos, de acuerdo con los datos reportados (Ver Anexo 2, tabla 3.3) la tendencia es lineal y creciente (ver Figura 3.3), con una cantidad de excretas desde 0.13 kg hasta 15 kg, aunque en algunos casos como en los sementales y hembras gestantes se observa una ligera disminución en la producción de estiércol.

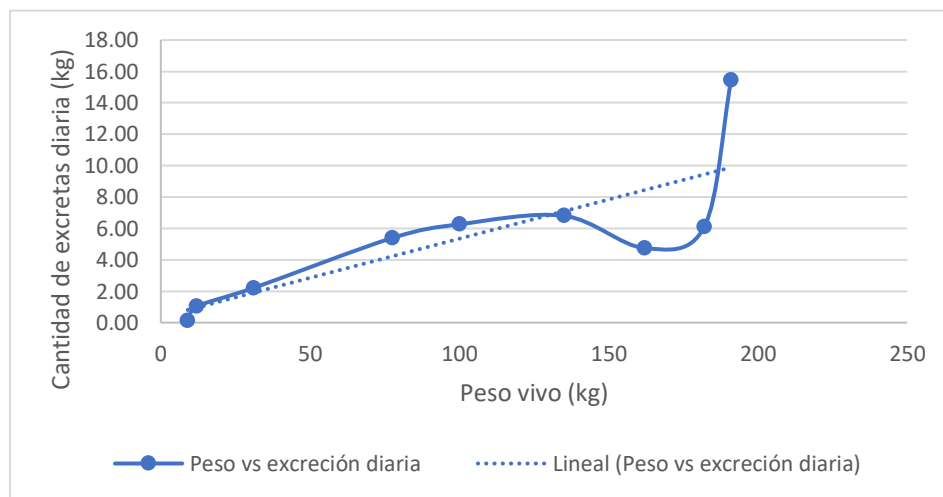


Figura 3.3 Peso vs excreción diaria, porcinos. Fuente: Elaboración con datos de Tabla A2.3.

Se puede apreciar que la relación entre el peso vivo del animal [kg] y la cantidad de excreción diaria [kg], sigue una variación porcentual (T_{ed}), expresada en la ecuación (3.1).

$$T_{ed} = \frac{P_p}{E_g} \quad [\%] \quad (3.1)$$

En los bovinos (ver Figura 3.4) estos valores oscilan entre 2.57% y el 7.89% con un promedio de **6.77%**, es decir que, por cada kg de peso vivo de un bovino, en promedio se obtendrán 0.063 kg de excretas diariamente.

De acuerdo con datos proporcionados por el software UDASys 3.2 se descartaron 5 valores tomados como outliers de la serie de datos, con lo que se obtuvo una desviación estándar de 0.11 y se realizó un ajuste cuadrático con un factor de correlación de Pearson $R=0.56$.

Es decir que los datos obedecen un ajuste polinomial (con un intervalo de confianza del 80%).

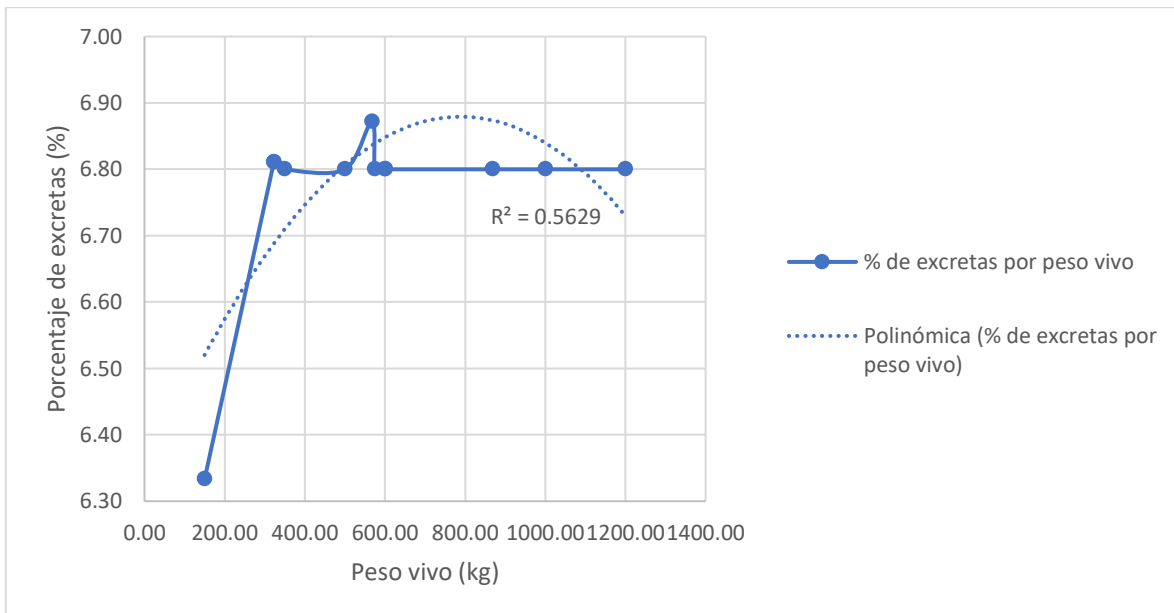


Figura 3.4 Porcentaje de excretas por peso vivo, bovinos.

Para el ganado porcino (ver Figura 3.5) la T_{ed} tiene un valor máximo de 8.6% y un mínimo de 2.9% dando como valor promedio **6.9%**. En este caso con los resultados arrojados por el software, bajo el mismo intervalo de confianza, la dispersión de los datos fue mayor, con una desviación estándar de 1.19, se descartaron 2 outliers del conjunto, y el ajuste cuadrático tuvo un factor de correlación menor.

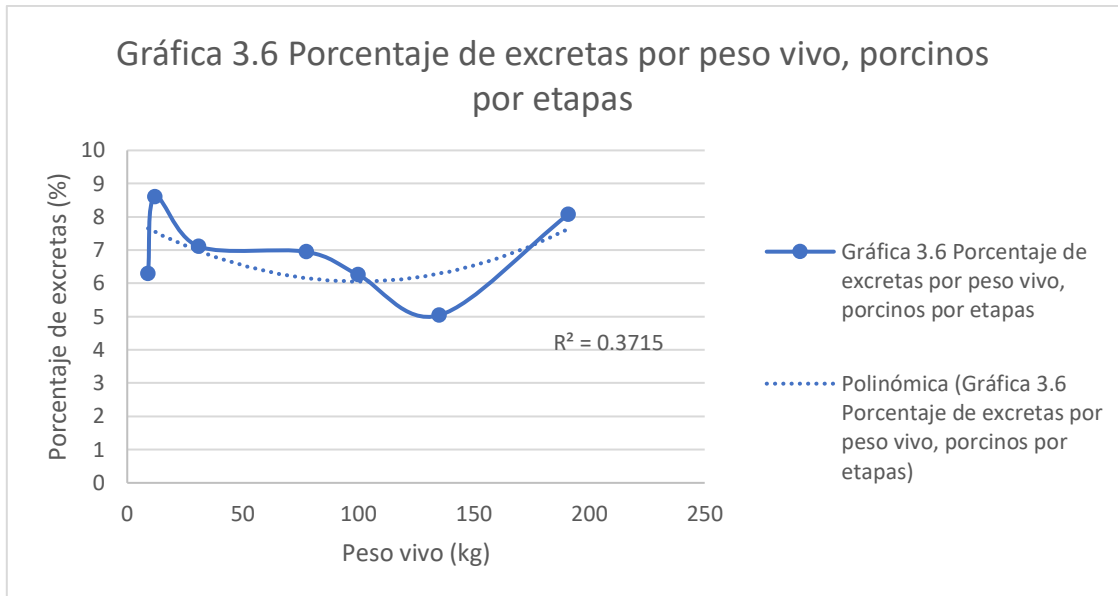


Figura 3.5 Porcentaje de excretas por peso vivo, porcinos.

Este parámetro nos indica que en ambas especies el porcentaje de excretas respecto al peso vivo es del orden del 6%, pero dado el análisis estadístico de los datos, se requeriría una mayor población de datos para aumentar el nivel de confianza del cálculo, por lo que se recomienda que preferentemente se usen los datos (de T_{ed}) de cada especie (y no el promedio) que se reportan en las tablas del Anexo 2. pero dada la diferencia natural en el peso de cada una y aunque el tiempo de estabulación en los porcinos sea nulo, se puede obtener una mayor cantidad de excretas del ganado vacuno.

3.1.4 Cantidad de estiércol generado al día

La E_g para cada especie se muestra en las Tablas A2.1, A2.2, A2.3 y A2.4 del Anexo 2, con base en los valores ya reportados, a través de la T_{ed} obtenida en cada caso se obtuvieron los valores faltantes.

3.1.5 Cantidad de estiércol disponible al día

La E_g representa el potencial de la materia prima, mientras que la E_d se refiere a la cantidad de estiércol aprovechable:

$$E_d = \frac{E_g}{T_{est}} \quad [kg/día] \quad (3.2)$$

3.1.6 Producción de biogás por kg de excreta

La producción de biogás (P_b) es comúnmente reportada por día o por kg de excreta, por lo que en ocasiones al reportarse por día (Vera-Romero, 2014) se carece de parámetros como el tiempo de estabulación o peso del animal.

| Tabla 3.1 Producción de biogás de especies animales. Fuente: Elaboración propia con datos de (Martínez, 2007); (Gipuzkoa, 2005); (Ashraf, 2016) | |
|---|---|
| Especie | Producción de biogás (m ³ x kg de excreta) |
| Gallinas ponedoras | 0.01 |
| Otras aves de corral | 0.015 |
| Elefante | 0.02 |
| Camello | 0.03 |
| Bovino | 0.04 |
| Caballos | 0.04 |
| Pato | 0.05 |
| Paloma | 0.05 |
| Ovino Grande | 0.06 |
| Ovino Mediano | 0.06 |
| Ovino Pequeño | 0.06 |
| Avícola Grande | 0.06 |
| Avícola Mediano | 0.06 |
| Avícola Pequeño | 0.06 |
| Porcino | 0.07 |
| Caprino (Cabras madres) | 0.07 |
| Caprino (Cabritos, chivos) | 0.07 |
| Humano Adulto | 0.07 |
| Humano Niño | 0.07 |

En la Tabla 3.1 se presenta la producción potencial de biogás de las especies animales reportadas por kg de excreta, en función del E_d (Martínez, 2007) y en la Tabla 3.2 se muestra el potencial de producción de biogás para algunos otros insumos orgánicos que pueden incluirse en la formulación de la biomasa en función de su disponibilidad.

| Tabla 3.2 Producción de biogás de especies vegetales/residuos de alimento. Fuente: Elaboración propia con datos de (FAO, 2011), (Rodríguez, 2015). | | | | | |
|--|-----------------------------|---------------------------------|---------------------|--------------------|------------------------------|
| | Producción de biogás | | | | Cantidad de residuo (Ton/ha) |
| | l x kg de sólidos orgánicos | m ³ x m ³ | m ³ /Ton | m ³ /ha | |
| <i>Cereales (paja)</i> | | | | | |
| Maíz | | | 514 | 3300 | 6.4 |
| Trigo | | | 367 | 1200 | 3.3 |
| Arroz | | | 352 | 1400 | 4 |
| Cebada | | | 388 | 1400 | 3.6 |
| <i>Tubérculos (hojas)</i> | | | | | |
| Papas | | | 606 | 6000 | 10 |
| Remolacha/Betabel | | | 501 | 6000 | 12 |
| <i>Leguminosas (paja)</i> | | | | | |
| Habas | | | 608 | 1400 | 4 |
| Frijoles | | | 518 | 1650 | 3.2 |
| <i>Hortalizas (hojas)</i> | | | | | |
| Tomate | | | 603 | 3300 | 5.5 |
| Cebolla | | | 514 | 3600 | 7 |
| <i>Otros</i> | | | | | |
| Desecho de verdura | 350 | | | | |
| Hierba fresca | 410 | | | | |
| Bagazo | 160 | | | | |
| Jacinto de agua | 325 | | | | |
| Lactosuero | | 15.36 | | | |

3.1.7 Relación Carbono/Nitrógeno

Algunas especies animales y vegetales tienen una relación (K) mayor o menor, como se muestra en la Tabla 3.3, por lo que es necesario utilizar diferentes combinaciones para alcanzar una proporción óptima entre estos elementos (de 20 a 30 unidades de carbono por una de nitrógeno).

En formulaciones que contienen diversas materias primas, esta relación se puede calcular a través de la ecuación (3.3) (FAO, 2011):

$$K = \frac{C_1 * Q_1 + C_2 * Q_2 + \dots + C_n * Q_n}{N_1 * Q_1 + N_2 * Q_2 + \dots + N_n * Q_n} \quad (3.3)$$

| Tabla 3.3 Valores promedios de la relación C/N de algunos residuos disponibles en el medio rural. Fuente: Elaboración propia con datos de (FAO, 2011), (Rodríguez, 2015). | | | |
|---|-------|------|---------|
| Residuos animales | | | |
| | %C | %N | C/N |
| Bovinos | 30 | 1.3 | 25:1 |
| Equinos | 40 | 0.8 | 50:1 |
| Ovinos | 35 | 1 | 35:1 |
| Porcinos | 25 | 1.5 | 16:1 |
| Caprinos | 40 | 1 | 40:1 |
| Conejos | 35 | 1.5 | 23:1 |
| Gallinas | 35 | 1.5 | 23:1 |
| Patos | 38 | 0.8 | 47:1 |
| Pavos | 35 | 0.7 | 50:1 |
| Excretas humanas | 2.5 | 0.85 | 3:1 |
| Lactosuero | 0.35 | 0.41 | 0.85:1 |
| Residuos vegetales | | | |
| | %C | %N | C/N |
| Paja trigo | 46 | 0.53 | 87:1 |
| Paja cebada | 58 | 0.64 | 90:1 |
| Paja arroz | 42 | 0.63 | 67:1 |
| Paja avena | 29 | 0.53 | 55:1 |
| Rastrojos maíz | 40 | 0.75 | 53:1 |
| Leguminosas | 38 | 1.5 | 28:1 |
| Hortalizas | 30 | 1.8 | 17:1 |
| Tubérculos | 30 | 1.5 | 20:1 |
| Hojas secas | 41 | 1 | 41:1 |
| Aserrín | 41 | 0.06 | 730:1 |
| Melaza | 40.77 | 0.25 | 166.2:1 |
| Hojarasca de bosque | 3.97 | 0.02 | 183.9:1 |

Donde:

K= Relación C/N de la mezcla de materias primas

C = % de carbono orgánico en la materia prima

N= % de nitrógeno orgánico en la materia prima

Q= Peso fresco de cada materia (kg)

3.1.8 Porcentaje de sólidos totales

El porcentaje de sólidos totales puede ser determinado de manera experimental como se mencionó en la Sección 2.3.2.5 y de manera teórica recurriendo a los datos ya reportados, y dentro de los rangos que se encuentran en la Tabla 3.4.

| Tabla 3.4 Rango de valores reportados de sólidos totales en diversos residuos. Fuente: Elaboración propia con datos de (FAO, 2011), (Robalino, 2011). | | |
|--|--------------|--------------|
| | Valor máximo | Valor mínimo |
| Ganado porcino | 13.4 | 56.2 |
| Ganado bovino | 15 | 49 |
| Ganado avícola | 26 | 92 |
| Ganado caprino | 83 | 92 |
| Ganado ovino | 32 | 45 |
| Ganado equino | 19 | 42.9 |
| Conejos | 34.7 | 90.8 |
| Humanos | 17 | |
| Maíz | 77 | 80 |
| Trigo | 82 | 90 |
| Arroz | 88 | 92.6 |
| Cebada | 88 | 90 |
| Tubérculos (hojas) | 10 | 20 |
| Leguminosas (paja) | 60 | 80 |
| Hortalizas (hojas) | 10 | 16 |
| Desecho de verdura | 12 | |
| Hierba fresca | 24 | |
| Bagazo | 65 | |
| Jacinto de agua | 7 | |
| Aserrín | 74 | 80 |
| Hojas secas | 50 | |
| Lactosuero | 3.5 | |

Este valor contenido en la biomasa puede ser inferior o superior al deseado para la operación del digestor (8-12%). A través de la ecuación (3.4) se puede calcular la cantidad de agua (litros de agua por kg de excreta) que se necesita agregar para diluir la mezcla y obtener la proporción adecuada de sólidos totales (FAO, 2011).

$$W_{agua} = \frac{\frac{\% S.T \text{ fresca}}{100} - \frac{\% S.T \text{ deseado}}{100}}{\frac{\% S.T \text{ deseado}}{100}} \left[l \text{ de agua} / kg \text{ de excreta} \right] \quad (3.4)$$

La cantidad de agua (W_{agua}) debe ser calculada para cada una de las materias primas, por lo que la cantidad total de agua está dada por la ecuación:

$$V_{agua} = W_{agua_1} + W_{agua_2} + \dots + W_{agua_n} \quad [l] \quad (3.5)$$

$$V_{agua} = \sum_{I=1}^n W_{agua_n} \quad (3.6)$$

Finalmente, el contenido de sólidos totales en la biomasa se calcula multiplicando el porcentaje de sólidos (% S.T. deseado o alcanzado) por la cantidad de estiércol añadida.

3.2 PARÁMETROS DE DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR

3.2.1 Tiempo de Retención Hidráulica

El tiempo de retención (TRH) depende de la temperatura promedio de lugar y se puede calcular a través de la siguiente relación (Urra-Balcazar, 2009):

$$TRH = -51.227 * \ln(T) + 206.72 \quad [\text{días}] \quad (3.7)$$

Donde $T(^{\circ}C)$ es la temperatura de operación o temperatura promedio del lugar de instalación. Se aprecia que entre mayor sea la temperatura del lugar, el tiempo de retención será menor y por lo tanto el volumen que ocupa la biomasa.

3.2.2 Número de animales/Especies vegetales disponibles

Las especies animales disponibles son cuantificadas y clasificadas de acuerdo con los criterios de las tablas A-1; A-4, lo que equivale al número total de especies (N). Adicionalmente se pueden registrar otros residuos aprovechables como los de cultivo o alimentos (tabla 3.9) para conocer el potencial de materia prima total.

3.2.3 Formulación

A partir de un registro inicial de la materia prima disponible se proponen diferentes formulaciones o mezclas entre los diferentes tipos de materia prima, como lo son el estiércol de distintas especies animales, residuos de cultivo o de la industria lechera y alimentaria. Estas combinaciones pueden abarcar toda la materia disponible, el 50% de cada insumo, o diferentes proporciones de cada uno según sus características.

Para elegir la formulación adecuada se toman en cuenta criterios como:

- Disponibilidad de espacio

- Disponibilidad de cada tipo de insumo
- Relación C/N de la mezcla
- Densidad o peso específico de la materia prima

En este estudio se comparan 4 escenarios de posibles combinaciones de biomasa:

- a) Con todos los desechos ganaderos disponibles.
- b) Con 75% del estiércol de bovino, 25% del estiércol del porcino y una proporción de suero de leche.
- c) Con 75% del estiércol de bovino, 25% del estiércol del porcino, ½ Ton de rastrojo de MAÍZ y una proporción de suero de leche.
- d) Con 75% del estiércol de bovino, 25% del estiércol del porcino, ½ Ton de rastrojo de CEBADA y una proporción de suero de leche.

3.2.4 Cantidad total diaria de biomasa/Carga total diaria

Con la formulación seleccionada se determina la carga total diaria C_d con la relación:

$$C_d = Md_1 + Md_2 + \dots + Md_n \quad [kg] \quad (3.8)$$

$$C_d = \sum_{i=1}^n Md_n \quad (3.9)$$

Donde Md_n es la masa correspondiente a cada insumo y C_d será la suma de las masas de que serán añadida al biodigestor diariamente.

3.2.5 Volumen total diario

Es necesario conocer la densidad (ρ) en el caso de los líquidos-semilíquidos o peso específico para los sólidos-semisólidos que serán añadidos a la mezcla, de esta manera se puede calcular el volumen total diario Vol_d que será introducido al reactor:

$$Vol_d = \frac{Md_1}{\rho_1} + \frac{Md_2}{\rho_2} + \dots + \frac{Md_n}{\rho_n} \quad [m^3] \quad (3.10)$$

$$Vol_d = \sum_{i=1}^n \frac{Md_n}{\rho_n} \quad (3.11)$$

3.2.6 Flujo másico

El flujo másico a la entrada del digestor se calcula aplicando la siguiente función (Urra-Balcazar, 2009):

$$m^* = \frac{C_d}{1000} * \rho \quad [m^3] \quad (3.12)$$

3.2.7 Carga durante el TRH

Para determinar la carga total (C_T) del biodigestor durante el tiempo de retención calculado, se multiplica la carga diaria por el TRH:

$$C_T = C_d * TRH \quad [kg] \quad (3.13)$$

3.2.8 Volumen durante el TRH

Como sucede con la carga total, para calcular el volumen total (V_T) que ocupará la masa de la mezcla de materias primas se utiliza una relación proporcional al TRH:

$$V_{Tmasa} = Vol_d * TRH \quad [m^3] \quad (3.14)$$

3.2.9 Volumen teórico de biogás

El volumen de biogás que será producido diariamente es igual a la suma del producto de la producción de biogás (por kg de excreta) por la cantidad de excreta disponible diaria, en el caso de los residuos animales, o su equivalente en residuos vegetales (Martínez, 2007):

$$V_B = (P_{B1} * E_{d1}) + (P_{B2} * E_{d2}) + \dots + (P_{Bn} * E_{dn}) \quad [m^3] \quad (3.15)$$

$$V_B = \sum_{i=1}^n (P_{Bn} * E_{dn}) \quad (3.16)$$

3.2.10 Volumen del biodigestor

Finalmente, el volumen del biodigestor se calcula con la ecuación (Martínez, 2007):

$$V_{TOTAL} = \frac{1}{3} * (V_{agua} + V_{Tmasa}) \quad [m^3] \quad (3.17)$$

3.3 DIMENSIONAMIENTO DE LOS COMPONENTES ADICIONALES AL REACTOR

3.3.1 Tanque de acondicionamiento

El digestor se alimenta cada 6 horas 4 veces al día y se recomienda un factor de seguridad de 3 en el dimensionamiento del tanque de acondicionamiento o de alimentación (Urra-Balcazar, 2009), además de una relación de 2:1 entre el ancho y largo respectivamente:

$$V_{Aliment} = \frac{C_d}{\frac{1000}{6}} * 3 \quad [m^3] \quad (3.18)$$

3.3.2 Laguna de secado

La laguna de secado corresponde al lugar donde se recuperará el efluente, el cual equivale aproximadamente al 85-90% del influente (ProfEC, 2010) por lo cual las dimensiones de este tanque son:

$$V_{Sec} = V_{Tmasa} * 0.9 \quad [m^3] \quad (3.19)$$

3.3.3 Tanque de almacenamiento de rastrojo

Con el fin de controlar y medir la cantidad de residuos de cultivo añadidos a la mezcla se dimensionó un tanque con capacidad de almacenar 1 tonelada y media de rastrojo con un ρ (peso específico) = 750 kg/m³, con una relación de 1:3/4 de ancho-largo.

Vrequerido = 1.5 m³

Ancho = 2 m

Largo= 1.5 m

$$H_{Maiz} = \frac{V_{requerido}}{A * L} \quad [m] \quad (3.20)$$

3.3.4 Bomba de alimentación

La bomba opera entregando la mezcla a digerir desde el tanque de acondicionamiento/alimentación al reactor, esto implica que diariamente se bombeen 34 m³ del sustrato en estado semilíquido cuya densidad se considera como la densidad del agua sucia de la industria con bajo contenido en sólidos ($\rho=1160$ kg/m³).

La potencia necesaria de la bomba (P_B) a utilizar se puede calcular con la siguiente ecuación (Pérez, 2010):

$$P_B = \frac{V_b * \Delta P_T}{\eta_B} \quad [kW] \quad (3.21)$$

Donde:

V_b = Flujo volumétrico a bombear [m³/h]

ΔP_T = Diferencia de presiones entre carga y descarga [bar]

η_B = Factor de corrección de la bomba (1.2)

Para seleccionar la bomba se debe tomar en cuenta que el dispositivo tolere un fluido como el agua de drenaje, con un bajo nivel de corrosión y sea compatible con la geometría y espacio entre los tanques.

3.3.5 Sistema de agitación

El agitador permite homogenizar el digestato dentro del reactor para lograr que se degrade al máximo la materia nueva y vieja durante el TRH. Para calcular la potencia del agitador (P_A) se utiliza la ecuación 3.22:

$$P_A = 1.3 * N_A * \rho * v_A * D_p \quad [kW] \quad (3.22)$$

Donde:

Factor de seguridad = 1.3

N_A = Coeficiente de Newton del agitador (0.33)

ρ = Densidad del fluido (1160 kg/m³)

v_A = Velocidad de giro del agitador [rpm]

D_p = Diámetro de la paleta del agitador [m]

3.4 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO

Se realizó una propuesta para el calentamiento del reactor debido a que las temperaturas mensuales promedio de operación en el lugar son bajas por lo que se estaría operando en el rango psicrófilico a excepción de los meses de abril y mayo (NASA, POWER Data Access Viewer, 2019).

Para el sistema de calentamiento se propone el uso de colectores solares que mantengan una Toperación de 39°C.

Primero se obtuvieron las temperaturas promedio mensuales con las coordenadas del lugar de instalación (20°14'17" N, 98°19'19" O) y por medio de la misma base de datos meteorológicos (NASA, POWER Data Access Viewer, 2019) se obtuvo la radiación para un colector inclinado a 20°, tomando una orientación ecuatorial (ver Tabla 3.5).

| Tabla 3.5 Temperatura y radiación promedio mensual en Metepec, Hidalgo. Fuente elaboración propia con datos de (NASA, POWER Data Access Viewer, 2019) | | |
|---|----------------------|-------------------------------|
| MES | Temperatura promedio | Radiación (W/m ²) |
| JAN | 17.76 | 6.35 |
| FEB | 19.94 | 6.38 |
| MAR | 23.22 | 6.5 |
| APR | 26.06 | 5.93 |
| MAY | 25.33 | 5.23 |
| JUN | 24.48 | 4.86 |
| JUL | 23.72 | 4.34 |
| AUG | 23.61 | 4.06 |
| SEP | 23.56 | 4.48 |
| OCT | 22.47 | 4.92 |
| NOV | 19.8 | 5.07 |
| DEC | 17.26 | 5.33 |
| ANN | 22.27 | 5.29 |

Posteriormente se seleccionó un colector comercial MAXOL MS 2.5 de la empresa Modulo Solar con las características descritas en la Tabla 3.6 de acuerdo con la ficha técnica del fabricante. La temperatura de operación del colector es 6°C mayor a la temperatura a la que se desea calentar, para facilitar la transferencia de calor al fluido.

| Tabla 3.6 Características del colector seleccionado. Fuente: (Modulo Solar, 2019) |
|---|
| Modelo: Modulo Solar Maxol MS 2.5 |
| Fabricante: Modulo Solar SA de CV |
| Certificación: 2011118A |
| Área bruta: 2.506 m ² |
| m: -4.265 W/(°Cm ²) |
| b: 0.708 |
| Toperación_colector: 45°C |

La eficiencia del colector está dada por la ficha técnica del fabricante, a través de la ecuación 3.23:

$$\eta_{Colector} = b + m * \frac{T_{Colector} - T_{ambiente}}{Irr_{col}} \quad (3.23)$$

Donde Irr es la irradiancia incidente sobre el área del colector, para la cual se considera una irradiancia de 900 W/m² de acuerdo con la norma ANSI/ASHRAE 93-1986. Para calcular la carga de calor requerido mensualmente, se utiliza la ecuación (3.24).

$$Q_{requerido} = m * Cp * \frac{T_2 - T_1}{3600} \quad [kWh] \quad (3.24)$$

Donde:

m= Carga diaria (kg)

Cp = Cp de la mezcla (KJ/kgK)

T₂ = Temperatura de operación deseada (°C)

T₁ = Temperatura de operación crítica o temperatura ambiente promedio mensual (°C)

Las pérdidas de calor diarias se aproximarán al 10% de la T₂ (3°C) y la suma de ambas cargas de calor será el calor total requerido.

El área requerida para la captación de la radiación se calcula con la ecuación:

$$A_{Captación} = \frac{Q_{TOTAL}}{Radiación * \eta_{COLECTOR}} \quad [m^2] \quad (3.25)$$

Una vez obtenida el área de captación total se divide entre el área de captación del colector seleccionado para obtener el número ideal de colectores.

$$NO_{IDEAL_C} = \frac{A_{Captación}}{A_{Colector}} \quad [m^3] \quad (3.26)$$

Para conocer el número real de colectores se utilizará la ecuación:

$$NO_{REAL} = \frac{NO_{IDEAL_C} * Fs}{\eta_{int} * \eta_t * \eta_{ter}} \quad [m^3] \quad (3.27)$$

Donde:

Fs : Factor de seguridad = 1.1

η_{int} : Eficiencia del intercambiador = 1

η_t : Eficiencia de la tubería = 1

η_{ter} : Eficiencia del termotanque

3.5 GENERACIÓN ENERGÉTICA

Para estimar la generación teórica de biogás en el digestor se recurre a la ecuación (3.16), cuyo potencial energético se puede calcular con los datos de la Tabla 2.5.

$$E_{gen} = V_B * P_{cal} \quad [kWh] \quad (3.28)$$

Este parámetro es calculado para las condiciones de operación máximas en el rango mesofílico y mínimas en el rango termofílico considerando una $T_{op}=39^\circ C$.

Al operar en las condiciones críticas de $17.76^\circ C$ la producción de biogás constituye un 40-45% (RSA, 2019).

3.6 BALANCE ENERGÉTICO

- a) En el caso del escenario 1, o escenario crítico de operación (a $17.76^\circ C$) como flujos de energía de entrada E_{in} al biodigestor se tiene que:

$$E_{in1} = E_B + E_{BII} + E_S \quad [kWh] \quad (3.29)$$

Donde:

E_B = Energía de la bomba de alimentación [kWh]

E_{BII} = Energía del agitador [kWh]

E_S = Energía del soplador [kWh]

Los flujos de salida de energía serán equivalentes a la energía disponible en el gas producido:

$$E_{out} = 0.45 * E_{gen} \quad [kWh] \quad (3.30)$$

Por lo tanto, el balance energético se expresa de la siguiente forma:

$$E_{TOTAL} = E_{out} - E_{in} \quad [kWh] \quad (3.31)$$

- b) En el escenario con sistema de calentamiento (a $39^\circ C$) la E_{in} se calcula con la siguiente ecuación:

$$E_{in2} = E_B + E_{BII} + E_S + E_{CAL} \quad [kWh] \quad (3.32)$$

Donde:

E_B = Energía de la bomba de alimentación [kWh]

E_{BII} = Energía del agitador [kWh]

E_S = Energía del soplador [kWh]

E_{CAL} = Energía requerida para calentar (Q_{TOTAL}) [kWh]

Y la energía de salida:

$$E_{out} = E_{gen} \quad [kWh] \quad (3.33)$$

3.7 MODELO DE CÁLCULO ECONÓMICO

3.7.1 Cálculo de ahorro/venta de fertilizantes

Para asignar un valor al biofertilizante obtenido del proceso digestivo, primero se necesita saber la cantidad de nutrientes contenida en 1000 lts de mezcla, la cual se puede aproximar con los valores de la Tabla 3.7.

| Tabla 3.7 Cantidad de nutrientes en 1000 lts de sustrato. Fuente: (Urra-Balcazar, 2009) | |
|---|---------------|
| Nutriente | Cantidad (kg) |
| N | 2.6 |
| P | 0.4 |
| K | 1.84 |
| Mg | 0.17 |

Se consideran los miles de litros diarios que se agregan al digester para obtener la cantidad diaria de nutrientes en la mezcla (C_N) y de la misma forma se pueden calcular los nutrientes durante el TRH determinado o durante un año.

$$C_N = C_X * \text{miles de litros diarios} \quad [kg] \quad (3.34)$$

$$C_{NTRH} = C_X * \text{miles de litros diarios} * TRH \quad [kg] \quad (3.35)$$

$$C_{NANUAL} = C_X * \text{miles de litros diarios} * 365 \quad [kg] \quad (3.36)$$

En la Tabla 3.8 se muestra el porcentaje de nutriente que contiene el fertilizante comercial, es decir, del 100% del fertilizante sólo el porcentaje mostrado corresponde a los elementos mencionados en la Tabla 3.7.

| Tabla 3.8 Porcentaje de nutrientes en el fertilizante. Fuente: (Urra-Balcazar, 2009) | |
|--|-----------------------------|
| Nombre del fertilizante | Porcentaje de nutriente (%) |
| Nitromag | 27 |
| Superfosfato triple | 46 |
| Muriato de Potasio | 60 |
| Óxido de Magnesio | 85 |

Por lo que se recurre a la ecuación 3.37 para obtener la equivalencia diaria:

$$Eq_{fertilizante} = \frac{C_N}{(\% \text{ porcentaje de nutriente}/100)} \text{ [kg]} \quad (3.37)$$

Y de la misma forma la equivalencia durante el TRH y anual.

$$Eq_{fertilizante(TRH)} = Eq_{fertilizante} * TRH \text{ [kg]} \quad (3.38)$$

$$Eq_{fertilizante(ANUAL)} = Eq_{fertilizante} * 365 \text{ [kg]} \quad (3.39)$$

El costo de los fertilizantes por tonelada se encuentra en la tabla 3.9 y considerando que el proceso de digestión remueve un porcentaje de los nutrientes (ver Tabla 3.10) finalmente se puede obtener el precio anual de cada fertilizante (Ec 3.40).

| Tabla 3.9 Costo de los fertilizantes comerciales. Fuente: (Gourcy, 2016); (Maxunite Co., 2019). | |
|---|---------------------|
| Nombre del fertilizante | Costo (pesos x ton) |
| Nitromag | 7600 |
| Superfosfato triple | 8950 |
| Muriato de Potasio | 6935 |
| Oxido de Magnesio | 4180 |

$$\$ ANUAL/F = (Eq_{fertilizante(ANUAL)} * Costo \times ton * (\frac{100 - \% \text{ rem}}{100}))/1000 \quad (3.40)$$

Tabla 3.10 Porcentaje de remoción de nutrientes en la digestión. Fuente: (Urra-Balcazar, 2009)

| Nutriente | Porcentaje (%) |
|-----------|----------------|
| N | 62 |
| P | 50 |
| K | 10 |
| Mg | 60 |

$$\$ FERTILIZANTE ANUAL_{TOTAL} = \$ ANUAL/F * F \quad (41)$$

3.7.2 Cálculo de ahorro/servicio de tratamiento de aguas

Este cálculo se basa en una planta tratadora de aguas residuales de la marca BossTechnology con las características descritas en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11 Descripción de la planta de tratamiento. Fuente: (BossTechnology, 2019)

| Sistema Micro Planta | |
|----------------------|--|
| Costo (\$) | 24,000 |
| Normativa | NOM-001-ECOL-1996 SEMARNAT/NOM-002-ECOL SEMARNAT |
| Capacidad (l) | 2300 |
| Material | Polietileno de alta densidad |
| Dimensiones | 2.8 m de largo, 1.25 de ancho y 1.37 m de altura |
| Peso Máximo (kg) | 120 |

En este caso se obtendrán las Unidades de Tratamiento (UT) a través del Wagua en litros que se añadirá a la mezcla:

$$UT = \frac{Wagua (l)}{Capacidad (l)} \quad (3.42)$$

Finalmente se multiplican por el Costo de una planta para una UT para obtener el costo de tratamiento de la cantidad de agua añadida al digestor diariamente.

$$\$ diario de tratamiento de agua = UT * \$ Costo de la unidad \quad (3.43)$$

$$\text{\$ ANUAL de trat de agua} = \text{\$ diario de trat de agua} * 365 \quad (3.44)$$

3.7.3 Cálculo de ahorro en electricidad

En el caso de la electricidad generada se plantean dos casos de producción de electricidad.

1) En condiciones de operación crítica (17.76°C):

En este caso se maneja una tarifa de Gran Demanda en Media Tensión Ordinaria (abajo de 100 kW) para la cual el kWh de energía cuesta \\$1.199 (CFE, 2019).

La energía disponible obtenida a esta Top se suma con las pérdidas o la E_{in} que requiere el biodigestor para operar (bombas) ya que se considera que funcionan directamente con energía eléctrica.

Por lo cual:

$$E_{ELECTRICA} = E_{gen}(0.425) - E_{in} \quad [kWh] \quad (3.45)$$

Y,

$$\text{\$ } E_{ELECTRICA} = E_{ELECTRICA} * \text{Tarifa} \times kWh \quad [\$ / kWh] \quad (3.46)$$

$$\text{\$ } E_{ELECTRICA(annual)} = \text{\$ } E_{ELECTRICA} * F.P * 365 \quad [\$ / kWh] \quad (3.47)$$

Donde el F.P. se considera de 0.90.

Aquí se incluyen los costos adicionales por generación como el costo del generador o generadores, de acuerdo con la potencia de entrada (W_{in})

$$W_{in} = \frac{E_{ELECTRICA}}{24 \text{ hrs}} \quad [kW] \quad (3.48)$$

2) En condiciones de calentamiento (39°C):

La tarifa correspondiente en este caso es la misma (abajo de 100 kW) con un costo de \\$1.199 el kWh. De esta manera, la energía eléctrica se puede cuantificar con la Ecuación (3.49):

$$E_{ELECTRICA} = E_{gen} - E_{in} \quad [kWh] \quad (3.49)$$

Y de igual forma se aplican las ecuaciones 3.46-3.48.

3.7.4 Cálculo de ahorro en gas

Como en la sección anterior, se plantean dos casos de producción de gas.

1) En condiciones de operación crítica (17.76°C):

En el primer caso se considera que el poder calorífico del biogás equivale a 7 kWh/m³ mientras que el del gas LP es de 10 kWh/m³ con el fin de calcular el costo equivalente en gas LP que es un combustible ya conocido en el mercado.

El costo por kg de gas LP en la región de Metepec, Hidalgo, se registró en \$19.26 x kg durante enero del 2019.

Para calcular el costo diario del gas producido se recurre a la siguiente relación:

$$\text{\$Gas diario} = P_B(0.425) * 0.7 * 19.26 \text{ [\$ x kg]} \quad (3.50)$$

Donde:

P_B = Producción de biogás en el escenario 1 [kg]

Por lo tanto:

$$\text{\$Gas ANUAL} = \text{\$Gas diario} * F.P.* 365 \text{ [\$ x kg]} \quad (3.51)$$

Considerando un F.P. = 0.9

2) En condiciones de calentamiento (39°C):

Para calcular el costo diario del gas producido en el segundo escenario se utiliza la relación 3.52

$$\text{\$Gas diario} = P_B * 0.7 * 19.26 \text{ [\$ x kg]} \quad (3.52)$$

Donde:

P_B = Producción de biogás en el escenario 2 [kg]

Y el precio del gas producido anualmente se calcula con la relación 3.51.

Adicionalmente, en ambos casos se considera la adición de un compresor de gas y un sistema de almacenamiento además de una pérdida de energía eléctrica por operación del digester que equivale a la E_{in} por la tarifa correspondiente. Esta pérdida se restará directamente del costo final por tratarse de energía eléctrica y no en forma de gas como se trata en este escenario.

3.7.5 Calculo del sistema de calentamiento

El costo de instalación del sistema dimensionado a través de colectores solares, incluye el costo actual de cada colector por el número de colectores requeridos.

3.7.6 Escenarios de producción energética

Con el fin de analizar la rentabilidad de las propuestas durante el tiempo de vida del digestor, se realizó un flujo de caja del proyecto en 4 escenarios de producción energética:

- 1) Operación en baja temperatura (17.76 °C) para la producción de gas de uso final

Se tomarán en cuenta las siguientes consideraciones:

- Dentro de los costos se incluirán el costo de instalación, la energía eléctrica requerida para la operación del digestor y el costo aproximado del almacenamiento y compresión del gas
- En los ingresos se incluyen el tratamiento de aguas residuales, el costo del fertilizante producido y el del gas por kg

- 2) Operación en baja temperatura (17.76 °C) para la producción de electricidad de uso final

Consideraciones:

- Dentro de los costos se incluirán el costo de instalación, el precio aproximado del generador y un 10% adicional por los componentes adicionales de la planta de generación eléctrica. (La energía por operación del digestor ya se considera en el balance de energía eléctrica).
- En los ingresos se incluyen el tratamiento de aguas residuales, el costo del fertilizante producido y el de la electricidad en función de la tarifa.

- 3) Operación en temperatura media (39 °C) para la producción de gas de uso final

Consideraciones:

- Dentro de los costos se incluirán el costo de instalación, la energía eléctrica requerida para la operación del digestor y el costo aproximado del almacenamiento y compresión del gas.
- En los ingresos se incluyen el tratamiento de aguas residuales, el costo del fertilizante producido y el del gas por kg

- 4) Operación en temperatura media (39 °C) para la producción de electricidad de uso final

Consideraciones:

- Dentro de los costos se incluirán el costo de instalación, el precio aproximado del generador y un 10% adicional por los componentes adicionales de la planta de

generación eléctrica. (La energía por operación del digestor ya se considera en el balance de energía eléctrica).

- En los ingresos se incluyen el tratamiento de aguas residuales, el costo del fertilizante producido y el de la electricidad en función de la tarifa.

A continuación, se describen los conceptos y parámetros utilizados en el cálculo del flujo de liquidez (Acosta, 2016).

3.7.7 Periodo de evaluación

El periodo de evaluación del proyecto es dado por la empresa instaladora, que indica un periodo de vida de los principales componentes del digestor de 20 años.

3.7.8 Tasa de descuento nominal

La tasa de interés o descuento nominal (i) es el interés que se agregará a un capital como remuneración durante un periodo de inversión determinado, el valor de esta tasa dependerá del sector, del banco o de la tasa determinada por una entidad financiera, en este caso se tomó la tasa cetes promedio del año 2018 (Banxico, Sistema de Información Económica, 2019).

$$i=8.06\%$$

3.7.9 Tasa de inflación

La inflación (π) es una expansión del incremento de precios en una economía, que se traduce en la pérdida del poder adquisitivo y es inherente al aumento de los precios de cualquier producto o servicio. El valor de la inflación considerada en este caso fue la reportada para el año 2018 en el mes de mayo (Banxico, Inflación, 2019) .

$$\pi=4.51\%$$

3.7.10 Tasa de descuento real

La tasa de interés real (r), por lo tanto, es una relación de la tasa de interés nominal descontando el valor de la inflación, que se expresa a través de la llamada relación de Fischer con la ecuación (3.53):

$$r = \frac{i - \pi}{1 + \pi} \quad [\%] \quad (3.53)$$

Se considera una moneda constante del año 2018 en pesos mexicanos.

3.7.11 Valor Presente Neto

El VPN consiste en descontar los flujos de efectivo a una tasa de descuento que representa la Tasa de Retorno Esperada Mínima Aceptable (TREMA) a la que se le resta la inversión

necesaria para el proyecto. Una diferencia positiva entre estos valores indica que el proyecto es aceptable y se calcula a través de la ecuación (3.54):

$$VPN = -S_0 + \sum_{t=1}^n \frac{S_t}{(1+i)^t} \quad (3.54)$$

Donde:

VPN = Valor presente neto

S_0 = Inversión inicial

S_t = Flujo de efectivo neto del periodo t

n = Número de periodos de vida útil del proyecto

i = tasa de descuento o TREMA.

3.7.12 Valor Anual Equivalente

En este caso todos los ingresos y gastos durante el periodo de vida o de análisis se dividen en anualidades equivalentes (VAE), si este valor es positivo el proyecto es aceptable.

$$VAE = -S_0 * [A/P]_{i,n} + \left\{ \sum_{t=1}^n \frac{S_t}{(1+i)^t} \right\} * [A/P]_{i,n} + R * [A/F]_{i,n} \quad (3.55)$$

Donde:

VAE = Valor anual equivalente

S_0 = Inversión inicial

S_t = Flujo de efectivo neto del periodo t

R = Valor de rescate

n = Número de periodos de vida útil del proyecto

i = tasa de descuento o TREMA.

3.7.13 Tasa Interna de Rendimiento

La Tasa Interna de Rendimiento (TIR) se refiere a la tasa de descuento que iguala el VPN de los ingresos y los gastos e indica la rentabilidad de una inversión a través de un porcentaje de beneficio o pérdida y se calcula con la ecuación (3.56):

$$TIR(VPN) = -S_0 + \sum_{t=1}^n \frac{S_t}{(1 + i^*)^t} = 0 \quad (3.56)$$

Donde:

VPN = Valor presente neto

S_0 = Inversión inicial

S_t = Flujo de efectivo neto del periodo t

n = Número de periodos de vida útil del proyecto

i^* = tasa interna de rendimiento.

3.7.14 Relación Beneficio-Costo

El cociente entre los beneficios o ingresos entre los costos de un proyecto se conoce como la RBC de (en VPN o VAE):

$$RBC = VP \text{ Beneficios} / VP \text{ Costos} \quad (3.57)$$

$$RBC = VAE \text{ Beneficios} / VAE \text{ Costos} \quad (3.58)$$

3.7.15 Periodo de Recuperación de la Inversión

Tal como su nombre lo indica, este parámetro mide el tiempo en que se recupera la inversión inicial de un proyecto y es un referente de la liquidez. Se calcula con la ecuación (3.59):

$$PR = \text{Inversión Inicial} / \text{Ingreso anuales netos} \quad [\text{años}] \quad (3.59)$$

3.8 CÁLCULO DE AHORRO EN EMISIONES DE CO₂

La emisión de metano diaria por animal (vacuno) equivale a 151 l (NASA, Carbon Balance and Management, 2017); conociendo el número de animales cuya excreta será utilizada en el digestor se obtiene la cantidad de metano que se deja de emitir al ambiente, ecuación (3.60)

$$Emisiones_{CH_4} = NA * Emisión \text{ diaria} * 365 \quad [l] \quad (3.60)$$

Sabiendo que el impacto ambiental del CH₄ es 23 veces mayor que el de CO₂, la cantidad de emisiones en CO₂eq se calcula con la ecuación (3.61):

$$CO_{2eq} = \frac{Emisiones_{CH_4}}{1000} * 0.656 * 23 \quad [kg] \quad (3.61)$$

Donde $\rho_{CH_4} = 0.656 \text{ kg/m}^3$

3.9 DISEÑO DEL SISTEMA DE BIODIGESTIÓN

3.9.1 Consideraciones para el Layout del sistema

De acuerdo con la normatividad presentada, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones para el diseño del sistema de digestión:

- Instalar a una distancia mínima de 500 m de cualquier núcleo poblacional
- Distancia de 500 m mínima respecto a cuerpos de agua
- Tuberías del influente de PVC con codos no mayores a 45°
- Tuberías de conducción de gas de PVC RD 26 (*diámetro de 3" a 12")
- Tubería de extracción de sólidos a 60 cm de profundidad sobre la corona de 4" de diámetro y PVC hidráulico RD 26.5
- Instalación del quemador a una distancia mínima de 30 m del digestor

Capítulo 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 PARÁMETROS DE DIMENSIONAMIENTO DE LA BIOMASA

4.1.1 Relación Carbono/Nitrógeno

Inicialmente se propusieron 4 escenarios (Sección: Formulación) para el estudio de algunas combinaciones posibles entre los insumos disponibles de la región. En cada escenario se calculó la relación C/N (ver Tabla 4.1).

| Tabla 4.1 Relación C/N en cada escenario. Fuente: Elaboración propia. | |
|--|-------|
| ESCENARIO | K |
| A | 22.59 |
| B | 21.66 |
| C | 23.14 |
| D | 23.68 |

4.1.2 Selección de la formulación

Se observa que la variación no es significativa, pero de acuerdo con los valores tomados de la tabla 3.10 en el escenario A cuando se trata únicamente de desechos ganaderos se tiene una “relación base” a partir de la cual se observa que al agregar una cantidad de lactosuero (2.1 Ton) el valor K disminuye (Escenario B), aun cuando la proporción de estiércol de bovino es mayor y con una relación C/N más alta que el estiércol porcino.

En el escenario C se mantiene la relación de 75% estiércol bovino y 25% estiércol porcino, pero en este caso se disminuye la cantidad de suero a 860 kg y se agregan 0.5 Ton de rastrojo de maíz (Con K=40), aquí el valor de K aumenta en 1.5 unidades.

Para el escenario D se plantea adicionar 0.5 Ton de rastrojo de cebada, cuya relación K es mayor que la del rastrojo de maíz (K=58) y el valor K de la mezcla aumenta 0.5 unidades más que en el caso C.

En principio elegir cualquiera de los escenarios ofrece una relación K en la que se pueden mantener las condiciones de operación sin añadir toxicidad o desacelerar el proceso, por lo que convendría trabajar con los casos A y C que se encuentran en un punto intermedio. Sin embargo, en el caso A se trabaja únicamente con estiércol, lo que simplifica la recolección de desechos, pero al tratarse de una alta cantidad de biomasa aumentará considerablemente el tamaño del reactor. Por otro lado, utilizar diferentes insumos permite encontrar una aplicación para otros residuos adicionales, aunque se utilicen en menor proporción.

Como se vio en la sección 1.2 el maíz es uno de los cultivos más abundantes en la zona, sumado a que la producción potencial de biogás por tonelada de rastrojo de maíz es mayor

a la del rastrojo de cebada (Tabla 3.9) es decir, su densidad energética es mayor y por lo tanto el volumen a ocupar para producir mayor cantidad de gas será menor.

Por lo anterior se seleccionó el caso C como el caso de estudio.

4.1.3 Porcentaje de sólidos y cantidad de agua añadida

En la Tabla 4.2 se muestran los valores de sólidos totales encontrados en la literatura para cada insumo con características similares a los de la mezcla seleccionada.

| Tabla 4.2 Porcentaje de sólidos en la materia prima seleccionada | | |
|--|-------------------------------------|------------------|
| Tipo de residuo | Porcentaje de sólidos totales (%ST) | Fuente |
| Estiércol vaca | 20 | (FAO, 2011) |
| Estiércol porcino | 35 | (Mojica, 2016) |
| Suero de leche | 3.5 | (Robalino, 2011) |
| Rastrojo de maíz | 77 | (FAO, 2011) |

Se observa que se encuentran dentro del rango de valores reportados de sólidos totales (ver Tabla 3.11). En las tablas del A3.5 - A3.7 del Anexo 3 se observa con detalle el contenido de sólidos reportado en el rango de la tabla 3.11 para cada especie y su contenido de sólidos total en kg.

Al no cumplir con el porcentaje de sólidos totales deseados para la operación del biodigestor, se calcula la cantidad de agua a añadir en cada caso (ver Tabla 4.3).

| Tabla 4.3 Cantidad de agua añadida a cada residuo. Fuente: Elaboración propia. | |
|---|---|
| Tipo de Residuo | Wagua (partes de agua/partes de insumo) |
| Estiércol vaca | 1.5 |
| Estiércol porcino | 3.37 |
| Suero de leche | 0 |
| Rastrojo de maíz | 8.6 |

4.2 PARÁMETROS DE DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR

4.2.1 Tiempo de Retención Hidráulica

De acuerdo con la ecuación (3.7) el TRH=66 días para la Top=17.76°C mientras que para la Top=39°C el TRH=20 días. Este último valor será a partir del cual se dimensionará el digestor.

4.2.2 Número de animales/Especies vegetales disponibles

Con la información proporcionada por el productor, se registró el número de especies con las que se cuenta y se clasificó de acuerdo con las Tablas A2.1-A2.3 como se muestra en la Tabla 4.4.

Una vez que se tiene el registro de animales, la formulación y se conoce el TRH, se procede a calcular la C_d , Vol_d , V_{agua} , V_{Tmasa} , V_B y el V_{TOTAL} estos resultados se muestran en la Tabla 4.5 y se aprecia con detalle para cada especie en el Anexo 3, Tablas A3.1 - A3.3.

| Tabla 4.4 Número y tipo de animal. Fuente: Elaboración propia | | |
|---|-------------------------------|--------------------|
| ESPECIE DESCRITA | ESPECIE EQUIVALENTE EN TABLAS | Número de animales |
| Vaca lechera | Vaca lechera productiva | 500 |
| Semental Bovino | Suiza toro | 5 |
| Becerras/Toretas | Vacuno ternero | 300 |
| | TOTAL | <u>805</u> |
| Hembras porcinas | Hembra al empadre | 60 |
| Cerdos en crecimiento | Porcino en crecimiento | 300 |
| Semental Porcino | Semental | 1 |
| | TOTAL | <u>361</u> |

Adicionalmente se agregaron los parámetros de la carga diaria de agua $C_{d_{agua}}$ (kg/día) para obtener una carga diaria total en kg de la biomasa en suma con el agua a agregar.

| Tabla 4.5 Parámetros de dimensionamiento del digester. Fuente: Elaboración propia. | |
|--|----------|
| Parámetro | Valor |
| C_d (kg/día) | 12665.54 |
| $C_{d_{agua}}$ (kg/día) | 21758.81 |
| $C_{d_{total}}$ (kg/día) | 34424.35 |
| Vol_d (m ³ /día) | 12.89 |
| V_{agua} (m ³ /día) | 21.76 |
| V_{Tmasa} (m ³) | 34.65 |
| $V_{b_{teórico}}$ (m ³) | 729.93 |
| V_B (m ³) | 308.00 |
| TRH (días) | 20.00 |
| V_{TOTAL} | 924.01 |

El Volumen de biogás teórico es el volumen de biogás que se calcula obtener diariamente, sin embargo, como lo indica la ecuación 3.17 el volumen adicional para el digester es una tercera parte del VTmasa por el TRH, mismo que se sacará continuamente por la tubería de gas.

4.3 DIMENSIONAMIENTO DE LOS COMPONENTES ADICIONALES AL REACTOR

De acuerdo con las ecuaciones de dimensionamiento (3.18 a 3.22), en la Tabla 4.6 se muestran las dimensiones y capacidad de cada en cada componente adicional al reactor.

| Tabla 4.6 Componentes adicionales al reactor. Fuente: Elaboración propia | | | | | | |
|--|-------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------|-------------------------|
| Componente | Dimensiones | | | | | |
| | Ancho (m ²) | Largo (m ²) | Altura (m ²) | Volumen (m ³) | Potencia (kW) | Energía consumida (kWh) |
| Tanque de acondicionamiento/ alimentación | 3 | 6 | 0.944 | 17 | | |
| Laguna de secado | 20 | 30 | 1.37 | 820.8 | | |
| Tanque de almacenamiento de rastrojo | 2 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | | |
| Bomba de alimentación | | | | | 40 | 963 |
| Sistema de agitación | | | | | 8.2 | 197.2 |
| Soplador | | | | | 16.56 | 399.6 |

Con base en estas dimensiones se construye el layout del sistema y con la capacidad de cada sistema consumidor de energía se calcula la E_{in} del caso 1 como lo indica la ecuación (3.29).

$$E_{in1}=1559.8 \text{ kWh}$$

4.4 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO

A través de la ecuación (3.23) se obtuvo la eficiencia mensual del colector cuyos valores se muestran en la Figura 4.1. Se observa que la mayor eficiencia se obtiene en el mes de abril, uno de los meses más calurosos y con altos niveles de irradiancia (ver Tabla 3.12) mientras que la eficiencia más baja se obtiene en el mes de diciembre.

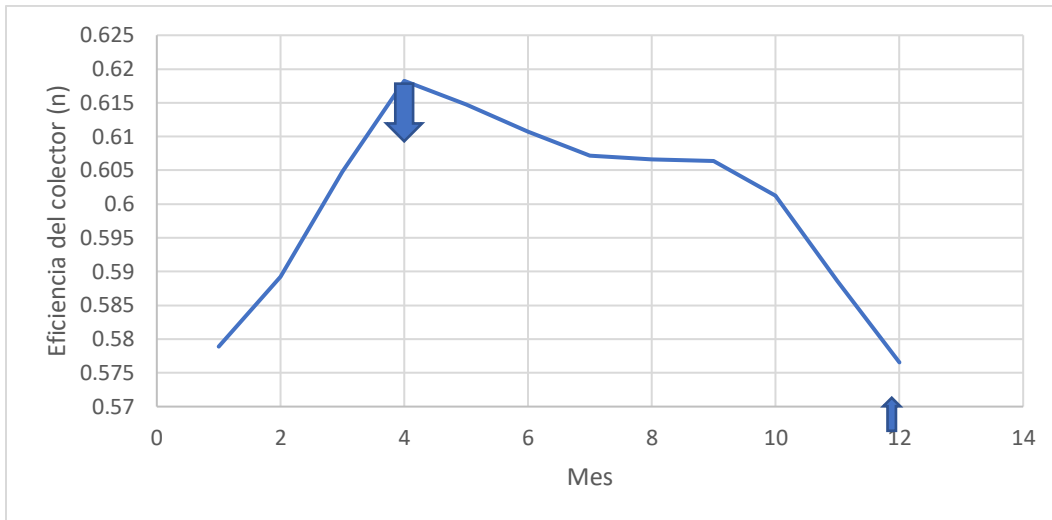


Figura 4.1 Eficiencia del colector a lo largo del año. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.2 se realiza una comparación entre la radiación mensual a una inclinación de 20° (aproximada a la ubicación de Metepec) y la radiación incidente a un ángulo óptimo, es decir si los colectores contaran con tecnología de seguimiento, nótese que la variación no es considerable por lo que se dimensionará con el ángulo de 20°.

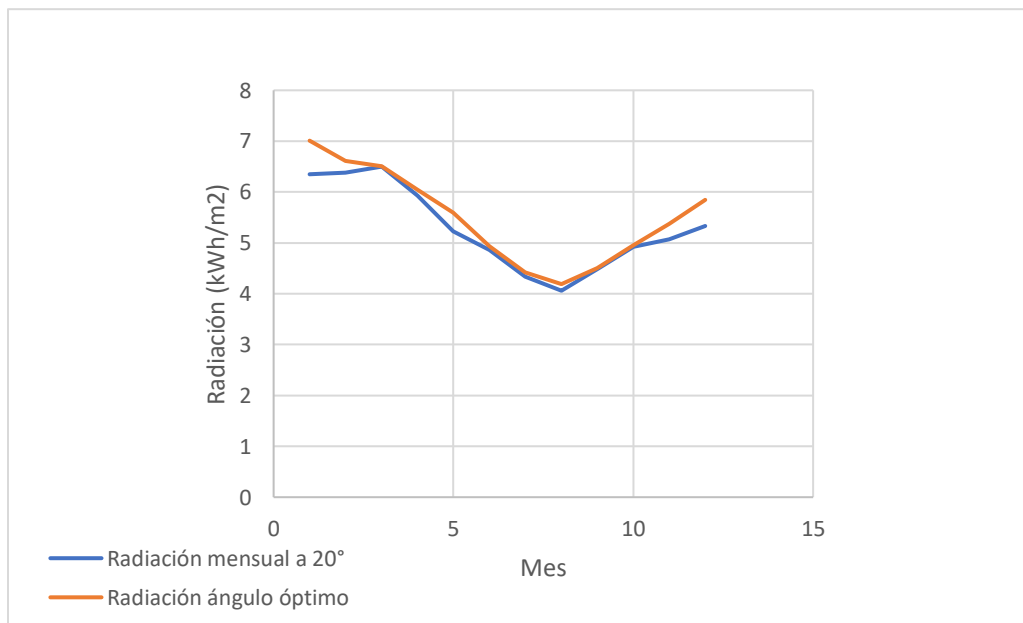


Figura 4.2 Radiación mensual, Metepec, Hidalgo. Fuente: Elaboración propia.

La cantidad de calor requerido diariamente se calculó con la ecuación (3.24) adicionando las pérdidas de calor por un descenso diario de la temperatura (durante la noche) de 3°C aproximadamente. En la Figura 4.3 se observa la comparación en los flujos de calor.

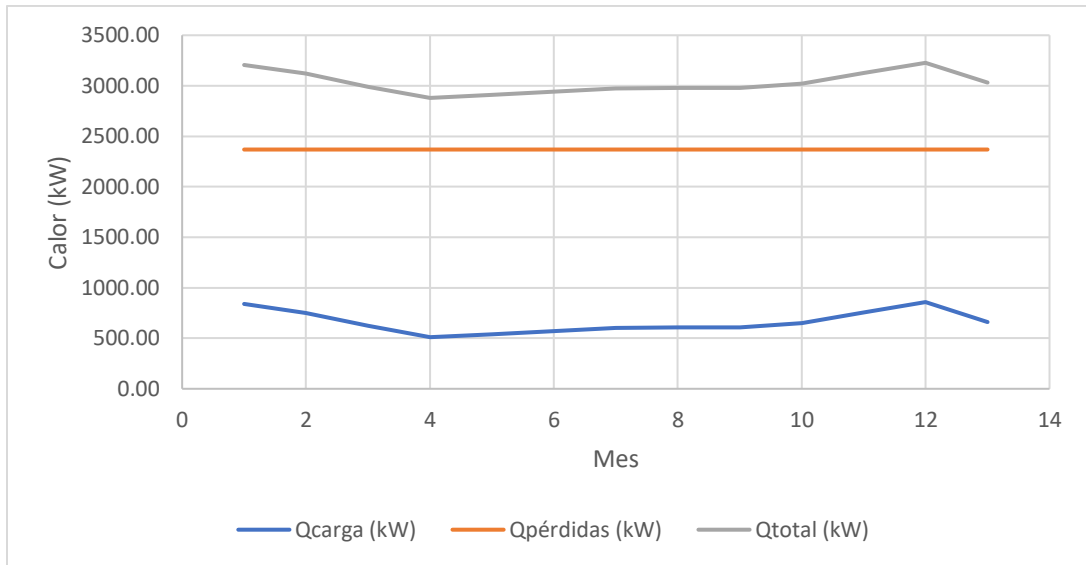


Figura 4.3 Requerimiento energético a lo largo del año. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, con el área de captación se obtuvo el número de colectores a utilizar, en la Figura 4.4 se compara el número ideal de colectores (ecuación 3.26 sin considerar factor de seguridad ni eficiencias), el número real (considerando el factor de seguridad y las eficiencias de la ecuación 3.27) y el número de colectores que se requerirían con tecnología de seguimiento en los colectores.

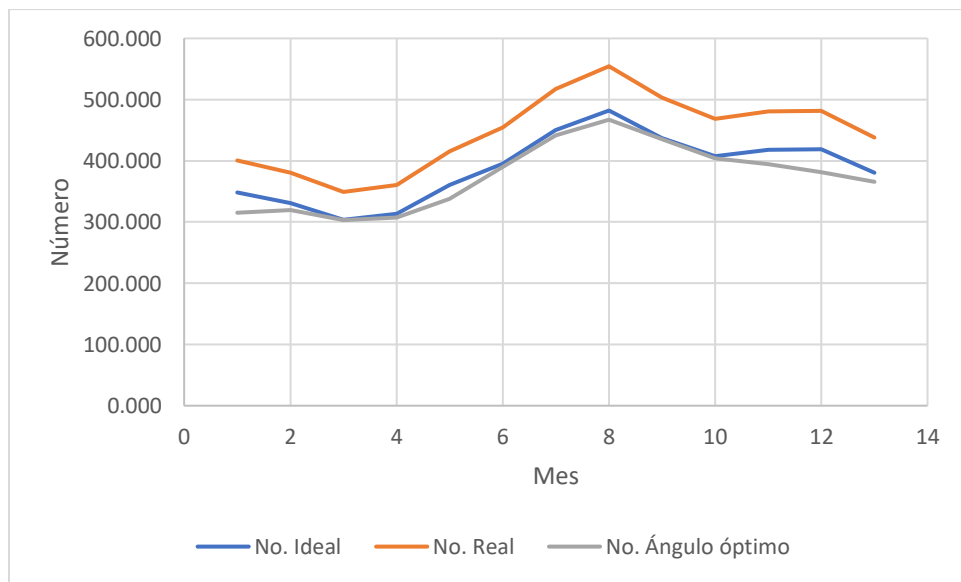


Figura 4.4 Número de colectores requeridos. Fuente: Elaboración propia.

El número de colectores obtenidos en un caso real es de 530.

4.5 GENERACIÓN ELÉCTRICA

En el escenario 2 ($T_{op}=39^{\circ}\text{C}$) para el balance energético se calculó una generación de energía con base en la ecuación 3.28 igual a

$$E_{gen_1} = 5109 \text{ kWh}$$

Considerando un $P_{cal_{biogás}} = 7 \text{ kWh/m}^3$;

y una producción de biogás diaria $V_B=729.93 \text{ m}^3$

En el escenario 1 ($T_{op}= 17.76^{\circ}\text{C}$) se considera una producción diaria del 42.5% del biogás generado en el escenario de alta temperatura, lo que resulta en un $V_B=310.2 \text{ m}^3$

$$E_{gen_2} = 2171.54 \text{ kWh}$$

4.6 BALANCE ENERGÉTICO

Con el cálculo de la energía generada en cada caso, se plantearon los flujos de entrada y salida de energía en cada caso, en la Tabla 4.7 se observa el balance energético con las consideraciones mencionadas en la sección 3.6.

| Tabla 4.7 Balance de energía en los E1 y E2. Fuente: Elaboración propia | | | | | | | |
|---|---------------|--------------|---------|---------------------------------|---------------|--------------|-------|
| ESCENARIO 1 (SIN CALENTAMIENTO) | | | | ESCENARIO 2 (CON CALENTAMIENTO) | | | |
| | | | | Mensual | | | |
| In | (kWh) | Out | (kWh) | In | (kWh) | Out | (kWh) |
| Ebomba | 963 | Gas generado | 2171.54 | Qttotal (Qin+Qout) | 2976.23 | Gas generado | 5109 |
| Eagitador | 197.2 | | | Ebomba | 963 | | |
| Esoplador | 399 | | | Eagitador | 197.2 | | |
| | | | | Esoplador | 399 | | |
| Etotal | 612.34 | | | Etotal | 573.57 | | |

Como se aprecia el flujo total de energía en el caso 1 es mayor al caso dos debido a la energía requerida en el calentamiento del digestor, en la siguiente sección se explican estos escenarios con base en los costos y cómo se relaciona la aplicación final de la energía producida con el costo de recuperación de la inversión.

4.7 MODELO DE CÁLCULO ECONÓMICO

4.7.1 Ahorro/Venta de fertilizantes

Con base en las ecuaciones 3.34 a 3.40 el costo anual de los fertilizantes obtenidos se resume en la Tabla 4.8, para la cual se consideraron 34.65 miles de litros diarios. Esto aplica para ambos escenarios de generación.

| Tabla 4.8 Costos de fertilizantes. Fuente: Elaboración propia. | |
|---|-------------------------|
| Nombre del fertilizante | Venta anual (\$ MXN) |
| Nitromag | 351724.71 |
| Superfosfato triple | 49214.30 |
| Muriato de Potasio | 242075.95 |
| Oxido de Magnesio | 4229.24 |
| TOTAL | <u>647244.20</u> |

4.7.2 Ahorro/Servicio de tratamiento de aguas

Tomando como base la tecnología de la marca BossTechnology en tratamiento de aguas residuales y las ecuaciones 3.42 a 3.44 el costo del tratamiento del agua residual que será añadida anualmente se muestra en la Tabla 4.9. Esto aplica para ambos escenarios de generación.

| Tabla 4.9 Costo de tratamiento de aguas. Fuente: Elaboración propia | | |
|---|-------------------------|--------------------------------------|
| Cantidad de agua a tratar (lts) | Unidades de tratamiento | Costo ANUAL de trat de agua (\$ MXN) |
| 21758.81 | 9.46 | <u>227048.45</u> |

4.7.3 Ahorro en electricidad

De acuerdo con los escenarios planteados, se tienen dos escenarios de ahorro en electricidad, para los cuales se muestra el cálculo detallado en el Anexo 3, Tabla A3.4, con base en las ecuaciones 3.45 a 3.49 el costo anual por la electricidad generada en cada caso se muestra en la Tabla 4.10:

| Tabla 4.10 Costo de la electricidad geneada anualmente. Fuente: Elaboración propia. | | |
|---|--------------------------------|--------------------------------|
| | Escenario 1 (Debajo de 100 kW) | Escenario 2 (Arriba de 100 kW) |
| Costo (\$ x año) | <u>66111.33</u> | <u>355420.78</u> |

4.7.4 Ahorro en gas

De manera similar al cálculo anterior se obtuvo el costo del biogás generado equivalente en gas LP con las ecuaciones 3.50 a 3.52. Se puede ver de manera detallada en el Anexo 3, Tabla A3.5.

| Tabla 4.11 Costo del gas generado anualmente. Fuente: Elaboración propia. | | |
|---|-------------------|-------------------|
| | Escenario 1 | Escenario 2 |
| Costo (\$ MXN x año) | <u>1717281.55</u> | <u>4040926.24</u> |

4.7.5 Costo del sistema de calentamiento

En el costo del sistema de calentamiento únicamente se consideró el precio por colector de manera que el costo total de los colectores se calcula como se muestra en la Tabla 4.12

| Tabla 4.12 Costo del sistema de calentamiento por colectores solares. Fuente: Elaboración propia con datos de (Modulo Solar, 2019) | |
|--|----------------|
| Precio por colector (\$ MXN) | 10690 |
| Número de colectores | 530 |
| Costo por calentamiento (\$ MXN) | <u>5665700</u> |

Cuyo valor sólo se considerará en la inversión inicial de los casos de generación de gas y electricidad de uso final con sistema de calentamiento.

4.7.6 Escenarios de producción energética

Finalmente, con las consideraciones hechas en la sección 3.7 se calcularon los parámetros necesarios para el flujo de caja del proyecto en cada caso de producción de energía, como se muestra en las Tablas 4.13 a 4.16. En las tablas A4.1-A4.4 del ANEXO 4 se observa a detalle el análisis financiero.

| Tabla 4.13 Escenario 1. Caso 1. Producción de gas sin calentamiento. Fuente: Elaboración propia. | |
|---|------------------------|
| VALOR PRESENTE NETO | \$21,268,659.14 |
| VALOR ANUAL EQUIVALENTE | \$1,482,546.37 |
| PERIODO DE RECUPERACIÓN (DESCONTADO) | 2.4 |
| COSTO-BENEFICIO | 2.3 |
| TIR | 41.1% |

En la Tabla 4.13 se muestra el Caso 1, un escenario de producción de biogás cuya aplicación será el gas como combustible de uso final, ya sea como sustituto o equivalente del gas LP. El periodo de recuperación es de 2.4 años con una rentabilidad del 41.1% y una RBC positiva de 2.3 que indica que los beneficios del proyecto son mayores que los costos a lo largo de los 20 años de vida.

| Tabla 4.14 Escenario 1. Caso 2. Producción de electricidad sin calentamiento. Fuente: Elaboración propia. | |
|---|-----------------------|
| VALOR PRESENTE NETO | \$6,971,773.53 |
| VALOR ANUAL EQUIVALENTE | \$485,972.22 |
| PERIODO DE RECUPERACIÓN (DESCONTADO) | 4.3 |
| COSTO-BENEFICIO | 2.1 |
| TIR | 23.1% |

En el mismo Escenario, Caso 2, se considera la generación de electricidad de uso final, como se muestra en la Tabla 4.14, donde el periodo de recuperación es casi el doble (4.3 años) y la rentabilidad casi 50% menor al primer caso, al tener una inversión inicial mayor en la planta de generación y una pérdida importante en la transformación de energía.

| Tabla 4.15 Escenario 2. Caso 3. Producción de gas con calentamiento. Fuente: Elaboración propia. | |
|---|------------------------|
| VALOR PRESENTE NETO | \$48,938,039.13 |
| VALOR ANUAL EQUIVALENTE | \$3,411,259.34 |
| PERIODO DE RECUPERACIÓN (DESCONTADO) | 2.4 |
| COSTO-BENEFICIO | 3.3 |
| TIR | 41.0% |

En el segundo escenario se añade el sistema de calentamiento en los costos de inversión inicial para la producción de gas (ver Tabla 4.15), este es el Caso 3, con el mismo periodo de recuperación y TIR del caso 1, pero con una relación costo-beneficio y VPN/VAE mayor, debido a que la producción de gas es mayor y por lo tanto la venta o ahorro del combustible conlleva un mayor ingreso anual.

| Tabla 4.16 Escenario 2. Caso 4. Producción de electricidad con calentamiento. Fuente: Elaboración propia. | |
|---|-----------------------|
| VALOR PRESENTE NETO | \$3,608,505.26 |
| VALOR ANUAL EQUIVALENTE | \$251,533.32 |
| PERIODO DE RECUPERACIÓN (DESCONTADO) | 10.7 |
| COSTO-BENEFICIO | 1.3 |
| TIR | 6.9% |

Por último, en el Caso 4 (ver Tabla 4.16) se observa el mayor periodo de recuperación de la inversión, por encima de los 10 años, con una RBC positiva pero muy cercada a 1 lo que indica ingresos mayores a los costos por un margen relativamente bajo, también se observa la menor rentabilidad (TIR).

4.8 AHORRO EN EMISIONES DE CO₂

Siguiendo las ecuaciones 3.60 y 3.61 el ahorro en emisiones de CO₂eq de CH₄ se muestra en la Tabla 4.17.

| Tabla 4.17 Ahorro en emisiones de CH ₄ /CO ₂ eq. Fuente: Elaboración propia | |
|---|---------------------------------|
| 104643 | l de metano diario |
| 38194695 | l de metano al año |
| 38194.695 | m ³ de metano al año |
| <u>25055.7199</u> | kg de metano al año |
| <u>576281.558</u> | kg de CO ₂ |

4.9 DISEÑO DEL SISTEMA DE BIODIGESTIÓN

Tomando en cuenta las dimensiones obtenidas en la sección 4.3 y las consideraciones hechas con base en la normativa de la sección 3.9, a continuación, se muestra el layout del sistema realizado en SketchUp 2019.

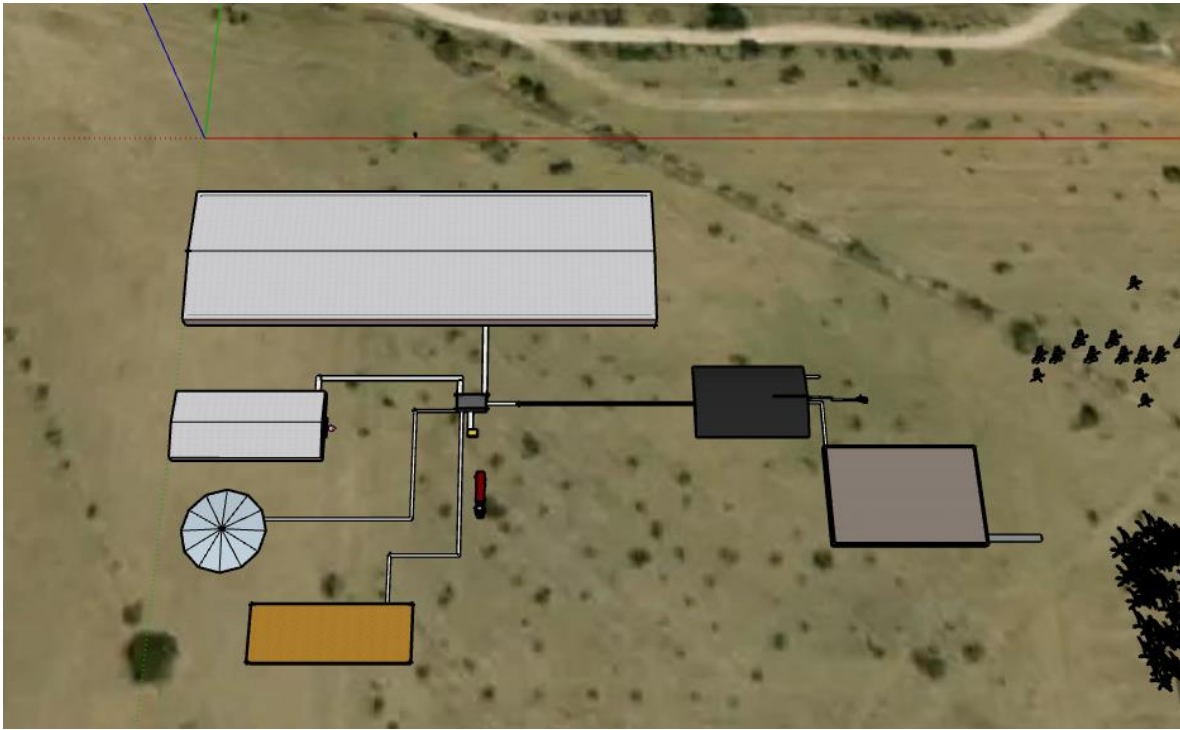


Figura 4.5 Vista aérea del sistema de digestión.

En la Figura 4.5 se aprecian todos los componentes del sistema de digestión, colocados sobre la geolocalización con las coordenadas correspondientes a Metepec, Hidalgo.

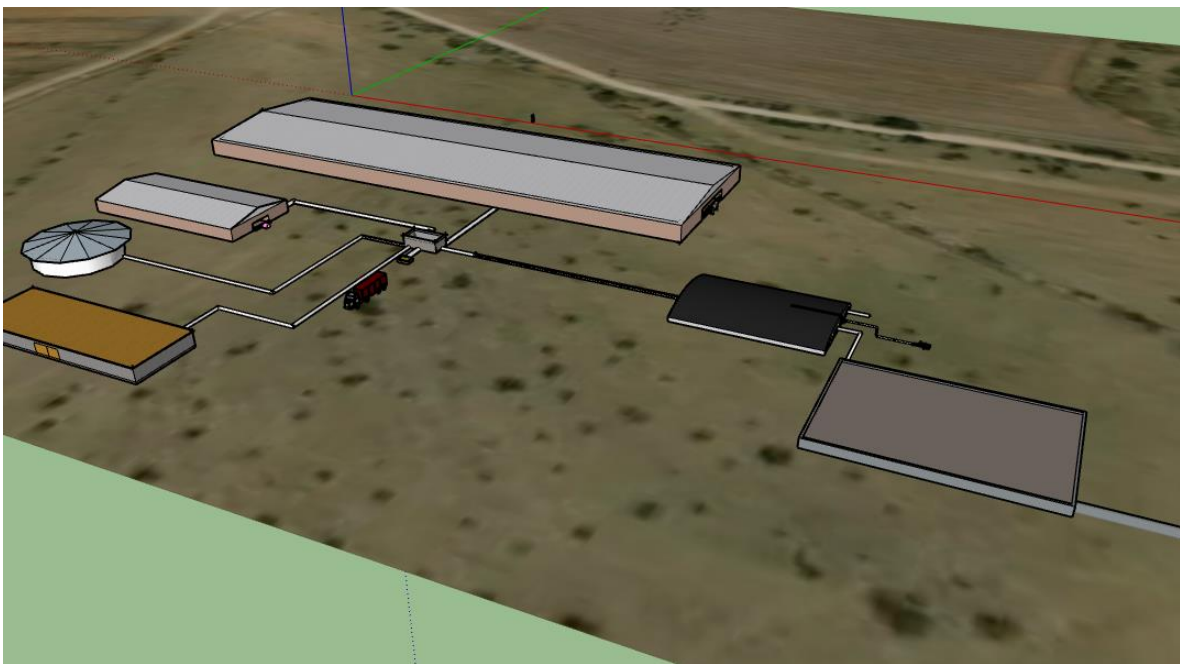


Figura 4.6 Vista aérea-sur del sistema de digestión.

En la Figura 4.6 se aprecia la entrada a los establos y a la lechería y la intersección de las tuberías dirigidas al tanque de alimentación.



Figura 4.7 Vista Este del sistema de digestión.

La Figura 4.7 permite ver el sistema de digestión desde los cultivos de maíz y nopal que serían los cultivos potenciales para alimentar con el fertilizante obtenido, sólido en el caso del maíz y líquido en el caso del nopal.

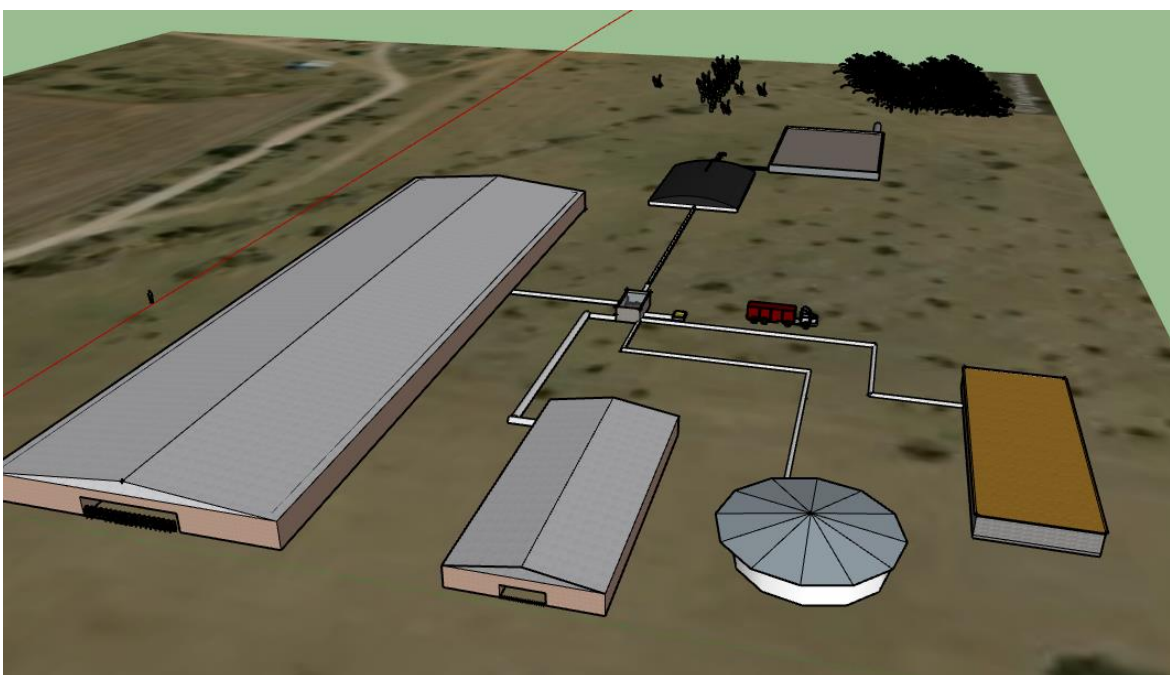


Figura 4.8 Vista Oeste del sistema de digestión.

En la Figura 4.8 se aprecian los cultivos mencionados, así como el área que ocupan. En el anexo 4 (Figuras A5.1 – A5.14) se pueden apreciar más imágenes a detalle del sistema de digestión.

En el caso específico del usuario, como se describió en la sección 1.2 se requiere de energía calorífica para la pasteurización de la leche a través de calderas, utilizando el biogás producido en los casos 1 y 3 en la tabla 4.18 se muestra una posible aplicación final en el lugar de instalación.

En el escenario 1, sustituyendo el Gas Natural por biogás se podría satisfacer la demanda diaria 1.24 veces, mientras que en el escenario 2 se podría sustituir hasta 3 veces.

| Tabla 4.18 Posible aplicación final. Fuente: Elaboración propia | | |
|---|----------------------|---|
| | Biogás generado (m3) | Veces que se satisface el consumo de las calderas |
| ESCENARIO 1 | 310.2 | 1.24 |
| ESCENARIO 2 | 729.93 | 2.92 |

En la Figura 4.9 se aprecia el diagrama de flujo final del sistema diseñado, en este caso la aplicación final dependerá del usuario y a manera de sugerencia se muestran los usos finales comentados en la Sección 2.3.3.

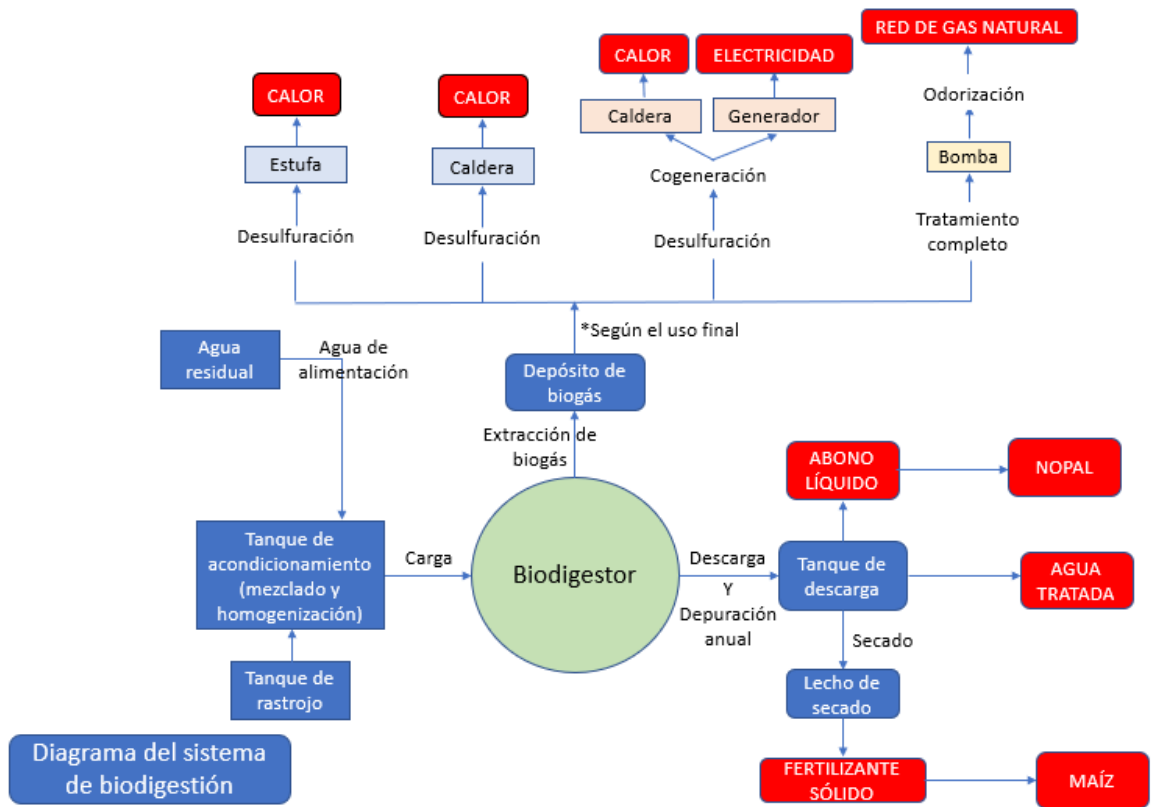


Figura 4.9 Diagrama final del sistema de digestión.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Una de las labores más importantes en la realización de este trabajo radicó en la recolección de datos físicos y biológicos sobre las diferentes especies de ganado y algunas especies vegetales cuyos desechos son potenciales fuentes de biomasa para la biodigestión, a través de la condensación de diferentes trabajos se logró generar una base de datos amplia y sólida para facilitar el manejo de esta información en este y futuros trabajos con criterios similares en México y otros países latinoamericanos.

Se identificaron los insumos disponibles y se propusieron distintas combinaciones para obtener una formulación adecuada que permitió utilizar todos los desechos en diferentes proporciones con el fin de obtener una mezcla con características adecuadas para llevar a cabo el proceso de digestión.

Uno de los criterios de diseño más relevantes en el caso de estudio fue la operación a bajas temperaturas (debajo del orden mesofílico ideal) para lo cual se propuso un sistema de calentamiento (con tecnologías de fuentes renovables de energía) que permita operar en el rango mesofílico máximo o termofílico mínimo, en el análisis tecno-económico se aprecia que en ambos casos se obtienen beneficios.

En el primer caso, en condiciones críticas, la producción de biogás para su uso como sustituto o equivalente de gas LP de uso final tiene una tasa de retorno de inversión de dos años y medio, mientras que en electricidad de uso final (segundo caso) es mayor a 4 años.

En el cuarto caso, con el sistema de calentamiento, debido a la alta inversión inicial que involucra el campo de colectores, el generador eléctrico y la adaptación a la red, la producción de electricidad de uso final eleva el tiempo de recuperación de la inversión a más de 10 años.

El tercer caso es el que se observa más viable técnica y económicamente, ya que a pesar de que el tiempo de recuperación de la inversión y la rentabilidad que se mantienen similares al caso 2, debido a la alta producción de biogás y la relativamente baja inversión, en este caso la relación beneficio-costos, así como el valor del proyecto son mayores.

En ambos casos de generación de energía eléctrica se consideran las tarifas nacionales actualmente subsidiadas, por lo que a falta del subsidio el tiempo de recuperación sería aún menor.

Por lo anterior, se recomienda el uso de una tecnología de fuente renovable como lo es el calentamiento solar por medio de colectores, para auxiliar la operación del biodigestor,

incrementar la temperatura y maximizar la producción de biogás para su uso como gas de uso final a través de la generación sustentable de energía.

Como se aprecia en la figura 4.9 además de la viabilidad del sistema, se recomienda analizar los posibles usos finales para el gas como pueden ser la producción de calor, generación de combustible para autos a base de gas o su inyección a la red de gas natural.

Adicionalmente se tiene un ahorro considerable de emisiones de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ en CH_4 de 576 toneladas, que se dejan de emitir al recolectar el estiércol que se utilizaría en el digestor. Esto sin contar el impacto ambiental del lactosuero, del que se tiene menor información, ya que este se desecha en una laguna al aire libre y genera fauna nociva en el lugar.

En el caso de los fertilizantes, se tienen las opciones de generar “biol” o “biosol” que es el lodo en sus presentaciones líquido y sólido respectivamente y se puede utilizar directamente sobre el cultivo o secar para fijar los nutrientes y vender en cualquiera de las presentaciones. En ambos casos, el impacto del fertilizante es positivo para las tierras de cultivo y genera un ahorro importante, sobre todo en los lugares donde no se tiene un apoyo gubernamental para su adquisición.

Se desea que este trabajo de investigación sirva como herramienta para el desarrollo de biodigestores en el sector agropecuario y ponga a la mano del usuario la información que requiera para evaluar la viabilidad de una tecnología de fuentes renovables en su entorno y lugar de trabajo, ya que además la instalación y operación de estas tecnologías implica la generación de empleos locales en diversas áreas laborales, con las que el usuario puede familiarizarse y profesionalizarse.

Como trabajos futuros se contemplan el análisis de temperaturas en el reactor para conocer cómo interviene en la temperatura de operación la reacción de descomposición de la biomasa; el diseño de bombas, agitadores y mezcladores, y las diferentes aplicaciones y beneficios del biogás en la industria, comercio y hogar. Además de la intervención de áreas que permitan el trabajo interdisciplinario como la ingeniería ambiental y de diseño, química, biología y diferentes enfoques de la ingeniería en energías renovables.

La base de datos de este trabajo se condensa en un banco de información que se encuentra en vías de protección para el desarrollo de un *software* de cálculo que permita obtener todos los parámetros de diseño del digestor, así como la biomasa y los componentes adicionales y ponerlo al alcance de los operadores y diseñadores de biodigestores.

REFERENCIAS

- Abate, S. (2015). *Biodigestores*. Argentina: Universidad Nacional Río Negro.
- Abdallah, M., Ghenai, C., & Suhair, S. (2018). Biogas Production from Different Types of Cow Manure. *Advances in Science and Engineering Technology International Conferences*, (pág. A). Emiratos Árabes Unidos.
- Acosta, G. K. (2016). *Fundamentos de Ingeniería económica. Mapa conceptual de una evaluación económica*. Temixco, Morelos: IER UNAM.
- AGENEX. (2008). Los Residuos Ganaderos. Agencia Extremeña de la Energía, España.
- AGRICULTURERS. (2017). Los fertilizantes en la agricultura. *Red de Especialistas en Agricultura*, Chile.
- Aguirre, M. (2018). *Mexico Maxico*. Obtenido de Exportaciones de Petróleo Crudo 1974-2017: <http://www.mexicomaxico.org/Voto/PetroCrudo.htm>
- AMBB. (2017). *Biodigestores en el sector agropecuario de México*. México, D.F.: Asociación Mexicana de Biomasa y Biogás A.C.
- AquaLimpia Consultores. (2007). Obtenido de www.aqualimpia.com
- Arronis, V. (2003). *Recomendaciones sobre sistemas intensivos de producción de carne: semiestabulación y suplementación estratégica en pastoreo*. Costa Rica: Ministerio de Agricultura y Ganadería.
- Ashraf, M. (2016). Estimation of bioenergy potential for local biomass in the United Arab Emirates. *Emirates J. Food Agriculture*, 99-106.
- BancoMundial. (Acceso a la electricidad de 2018). Obtenido de <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.ELC.ACCS.RU.ZS>
- Banxico. (2019). Obtenido de Sistema de Información Económica: <http://www.banxico.org.mx/SieInternet/consultarDirectorioInternetAction.do?accion=consultarCuadro&idCuadro=CF107§or=22&locale=es>
- Banxico. (2019). *Inflación*. Obtenido de Banco de México: <http://www.anterior.banxico.org.mx/portal-inflacion/inflacion.html>
- Bavera, G., & Peñafort, C. (2006). *Lectura de la bosta del bovino y su relación con la alimentación*. Argentina: Cursos de Producción Bovina de Carne, FAV UNRC. Obtenido de Lectura de la bosta del bovino y su relación con la alimentación.
- Blanco Ochoa, M. (2004). Zootecnia de bovinos productores de leche. En *Apuntes zootecnia. Unidad 3* (págs. 102-138). México: UNAM.

- Borges, S. W. (2011). Generation of bioenergy and biofertilizer on a sustainable rural property. *Biomass and Bioenergy*, 2608-2618.
- BossTechnology. (2019). *Plantas tratadoras*. Obtenido de <http://www.bosstechnology.com.mx/ptar.html>
- Casas P., M. (2009). Estudio de Factibilidad para la puesta en marcha de los digestores anaerobios en los establos lecheros en la Cuenca de Delicias, Chih. *Cuarta Época*, 745-756.
- CFE. (2019). *Tarifas CFE*. Obtenido de <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCREIndustria/Tarifas/GranDemandaMTO.aspx>
- Chen-Yeon, C., & Zih-Fen, W. (2017). Dairy cow solid waste hydrolysis and hydrogen methane productions by anaerobic digestion technology. *International Journal of hydrogen energy*, 30591-30598.
- CIFOR. (2009). Oportunidades y desafíos para la producción de biocombustibles en América Latina. *Centro para la Investigación Forestal Internacional. Boletín Ambiental*.
- CNCGN. (2018). *Importancia del Gas Natural*. Obtenido de Centro Nacional de Control del Gas Natural: <https://www.gob.mx/cenagas/articulos/importancia-del-gas-natural>
- CONABIO. (2015). *Proyecto L200*. Obtenido de Comisión Nacional para el conocimiento y Uso de la Biodiversidad: www.conabio.gob.mx/institucion
- CONABIO. (Noviembre de 2018). *Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Portal de geoinformación*. Obtenido de Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Contreras, R., & Vilches, R. (2007). "Diseño de un sistema de manejo y utilización de purines en predios de engorda bovina intensiva, basado en estudios de caso". *Pontificia Universidad Católica de Chile*.
- CRE. (2009). *Generación Distribuida "Bioenergía de Nuevo León, S.A. de C.V.: Una asociación público-privada exitosa"*. Obtenido de Comisión Reguladora de Energía: <http://www.cre.gob.mx/documento/1530.pdf>
- CRE. (2018). Obtenido de <https://www.gob.mx/cre/documentos/precios-al-publico-de-gas-lp-reportados-por-los-distribuidores>
- CRE. (Índices de Referencia de Precios de Gas Natural. Comisión Reguladora de Energía; de 2018). Obtenido de <http://www.cre.gob.mx/IPGN/>
- DatosMacro. (2019). *Evolución del Precio del Petróleo OPEP 2019*. Obtenido de <https://datosmacro.expansion.com/materias-primas/opec>

- Díaz, I., & Figueroa-González, I. (2016). Enhancing the biomethane potential of liquid dairy cow manure by addition of solid manure fractions. *Springer Science*, 2097-2102.
- Durazno C., A. (2018). *Valoración de estiércol Bovino y Porcino en la producción de biogás en un biodigestor de producción por etapas*. Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- FAO. (1992). *Los Fertilizantes y su uso*. IFA.
- FAO. (2011). Manual de Biogás. Chile: Ministerio de Energía; Proframa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
- FAO. (2012). *HOJAS DE INFORMACIÓN BÁSICA, CRÍA DE CERDOS*. Obtenido de <http://www.fao.org/docrep/v5290S/v5290s23.htm#TopOfPage>
- Figueroa V., U. (2009). Estimación de la producción de estiércol y de la excreción de nitrógeno, fósforo y potasio por bovino lechero en la comarca lagunera. *Agricultura Orgánica 2a ed.*, 128-151.
- FIRCO. (2009). México: Diagnóstico General de la Situación Actual de los Sistemas de Biodigestión en México. Fideicomiso de Riesgo Compartido.
- FIRCO. (2017). *Fideicomiso de Riesgo Compartido. La Ganadería en México*. Obtenido de <https://www.gob.mx/firco/articulos/la-ganaderia-en-mexico?idiom=es>
- Gipuzkoa, D. F. (2005). Censo de animales. España.
- GNU. (2015). *Gas Natural para la Generación de Energía Eléctrica*. Obtenido de <http://www.gasnaturalgnu.com/gas-natural-para-la-generacion-de-energia-electrica-estas-son-sus-ventajas/>
- Gourcy, F. R. (2016). *Cómo el petróleo y el dólar afectan el precio de los fertilizantes*. Obtenido de <https://www.hortalizas.com/nutricion-vegetal/como-el-petroleo-y-el-dolar-afectan-el-precio-de-fertilizantes/>
- GreenPeace. (2018). *Fractura hidráulica para extraer gas natural (fracking)*. Obtenido de https://archivo-es.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/cambio_climatico/Fracking-GP_ESP.pdf
- GSI. (2016). GRI-GM13 Standard Specification. USA: Geosynthetic Institute.
- ICE. (2011). *Diseño de biodigestores y producción de electricidad*. Costa Rica.
- IDEAM. (2007). *Información Técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el Cambio Climático*. Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IEA. (Diciembre de 2018). *Key World Energy Statics*. Obtenido de <https://www.iea.org/statistics/kwes/consumption/>

- INAFED. (Noviembre de 2018). *Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México*. Obtenido de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM13hidalgo/municipios/13035a.html>
- INEEC. (2015). *Primer Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- INEGI. (2010). *Estadísticas Municipales 2010*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/sem10/default.htm>
- Islas Samperio, J. (Septiembre de 2007). Prospectiva del uso de la Bioenergía en México. CIE-UNAM. Academia de Ingeniería.
- Jaramillo, J. (2014). ¿Qué es el fracking? *Revista de divulgación científica y tecnológica de la Universidad Autónoma de Nuevo León*, 7-14.
- LGEEPA. (2015). Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. DOF-09-01-2015.
- LGEEPA, R. (s.f.). Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en materia de Evaluación del Impacto Ambiental. 2015. DOF 31-10-2014.
- Li, B., & Fikse, W. (2018). Genetic heterogeneity of feed intake, energy-corrected milk, and body weight across lactation in primiparous Holstein, Nordic Red, and Jersey cows. *American Dairy Science Association*, 10011-10021.
- Li, K., & Liu, R. (2018). Anaerobic co-digestion of animal manures with corn stover or apple pulp for enhanced biogas production. *Renewable Energy*, 335-342.
- Lovrencec, L. (s.f.). Highlights of socio-economic impacts from biogas in 28 target regions. *Sinergija-Intelligent Energy Europe*. D.2.4., WP2.
- Luna, N., Del Río Portilla, J., & Rendón, G. (2018). *Biodigestores*. México: Terracota.
- Martínez, C. (2007). Volumen de biodigestores. *Energía y tú*.
- Masera, O. (2006). *La bioenergía en México: Un Catalizador del Desarrollo Sustentable*. México: Red Mexicana de Bioenergía (RMB), Comisión Nacional Forestal (CONAFOR).
- Maxunite Co., L. (2019). *Alibaba*. Obtenido de <https://spanish.alibaba.com/product-detail/raw-material-industrial-grade-fertiliser-sale-mgo-competitive-price-magnesium-oxide-prices-60488605638.html?spm=a2700.8699010.normalList.20.36e2394aokY4XH>
- Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors. (s.f.). *ANSI/ASHRAE 93-1986 (RA91)*.

- Mojica, C. (2016). Estudio de las características físico-químicas de residuos orgánicos para su uso potencial en la producción de biogás. *Revista de Energía Química y Física*, 15-22.
- Mundial, B. (2018). *Crecimiento poblacional*. Obtenido de <https://datos.bancomundial.org/indicador/sp.pop.grow>
- NASA. (2017). *Carbon Balance and Management*. Obtenido de Joint Global Change Research Institute.
- NASA. (2019). *POWER Data Access Viewer*. Obtenido de Prediction of Worldwide Energy Resource: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- NMX-AA-034-SCFI-2015. (2015). Norma mexicana.
- NOM-001-SEDE-2005. (2005). Norma oficial mexicana.
- NOM-001-SEMARNAT-1996. (2003). Norma Oficial Mexicana.
- NOM-002-SEMARNAT-1996. (2003). Norma Oficial Mexicana.
- NOM-002-STPS-200. (2002). Norma oficial Mexicana.
- NOM-003-SECRE-2002. (2002). Norma oficial mexicana.
- NOM-003-SEMARNAT-1997. (1997). Norma Oficial Mexicana.
- NOM-004-SEMARNAT-2002. (2002). Norma oficial mexicana.
- NOM-017-STPS-2008. (2010). Norma oficial mexicana.
- NOM-083-SEMARNAT-2003. (2006). Norma oficial mexicana.
- NOM-085-SEMARNAT-1994. (2003). Norma Oficial Mexicana.
- NOM-SEMARNAT-004-SEMARNAT-2002. (2004). Norma Oficial Mexicana.
- NOPALIMEX. (2015). *Premio Nacional del Trabajo 2015*. Obtenido de Nopalimex, biogás y electricidad verde: <http://rtbioenergia.org.mx/wp-content/uploads/2016/11/Miguel-Ak%C3%A9-Madera.pdf>
- Noyola, R. (2001). *Diseño de reactores anaeróbicos*. México: Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Oliveira, B. (2014). Optimal operating conditions for maximum biogas production in anaerobic bioreactors. *Applied Thermal Engineering*, 197-206.
- Ontiveros, M. (2007). *Degradación biológica de aminas gastadas provenientes de los procesos de endulzamiento de gas de una refinería*. México: UNAM.

- Ortiz Espinosa, I. (2010). *Cómo medir la carga animal y el Índice Agostadero*. México: Reproducción Animal S.A. de C.V.
- Oviedo-Rondón, E. (2009). *Energy-saving poultry farms*. Estados Unidos, Estados Unidos.
- Paniagua S., L. (2013). *Estudio de la producción y combustión del biogás generación de biogás a partir del desecho del café*.
- Paniagua S., L., Gamboa, S., & Téllez, N. (2017). Saarbürcken: Biodigestor Casero Sustentable: Alternativa para mejorar la economía. Editorial Académica Española.
- PEMEX. (2015). *Productos y servicios, gas natural*. Obtenido de <http://www.gas.pemex.com.mx/PGPB/Productos+y+servicios/Gas+natural/>
- Pérez, J. (2010). Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños establos ganaderos y lecheros. Santiago de Chile, Chile.
- Pizarro, C., & W. Mulbry, D. (2006). An economic assessment of algal turf scrubber technology for treatment of dairy manure effluent. *Journal of ecological engineering*, 532-545.
- ProfEC. (2010). *Estudio sobre el Valor Fertilizante del Proceso "Fermentación Anaeróbica" para Producción de Biogás*. Alemania.
- PROFECO. (Electrodomésticos y la eficiencia energética de 2018). Obtenido de <https://www.gob.mx/profeco>
- RMB. (2011). La bioenergía en México. Situación actual y perspectivas. Red Mexicana de Bioenergía; México.
- RMB. (Biogás. Red Mexicana de Bioenergía de 2018). Obtenido de <http://rembio.org.mx/areas-tematicas/biogas/>
- Robalino, H. (2011). *Evaluación de la Actividad Biológica y Nutricional del Biol en Diferentes Formulaciones y la Respuesta a su Aplicación en Cultivos de Arroz*. Ecuador: Escuela Superior Politécnica del litoral.
- Rodríguez, R. (2015). Generación de Biogás a partir del lactosuero ácido. *INTI Ambiente*.
- Rotomoldeo, M. (Sistema Modular de biodigestión de 2017). Obtenido de <http://rotomoldeomym.com.ar/productos/sistema-modular-de-biodigestion/>
- RSA. (Abril de 2019). Soluciones integrales para el medio ambiente RSA S.A. de C.V. *Cotización*. México.
- SAGARPA. (2015). México: Plan de manejo de Residuos Generados en Actividades Agrícolas Primera Etapa: Diagnóstico Nacional.

- SAGARPA. (2018). Obtenido de <https://www.gob.mx/sagarpa/acciones-y-programas/componente-progan-productivo-2018>
- Sánchez Gómez, J. (2004). Zootecnia de bovinos productores de carne. En *Apuntes zootecnia. Capítulo 2* (págs. 69-101). México: UNAM.
- Sawin, L. (2016). *REN 21. Reporte de la situación mundial. Energías Renovables 2016*.
- Scarlat, N. (2018). A spatial analysis of biogas potential from manure in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 915-930.
- SEDAGRO. (2017). *Programa sectorial agropecuario*. Obtenido de Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Estado de Morelos:
https://www.hacienda.morelos.gob.mx/images/docu_planeacion/planea_estrategica/programas_sectoriales/09.-DESARROLLO_AGROPECUARIO.pdf
- SEMARNAT. (1992). Segundo Listado de Actividades Altamente Riesgosas.
- SEMARNAT. (2009). México: Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2009-2012. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- SEMARNAT. (2010). México: Especificaciones Técnicas para el Diseño y Construcción de Biodigestores en México. FIRCO, SAGARPA.
- SEMARNAT. (Generación de residuos sólidos municipales de 2017). Obtenido de
http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen/08_residuos/cap8.html
- SENER. (2017). *Balance Nacional de Energía 2016. Secretaría de Energía*.
- SENER. (2018). *Estadísticas Energéticas Nacionales, Hidrocarburos*. Obtenido de SIE, Sistema de Información Energética:
<http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=temas&fromCuadros=true>
- SMN. (Diciembre de 2018). *Sistema Meteorológico Nacional*. Obtenido de Normales climatológicas por estado: Consultado en: <http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=hgo>
- Song, X., & Bokkers, E. (2018). Automated body weight prediction of dairy cows using 3-dimensional vision. *Journal Dairy Science*, 4448-4459.
- Steiner, A. (Noviembre de 2014). El cambio climático amenaza la seguridad sanitaria, según la ONU. *Diario de Navarra*.
- Teymoori, H., & Amjady, N. (2017). A techno-economic assesment for replacement of convencional fossil fuel based technologies in animal farms fueled CHP units. *Renewable Energy*, 602-614.

- Torrellas, M., & Burgos, L. (2018). Different approaches to assess the environmental performance of a cow manure biogas plant. *Atmospheric Environment*, 203-213.
- Urra-Balcazar, R. (2009). *Evaluación técnico-económica para la implementación de un biodigestor anaeróbico en una lechería tipo de la Región de Los Lagos*. Chile: Universidad Austral de Chile.
- Varnero, M. (2004). Evaluación de lodo fresco y compostado como materia prima para la elaboración de sustrato. *Residuos Orgánicos y su Uso en Sistemas Agroforestales* (págs. 361-365). Chile: Actas del Simposio de las Ciencias del Suelo.
- Velasco, E. (2016). *Propuesta de un modelo de biodigestor para generar energía de los residuos sólidos orgánicos biodegradables municipales*. México: UNAM.
- Venegas-Venegas J. (2015). *Rentabilidad de biodigestores y motogeneradores para diferentes tamaños de granjas porcinas en Michoacán*. México: Universidad Autónoma de Chapingo.
- Vera-Romero, I. (2014). Potencial de generación de biogás y energía eléctrica parte I: excretas de ganado bovino y porcino. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 429-436.
- W. Ortiz, J. T.-P. (2017). Understanding the diffusion of domestic biogas technologies. Systematic conceptualisation of existing evidence from developing and emerging countries. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 1287-1299.
- Williams, C. (2018). *Gestión de residuos de aves de corral en los países en desarrollo*. Obtenido de FAO. Revisión del Desarrollo Avícola: <http://www.fao.org/3/al718s/al718s00.pdf>
- WWF, .. (Noviembre de 2018). *Cambio Climático y Energía*. Obtenido de http://www.wwf.org.mx/que_hacemos/cambio_climatico_y_energia/
- X. Flotats, A. B. (2003). El proceso de secado de purines en el marco de una gestión integral de residuos ganaderos. *Residuos*, 40-46.
- Zúñiga, I. (2007). *Biodigestores*. Hidalgo: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

ANEXOS

ANEXO 1. CLIMATOLOGÍA DE METEPEC, HIDALGO.

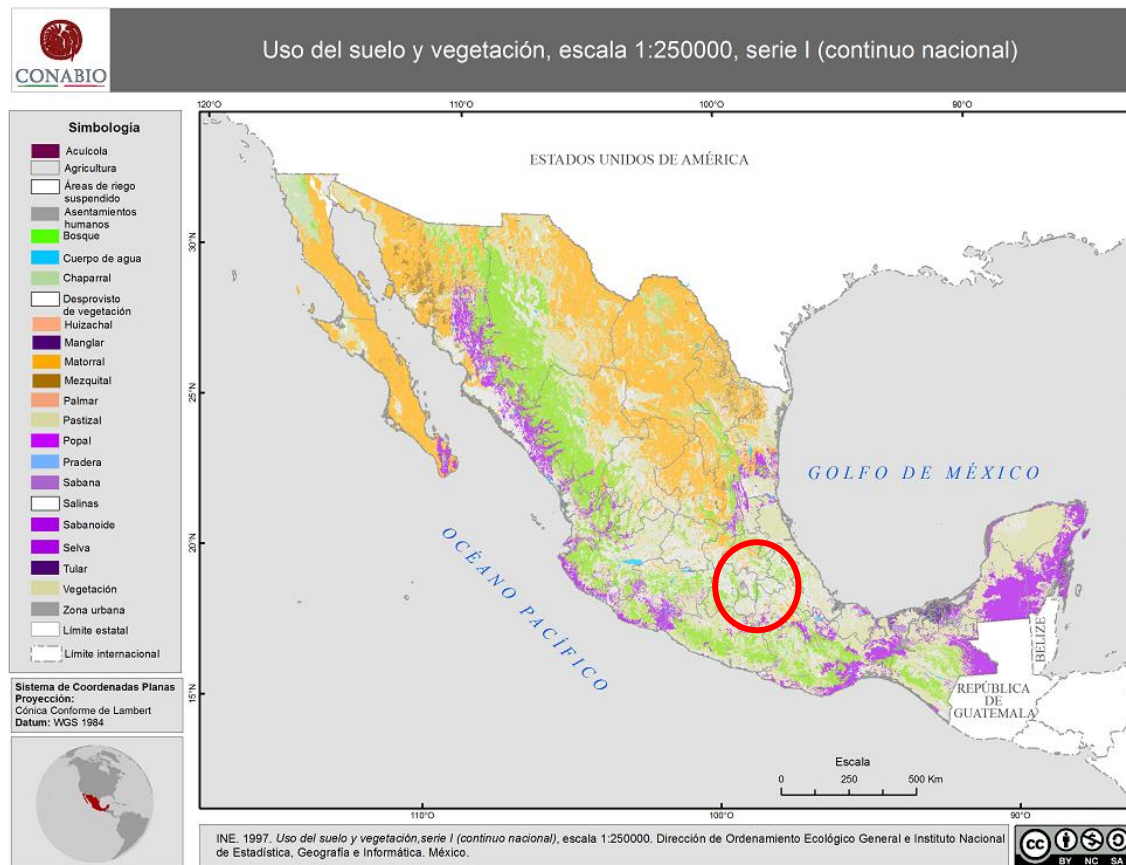


Figura A1.1 Uso de suelo, Metepec. Fuente: (CONABIO, Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Portal de geoinformación, 2018)

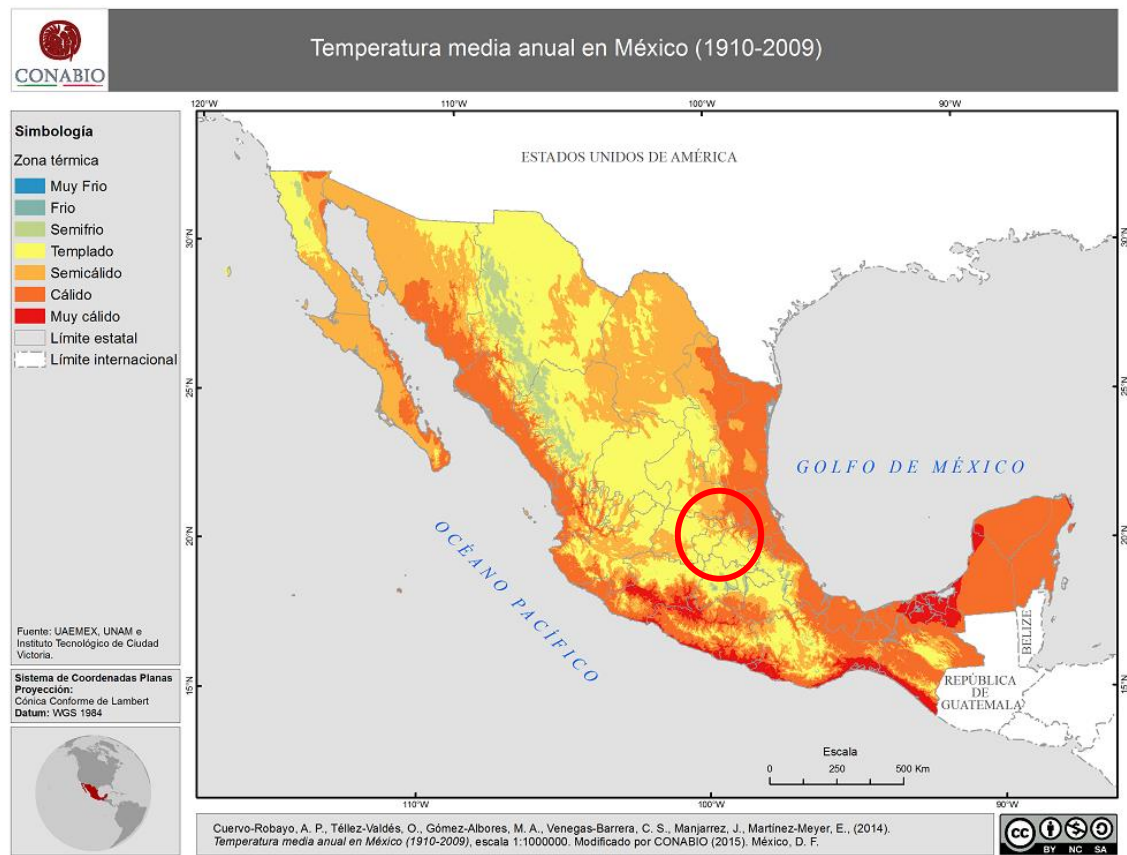


Figura A1.2 Temperatura media anual, Metepec. Fuente: (CONABIO, Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Portal de geoinformación, 2018)

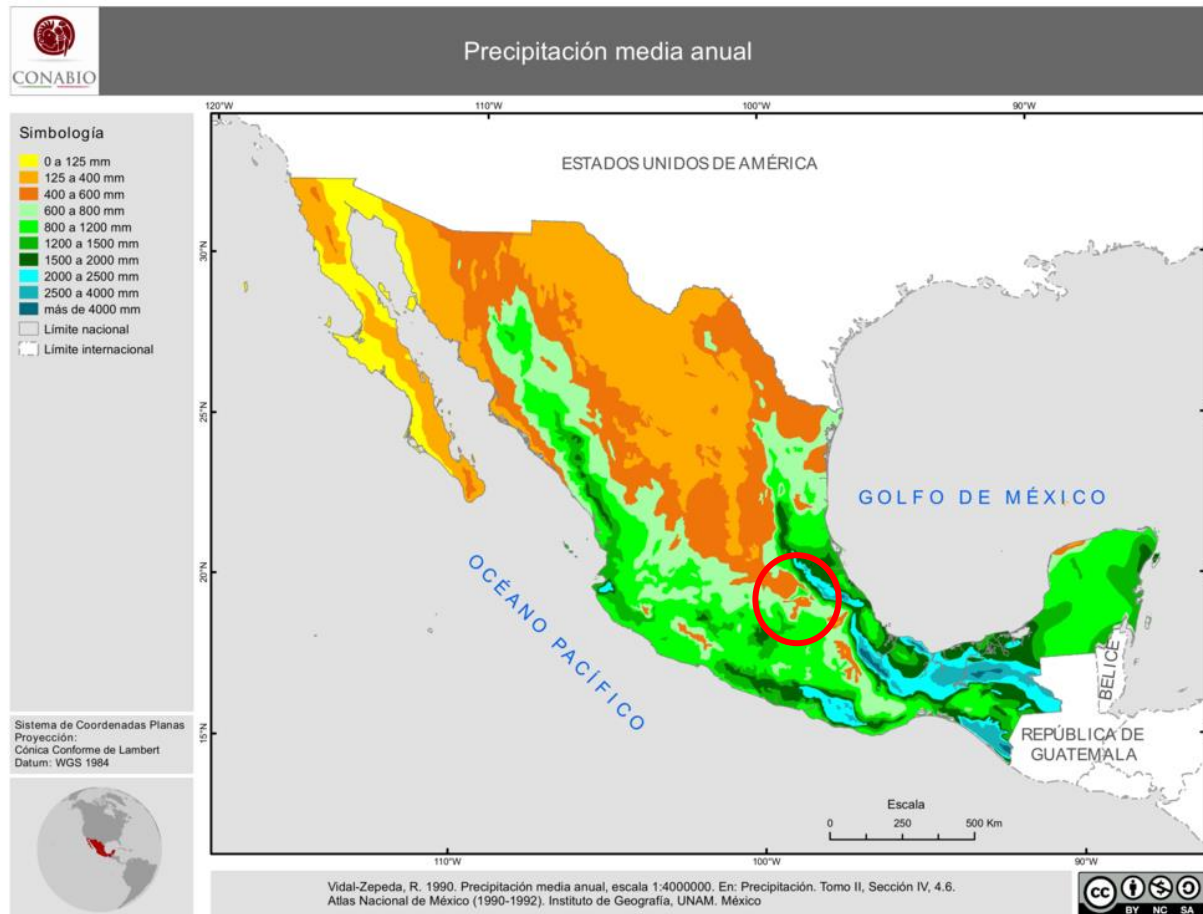


Figura A1.3 Precipitación media anual, Metepec. Fuente: (CONABIO, Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Portal de geoinformación, 2018)

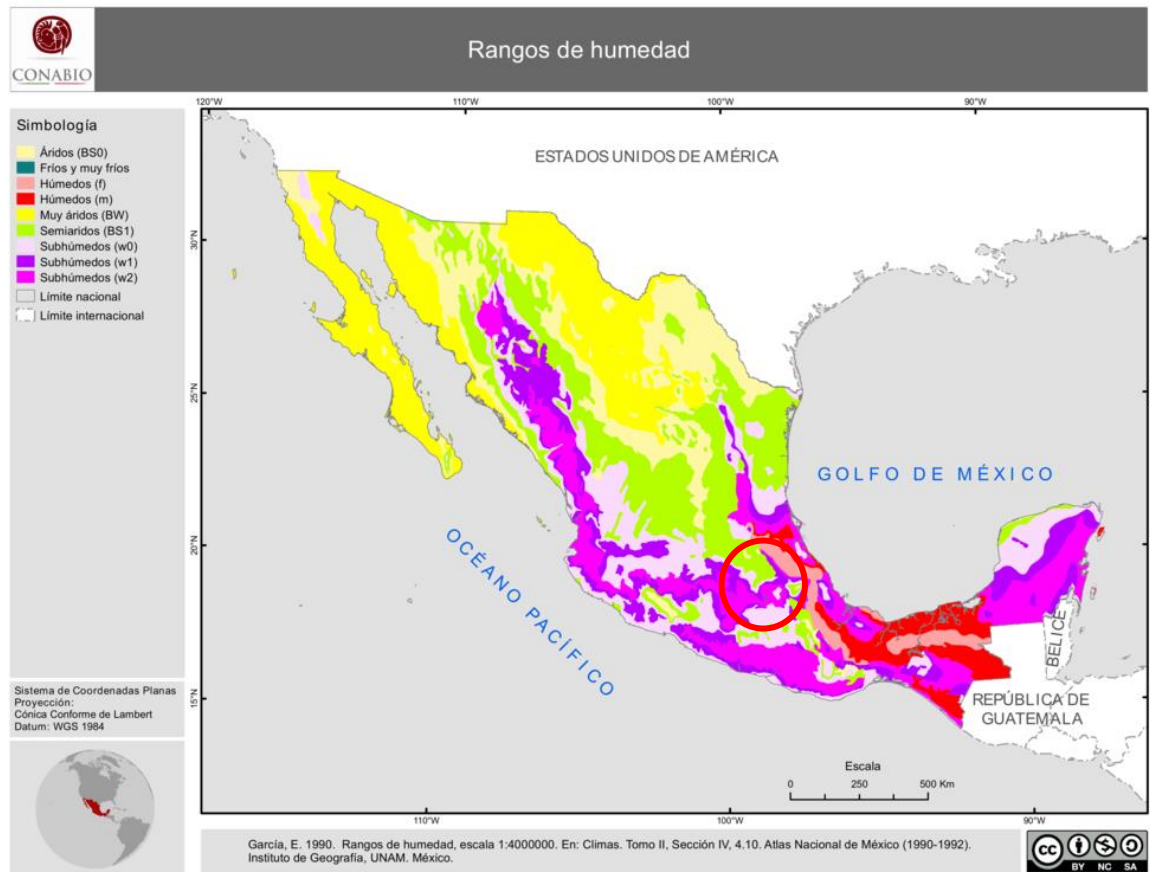


Figura A1.4 Rangos de humedad, Metepec. Fuente: (CONABIO, Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Portal de geoinformación, 2018)

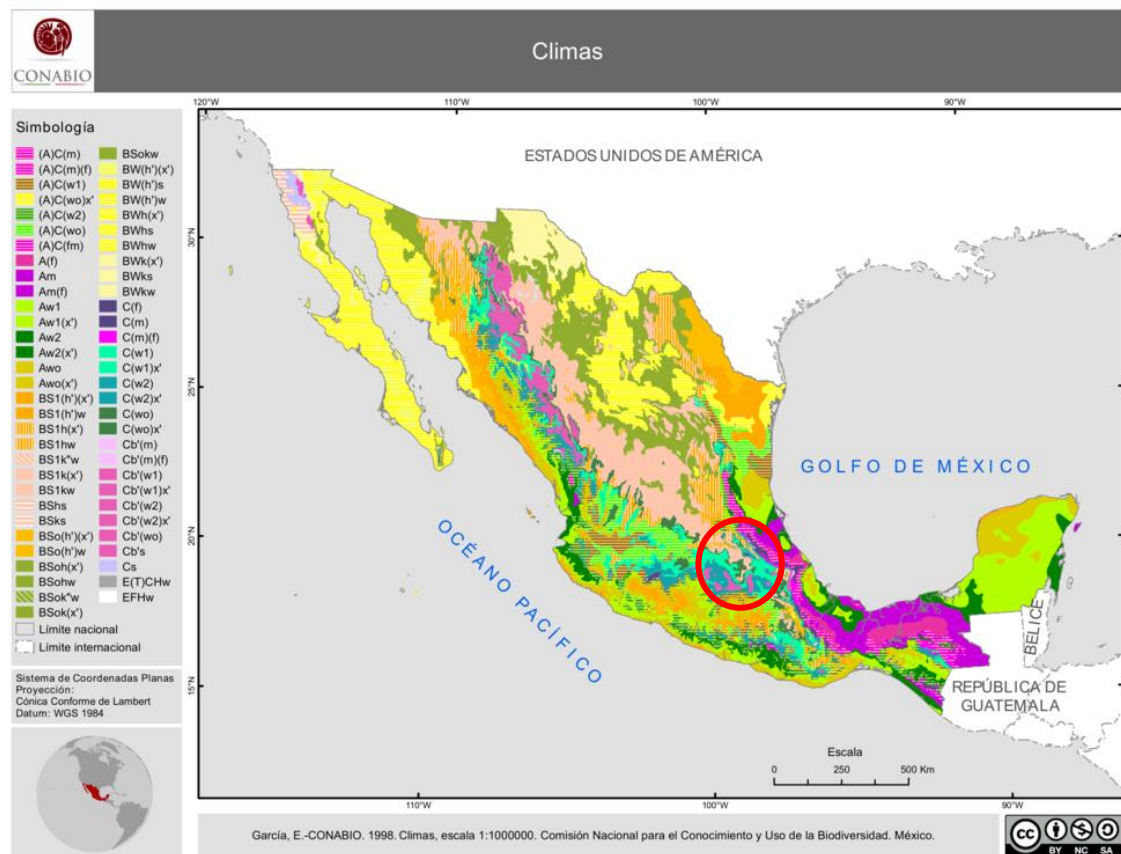


Figura A1.5 Clima, Metepec. Fuente: (CONABIO, Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Portal de geoinformación, 2018)

ANEXO 2. CLASIFICACIÓN DE ESPECIES ANALIZADAS.

Tabla A2.1 CLASIFICACIÓN DE GANADO BOVINO DE ACUERDO CON LA ETAPA DE CRECIMIENTO. Fuente: Elaboración propia*.

| Tabla A2.1 | | | | | | | | | | | |
|--|-----------|------|-----------|---|------|-----------|--|---------------------------|--|--------------------------------|----------------------------------|
| ESPECIE (BOVINOS/ VACUNOS) | Peso (kg) | | | Cantidad de estiércol generado (kg/día) | | | Cantidad de excretas por peso vivo (%) | Horas de estabulación (h) | Cantidad de excretas disponible (kg/día) | Producción de biogás (m3 x kg) | Producción de biogás diaria (m3) |
| | Valor min | Prom | Valor máx | Valor min | Prom | Valor máx | | | | | |
| <i>ETAPA DE CRECIMIENTO</i> | | | | | | | | | | | |
| Vacuno ternero (macho/hembra) 0-12 meses | 40 | 95 | 150 | 4 | 7.5 | 11 | 7.89 | 16 | 5.00 | 0.04 | 0.2 |
| Vacuno pequeño (macho/hembra) 12-24 meses | | 150 | 150 | 8 | 9.5 | 11 | 6.33 | 16 | 6.33 | 0.04 | 0.25 |
| Vacuno mediano (macho/hembra) 2-3 años | | 280 | 280 | 10 | 14.5 | 19 | 5.18 | 16 | 9.67 | 0.04 | 0.39 |
| Vacuno hembras no paridas para carne (2 años) | | 323 | 323 | 22 | 22 | | 6.81 | 16 | 14.67 | 0.04 | 0.59 |
| Vacuno macho-buey de engorde/ semental/aptitud carne | | 323 | 323 | 22 | 22 | | 6.81 | 16 | 14.67 | 0.04 | 0.59 |

* (Vera-Romero, 2014); (Martínez, 2007); (Blanco Ochoa, 2004); (Gipuzkoa, 2005); (Bavera & Peñafort, 2006); (Song & Bokkers, 2018); (Teymoori & Amjady, 2017); (Luna, Del Río Portilla, & R.Rendón, 2018); (Scarlat, 2018); (Casas P., 2009); (Li & Liu, 2018); (Figueroa V., 2009); (AquaLimpia Consultores, 2007); (Pizarro & W. Mulbry, 2006).

Tabla A2.2 CLASIFICACIÓN DE GANADO BOVINO DE ACUERDO CON LA RAZA. Fuente: Elaboración propia*

| Tabla A2.2 | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-----------|-----------|------|--|-----------|------|--|---------------------------|---|---|----------------------------------|
| ESPECIE (BOVINOS/ VACUNOS) | Peso (kg) | | | Cantidad de estiércol generado al día (kg/día) | | | Cantidad de excretas por peso vivo (%) | Horas de estabulación (h) | Cantidad diaria de excretas disponible (kg/día) | Producción de biogás (m3 x kg de excreta) | Producción de biogás diaria (m3) |
| | RAZA | Valor min | Prom | Valor máx | Valor min | Prom | | | | | |
| Jersey hembra | 300 | 350 | 400 | 23.80 | 23.80 | | 6.80 | 16 | 15.87 | 0.04 | <u>0.63</u> |
| Bueyes promedio | 400 | 400 | | 24.00 | 24.00 | | 6.00 | 16 | 16.00 | 0.04 | <u>0.64</u> |
| Jersey macho | 500 | 500 | | 34.00 | 34.00 | | 6.80 | 16 | 22.67 | 0.04 | <u>0.91</u> |
| Vaca lechera productiva | 500 | 568 | 635 | 25.00 | 39.00 | 53 | 6.87 | 16 | 26.00 | 0.04 | <u>1.04</u> |
| NRC lactante | 575 | 575 | | 39.10 | 39.10 | | 6.80 | 16 | 26.07 | 0.04 | <u>1.04</u> |
| Holstein hembra | 600 | 600 | | 40.80 | 40.80 | | 6.80 | 16 | 27.20 | 0.04 | <u>1.09</u> |
| Jersey lactante | 601 | 601 | | 40.87 | 40.87 | | 6.80 | 16 | 27.25 | 0.04 | <u>1.09</u> |
| Suiza vaca | 600 | 650 | 700 | 34.00 | 34.00 | | 5.23 | 16 | 22.67 | 0.04 | <u>0.91</u> |
| Vaca lechera no productiva | 755 | 755 | | 19.40 | 19.40 | | 2.57 | 16 | 12.93 | 0.04 | <u>0.52</u> |
| Holstein lactante | 869 | 869 | | 59.09 | 59.09 | | 6.80 | 16 | 39.39 | 0.04 | <u>1.58</u> |
| Suiza toro | 1000 | 1000 | | 68.00 | 68.00 | | 6.80 | 16 | 45.33 | 0.04 | <u>1.81</u> |
| Holstein macho | 1200 | 1200 | | 81.60 | 81.60 | | 6.80 | 16 | 54.40 | 0.04 | <u>2.18</u> |

* (Vera-Romero, 2014); (Martínez, 2007); (Blanco Ochoa, 2004); (Gipuzkoa, 2005); (Bavera & Peñafort, 2006); (Song & Bokkers, 2018); (Teymoori & Amjady, 2017); (Luna, Del Río Portilla, & R.Rendón, 2018); (Scarlat, 2018); (Casas P., 2009); (Li & Liu, 2018); (Figueroa V., 2009); (AquaLimpia Consultores, 2007); (Pizarro & W. Mulbry, 2006).

Tabla A2.3 CLASIFICACIÓN DE GANADO BOVINO DE ACUERDO CON LA RAZA. Fuente: Elaboración propia*.

| Tabla A2.3 | | | | | | | | | | | |
|--|-----------|------|-----------|--|-------|-----------|---|---------------------------|---|---|----------------------------------|
| ESPECIE (PORCINOS) | Peso (kg) | | | Cantidad de estiércol generado al día (kg/día) | | | Cantidad de excretas por peso vivo (%) peso vivo | Horas de estabulación (h) | Cantidad diaria de excretas disponible (kg/día) | Producción de biogás (m3 x kg de excreta) | Producción de biogás diaria (m3) |
| | Valor min | Prom | Valor máx | Valor min | Prom | Valor máx | | | | | |
| ETAPA DE CRECIMIENTO | | | | | | | | | | | |
| Piglets/Preinicio cuna | 9 | 9 | | 0.13 | 0.13 | | 6.3 | 24 | 0.13 | 0.07 | 0.01 |
| Porcino pequeño, destete (7-9 semanas) | 9 | 12 | 15 | 0.77 | 1.03 | 1.29 | 8.6 | 24 | 1.03 | 0.07 | 0.07 |
| Porcino en crecimiento | 22 | 31 | 40 | 1.56 | 2.20 | 2.84 | 7.11 | 24 | 2.20 | 0.07 | 0.15 |
| Porcino en finalización | 77.5 | 77.5 | | 5.39 | 5.39 | | 6.95 | 24 | 5.39 | 0.07 | 0.38 |
| Hembra al empadre | 90 | 100 | 110 | 5.63 | 6.26 | 6.89 | 6.26 | 24 | 6.26 | 0.07 | 0.44 |
| Porcino grande (secas, mayor de 6 meses) | 120 | 135 | 150 | 6.05 | 6.80 | 7.56 | 5.04 | 24 | 6.80 | 0.07 | 0.48 |
| Semental | 162 | 162 | | 4.75 | 4.75 | | 2.93 | 24 | 4.75 | 0.07 | 0.33 |
| Hembras gestantes | 182 | 182 | | 6.10 | 6.10 | | 3.35 | 24 | 6.10 | 0.07 | 0.43 |
| Hembras lactantes | 191 | 191 | | 15.43 | 15.43 | | 8.08 | 24 | 15.43 | 0.07 | 1.08 |

* (Vera-Romero, 2014); (Martínez, 2007); (SEMARNAT, 2010); (FAO, HOJAS DE INFORMACIÓN BÁSICA, CRÍA DE CERDOS, 2012); (Scarlat, 2018); (ICE, 2011).

Tabla A2.4 CLASIFICACIÓN DE OTRAS ESPECIES. Fuente: Elaboración propia*.

| Tabla A2.4 | | | | | |
|----------------------------|-----------|--|-----------------------|---|---|
| ESPECIE (OTRAS) | Peso (kg) | Cantidad de estiércol generado al día (kg/día) | Horas de estabulación | Cantidad diaria de excretas disponible (kg/día) | Producción de biogás (m3) x kg de excreta |
| <i>ESPECIE</i> | | | | | |
| Elefante | * | 40 | 24 | 40 | 0.02 |
| Búfalo Grande | * | 20 | 24 | 20 | * |
| Camello | * | 20 | 24 | 20 | 0.03 |
| Caballos | 300 | 15 | 24 | 15 | 0.04 |
| Búfalo Mediano | * | 15 | 24 | 15 | * |
| Búfalo Pequeño | * | 10 | 24 | 10 | * |
| Búfalo Ternero | * | 5 | 24 | 5 | * |
| Ovino Grande | * | 5 | 24 | 5 | 0.06 |
| Ovino Mediano | * | 2 | 24 | 2 | 0.06 |
| Ovino Pequeño | * | 1 | 24 | 1 | 0.06 |
| Caprino (Cabras madres) | * | 1.1 | 24 | 1.1 | 0.07 |
| Caprino (Cabritos, chivos) | * | 0.55 | 24 | 0.55 | 0.07 |
| Humano Adulto | 70 | 0.4 | 24 | 0.4 | 0.07 |
| Humano Niño | 41 | 0.2 | 24 | 0.2 | 0.07 |
| Pavo/Guajolote Macho | 10 | 0.35 | 24 | 0.35 | * |
| Pavo/Guajolote Hembra | 5 | 0.2 | 24 | 0.2 | * |
| Otras aves de corral | * | 0.3 | 24 | 0.3 | 0.015 |
| Gallinas ponedoras | * | 0.2 | 24 | 0.2 | 0.01 |
| Pato | * | 0.15 | 24 | 0.15 | 0.05 |
| Paloma | * | 0.05 | 24 | 0.05 | 0.05 |
| Avícola Grande | * | 0.15 | 24 | 0.15 | 0.06 |
| Avícola Mediano | * | 0.1 | 24 | 0.1 | 0.06 |

* (Martínez, 2007); (Gipuzkoa, 2005); (Ashraf, 2016); (Scarlat, 2018); (Williams, 2018).

Tabla A2.5 Contenido de sólidos, bovinos por etapa de crecimiento, elaboración propia con datos de (FAO, 2011).

| Tabla A2.5 | | | | |
|--|------------------------------|------|--|-----------------------------------|
| ESPECIE (BOVINOS/ VACUNOS) | Rango de sólidos totales (%) | | Valor de sólidos totales reportado (%) | Contenido de sólidos totales (kg) |
| <i>ETAPA DE CRECIMIENTO</i> | | | | |
| Vacuno ternero (macho/hembra) 0-12 meses | 13.4 | 66.2 | 20 | 1.00 |
| Vacuno pequeño (macho/hembra) 12-24 meses | 13.4 | 66.2 | 20 | 1.27 |
| Vacuno mediano (macho/hembra) 2-3 años | 13.4 | 66.2 | 20 | 1.93 |
| Vacuno hembras no paridas para carne (2 años) | 13.4 | 66.2 | 20 | 2.93 |
| Vacuno macho-buey de engorde/ semental/aptitud carne | 13.4 | 66.2 | 20 | 2.93 |

Tabla A2.6 Contenido de sólidos, bovinos por raza, elaboración propia con datos de (FAO, 2011); (Urrea-Balcazar, 2009).

| Tabla A2.6 | | | | |
|----------------------------|------------------------------|------|--|-----------------------------------|
| ESPECIE (BOVINOS/ VACUNOS) | Rango de sólidos totales (%) | | Valor de sólidos totales reportado (%) | Contenido de sólidos totales (kg) |
| <i>RAZA</i> | | | | |
| Holstein hembra | 13.4 | 66.2 | 20 | 5.44 |
| Holstein lactante | 13.4 | 66.2 | 20 | 7.88 |
| Holstein macho | 13.4 | 66.2 | 20 | 10.88 |
| Suiza vaca | 13.4 | 66.2 | 20 | 4.53 |
| Suiza toro | 13.4 | 66.2 | 20 | 9.07 |
| Jersey hembra | 13.4 | 66.2 | 20 | 3.17 |
| Jersey lactante | 13.4 | 66.2 | 20 | 5.45 |
| Jersey macho | 13.4 | 66.2 | 20 | 4.53 |
| Vaca lechera productiva | 13.4 | 66.2 | 20 | 5.20 |
| Vaca lechera no productiva | 13.4 | 66.2 | 20 | 2.59 |
| NRC lactante | 13.4 | 66.2 | 20 | 5.21 |
| Bueyes promedio | 13.4 | 66.2 | 20 | 3.20 |

Tabla A2.7 Contenido de sólidos, porcinos por etapa de crecimiento, elaboración propia con datos de (FAO, 2011), (Mojica, 2016) .

| Tabla A2.7 | | | | |
|--|------------------------------|----|--|-----------------------------------|
| ESPECIE (PORCINOS) | Rango de sólidos totales (%) | | Valor de sólidos totales reportado (%) | Contenido de sólidos totales (kg) |
| <i>ETAPA</i> | | | | |
| Piglets/Preinicio cuna | 15 | 49 | 35 | 0.04 |
| Porcino pequeño, destete (7-9 semanas) | 15 | 49 | 35 | 0.36 |
| Porcino en crecimiento | 15 | 49 | 35 | 0.77 |
| Porcino en finalización | 15 | 49 | 35 | 1.89 |
| Hembra al empadre | 15 | 49 | 35 | 2.19 |
| Porcino grande (secas, mayor de 6 meses) | 15 | 49 | 35 | 2.38 |
| Semental | 15 | 49 | 35 | 1.66 |
| Hembras gestantes | 15 | 49 | 35 | 2.13 |
| Hembras lactantes | 15 | 49 | 35 | 5.40 |

ANEXO 3. RESULTADOS

| Tabla A3.1 Parámetros de dimensionamiento en biomasa de especies animales. Fuente: Elaboración propia. | | | | | | |
|--|--------------------|----------------------|-----------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| ESPECIE EQUIVALENTE EN TABLAS | Número de animales | Eg (kg/día x animal) | Eg (kg/día) | Test (h) ya considerado | Ed (kg/día) | Cd (kg) |
| BOVINOS | | | | | | |
| Vaca lechera productiva | 500 | 26 | 13000 | 16 | 13000.00 | 9750.00 |
| Suiza toro | 5 | 45.33 | 226.65 | 16 | 226.65 | 169.99 |
| Vacuno ternero | 300 | 5.00 | 1500 | 16 | 1500.00 | 1125.00 |
| TOTAL | 805 | | 14726.65 | | <u>14726.65</u> | <u>11044.99</u> |
| PORCINOS | | | | | | |
| Hembra al empadre | 60 | 6.26 | 375.60 | 24 | 375.60 | 93.90 |
| Porcino en crecimiento | 300 | 2.20 | 661.23 | 24 | 661.23 | 165.31 |
| Semental | 1 | 4.75 | 4.75 | 24 | 4.75 | 1.19 |
| TOTAL | <u>361</u> | | 1041.58 | | <u>1041.58</u> | <u>260.39</u> |

| Tabla A3.2 Parámetros de dimensionamiento en biomasa de especies vegetales. Fuente elaboración propia. | | | | |
|--|-------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| | Biomasa disponible (kg) | Cantidad de sustrato a utilizar (kg) | Densidad/Peso específico (kg/m3) | Volumen de sustrato (m3) |
| Suero de leche | 43008 | 860.16 | 1024 | 0.84 |
| Rastrojo de maíz | 1000 | 500 | 750 | 0.67 |

Tabla A3.3 Parámetros de dimensionamiento para cada insumo. Fuente: Elaboración propia.

| | C_d (kg/día) | $C_{d\text{agua}}$ (kg/día) | $C_{d\text{total}}$ (kg/día) | Vol_d (m ³ /día) | Vol_{agua} (m ³ /día) | V_{tmasa} (m ³) | $V_{\text{bteórico}}$ (m ³) | $V_{\text{badicional}}$ | TRH (días) | V_{TOTAL} |
|-------------------|----------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|---|--------------------------------------|---|-------------------------|------------|--------------------|
| Estiércol vaca | 11044.99 | 16567.48125 | 27612.47 | 11.12 | <u>16.57</u> | 27.69 | <u>441.80</u> | 231.00 | 20 | 693.01 |
| Estiércol porcino | <u>260.39</u> | 878.8302563 | 1139.22 | 0.26 | <u>0.88</u> | 1.14 | <u>18.23</u> | | | |
| Suero de leche | 860.16 | 0 | 860.16 | 0.84 | <u>0</u> | 0.84 | <u>12.90</u> | | | |
| Rastrojo de maíz | 500 | 4312.5 | 4812.50 | 0.67 | <u>4.31</u> | 4.98 | <u>257</u> | | | |
| TOTAL | 12665.54 | 21758.81 | 34424.35 | 12.89 | 21.76 | 34.65 | 729.93 | | | <u>924.01</u> |

| Tabla A3.4 Cálculo de electricidad generada. Fuente: Elaboración propia. | | | | | | |
|--|---------------------------|--------------------------|--------------------|-----------------|---|---------------|
| ESCENARIO 1 (debajo de 100 kW) | | | | | | |
| TARIFA GDMTO | Cargo fijo | Energía variable \$/kWh | Distribución \$/kW | Capacidad \$/kW | | |
| Gran Demanda en Media Tensión Ordinaria | 463.05 | 1.20 | | | | |
| Caso crítico | | | | | | |
| m3 de biogás diario | Poder calorífico (kWh/m3) | Energía disponible (kWh) | Potencia (kW) | \$ x kWh | Precio de la electricidad generada (diario) | Costo por año |
| 310.2 | 7 | 671.4 | 6.99 | 1.20 | 201.25 | 66111.33 |
| ESCENARIO 2 (debajo de 100 kW) | | | | | | |
| TARIFA GDMTH | Cargo fijo | Energía variable \$/kWh | \$/kW | | | |
| Gran Demanda en Media Tensión Horaria | 463.05 | 1.20 | | | | |
| Con calentamiento | | | | | | |
| m3 de biogás diario | Poder calorífico (kWh/m3) | Energía disponible (kWh) | Potencia (kW) | \$ x kWh | Precio de la electricidad generada (diario) | Costo por año |
| 729.93 | 7 | 3609.51 | 37.60 | 1.20 | 1081.95 | 355420.78 |

Tabla A3.5 Cálculo del costo del biogás en su equivalente a gas LP. Fuente: Elaboración propia

| Escenario 1 | | | | | | | | | |
|------------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------|------------------|
| m3 de biogás diario | Poder calorífico (kWh/m3) | Energía disponible (kWh) | Equivalente en gas natural | m3 de gas natural diario | Poder calorífico (kWh/m3) | Energía disponible (kWh) | kg de gas lp diario | Costo diario (\$) | Costo Anual (\$) |
| 310.2 | 7 | 671.4 | | | 217.14 | 10 | 2171.4 | 271.43 | 5227.65 |
| Perdida en electricidad (\$) | | 590807.25 | | | | | | | |
| Escenario 2 | | | | | | | | | |
| m3 de biogás diario | Poder calorífico (kWh/m3) | Energía disponible (kWh) | Equivalente en gas natural | m3 de gas natural diario | Poder calorífico (kWh/m3) | Energía disponible (kWh) | l de gas lp diario | Costo diario (\$) | Costo Anual (\$) |
| 729.93 | 7 | 3609.51 | | | 510.951 | 10 | 5109.51 | 638.69 | 12301.15 |
| Perdida en electricidad (\$) | | 736464.15 | | | | | | | |

ANEXO 4. CORRIDA FINANCIERA

Tabla A4.1 Flujo de caja. Escenario 1. Caso 1. Producción de gas sin calentamiento. Fuente: Elaboración propia.

| CONCEPTO | Año 0 | Año 1 | Año 2 | Año 3 | Año 4 | Año 5 | Año 6 | Año 7 | Año 8 | Año 9 | Año 10 |
|---|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Costo total de inversión (PESOS) | \$4,336,000 | | | | | | | | | | |
| --Costo de instalación del digestor | 2488000 | | | | | | | | | | |
| --Costo del compresor | 1848000 | | | | | | | | | | |
| Total anual Costos de electricidad (PESOS) | | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 |
| --Costo de operación de las bombas | | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 |
| Total anual Costos O&M (PESOS) | | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 |
| Total costos (PESOS) | \$4,336,000 | \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 |
| Ingresos (PESOS) | | \$2,591,574 | \$2,591,574 | \$2,591,574 | \$2,591,574 | \$2,591,574 | \$2,591,574 | \$2,591,574 | \$2,591,574 | \$2,591,574 | \$2,591,574 |
| --Ingreso anual por tratamiento de agua | | \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 |
| --Ingreso anual por venta de fertilizantes | | \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 |
| --Ingreso anual por venta de gas | | \$1,717,282 | \$1,717,282 | \$1,717,282 | \$1,717,282 | \$1,717,282 | \$1,717,282 | \$1,717,282 | \$1,717,282 | \$1,717,282 | \$1,717,282 |
| FLUJO NETO | -\$4,336,000 | \$1,784,790 | \$1,784,790 | \$1,784,790 | \$1,784,790 | \$1,784,790 | \$1,784,790 | \$1,784,790 | \$1,784,790 | \$1,784,790 | \$1,784,790 |

TABLA A4.1 Continuación

| Año 11 | Año 12 | Año 13 | Año 14 | Año 15 | Año 16 | Año 17 | Año 18 | Año 19 | Año 20 | VNA | VAE |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|----------------|
| | | | | | | | | | | \$4,336,000 | \$509,305 |
| | | | | | | | | | | | |
| \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$4,750,432 | \$557,984 |
| \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | | |
| \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$2,118,175 | \$248,800 |
| \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 | \$11,204,607 | \$1,316,089 |
| \$2,591,574 | \$2,591,574 | \$2,591,574 | \$2,591,574 | \$2,591,574 | \$2,591,574 | \$2,591,574 | \$2,591,574 | \$2,591,574 | \$2,591,574 | \$22,063,532 | \$2,591,574 |
| \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 | | |
| \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 | | |
| \$1,717,282 | \$1,717,282 | \$1,717,282 | \$1,717,282 | \$1,717,282 | \$1,717,282 | \$1,717,282 | \$1,717,282 | \$1,717,282 | \$1,717,282 | | |
| \$1,784,790 | \$1,784,790 | \$1,784,790 | \$1,784,790 | \$1,784,790 | \$1,784,790 | \$1,784,790 | \$1,784,790 | \$1,784,790 | \$1,784,790 | \$10,858,925.09 | \$1,275,485.27 |

| CONCEPTO | Año 0 | Año 1 | Año 2 | Año 3 | Año 4 | Año 5 | Año 6 | Año 7 | Año 8 | Año 9 | Año 10 |
|---|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Costo total de inversión (PESOS) | \$2,950,000 | | | | | | | | | | |
| --Costo de instalación del digestor | 2488000 | | | | | | | | | | |
| --Costo del generador | 420000 | | | | | | | | | | |
| --Costo de instalación eléctrica | 42000 | | | | | | | | | | |
| Total anual Costos de electricidad (PESOS) | | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 |
| --Costo de operación de las bombas | | | | | | | | | | | |
| Total anual Costos O&M (PESOS) | | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 |
| Total costos (PESOS) | \$2,950,000 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 |
| Ingresos (PESOS) | | \$940,404 | \$940,404 | \$940,404 | \$940,404 | \$940,404 | \$940,404 | \$940,404 | \$940,404 | \$940,404 | \$940,404 |
| --Ingreso anual por tratamiento de agua | | \$227,048 | | | | | | | | | |
| --Ingreso anual por venta de fertilizantes | | \$647,244 | | | | | | | | | |
| --Ingreso anual por venta de electricidad | | \$66,111 | | | | | | | | | |
| FLUJO NETO | -\$2,950,000 | \$691,604 | \$691,604 | \$691,604 | \$691,604 | \$691,604 | \$691,604 | \$691,604 | \$691,604 | \$691,604 | \$691,604 |

| Año 11 | Año 12 | Año 13 | Año 14 | Año 15 | Año 16 | Año 17 | Año 18 | Año 19 | Año 20 | VNA | VAE |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------|--------------|
| | | | | | | | | | | \$2,950,000 | \$346,506 |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 |
| | | | | | | | | | | | |
| \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$2,118,175 | \$248,800 |
| \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$5,068,175 | \$595,306 |
| \$940,404 | \$940,404 | \$940,404 | \$940,404 | \$940,404 | \$940,404 | \$940,404 | \$940,404 | \$940,404 | \$940,404 | \$8,006,189 | \$940,404 |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| \$691,604 | \$691,604 | \$691,604 | \$691,604 | \$691,604 | \$691,604 | \$691,604 | \$691,604 | \$691,604 | \$691,604 | \$2,938,014.55 | \$345,098.09 |

Tabla A4.3 Escenario 2. Caso 3. Producción de gas con calentamiento. Fuente: Elaboración propia.

| CONCEPTO | Año 0 | Año 1 | Año 2 | Año 3 | Año 4 | Año 5 | Año 6 | Año 7 | Año 8 | Año 9 | Año 10 |
|---|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Costo total de inversión (PESOS) | \$10,001,700 | | | | | | | | | | |
| --Costo de instalación del digestor | 2488000 | | | | | | | | | | |
| --Costo del compresor | 1848000 | | | | | | | | | | |
| --Costo del sistema de calentamiento | 5665700 | | | | | | | | | | |
| Total anual Costos de electricidad (PESOS) | | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 |
| --Costo de operación de las bombas | | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 |
| Total anual Costos O&M (PESOS) | | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 |
| Total costos (PESOS) | \$10,001,700 | \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 |
| Ingresos (PESOS) | | \$4,915,219 | \$4,915,219 | \$4,915,219 | \$4,915,219 | \$4,915,219 | \$4,915,219 | \$4,915,219 | \$4,915,219 | \$4,915,219 | \$4,915,219 |
| --Ingreso anual por tratamiento de agua | | \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 |
| --Ingreso anual por venta de fertilizantes | | \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 |
| --Ingreso anual por venta de gas | | \$4,040,926 | \$1,717,282 | \$1,717,282 | \$1,717,282 | \$1,717,282 | \$1,717,282 | \$1,717,282 | \$1,717,282 | \$1,717,282 | \$1,717,282 |
| FLUJO NETO | -\$10,001,700 | \$4,108,435 | \$4,108,435 | \$4,108,435 | \$4,108,435 | \$4,108,435 | \$4,108,435 | \$4,108,435 | \$4,108,435 | \$4,108,435 | \$4,108,435 |

Tabla A4.3 Continuación

| Año 11 | Año 12 | Año 13 | Año 14 | Año 15 | Año 16 | Año 17 | Año 18 | Año 19 | Año 20 | VNA | VAE |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|----------------|
| | | | | | | | | | | \$10,001,700 | \$1,174,796 |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$4,750,432 | \$557,984 |
| \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | \$557,984 | | |
| \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$2,118,175 | \$248,800 |
| \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 | \$806,784 | \$16,870,307 | \$1,981,580 |
| \$4,915,219 | \$4,915,219 | \$4,915,219 | \$4,915,219 | \$4,915,219 | \$4,915,219 | \$4,915,219 | \$4,915,219 | \$4,915,219 | \$4,915,219 | \$41,846,027 | \$4,915,219 |
| \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 | \$227,048 | | |
| \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 | \$647,244 | | |
| \$1,717,282 | \$1,717,282 | \$1,717,282 | \$1,717,282 | \$1,717,282 | \$1,717,282 | \$1,717,282 | \$1,717,282 | \$1,717,282 | \$1,717,282 | | |
| \$4,108,435 | \$4,108,435 | \$4,108,435 | \$4,108,435 | \$4,108,435 | \$4,108,435 | \$4,108,435 | \$4,108,435 | \$4,108,435 | \$4,108,435 | \$24,975,720.18 | \$2,933,638.72 |

| CONCEPTO | Año 0 | Año 1 | Año 2 | Año 3 | Año 4 | Año 5 | Año 6 | Año 7 | Año 8 | Año 9 | Año 10 |
|---|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Costo total de inversión (PESOS) | \$10,463,700 | | | | | | | | | | |
| --Costo de instalación del digestor | 2488000 | | | | | | | | | | |
| --Costo del generador | 2100000 | | | | | | | | | | |
| --Costo de instalación eléctrica | 210000 | | | | | | | | | | |
| --Costo del sistema de calentamiento | 5665700 | | | | | | | | | | |
| Total anual Costos de electricidad (PESOS) | | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 |
| --Costo de operación de las bombas | | | | | | | | | | | |
| Total anual Costos O&M (PESOS) | | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 |
| Total costos (PESOS) | \$10,463,700 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 |
| Ingresos (PESOS) | | \$1,229,713 | \$1,229,713 | \$1,229,713 | \$1,229,713 | \$1,229,713 | \$1,229,713 | \$1,229,713 | \$1,229,713 | \$1,229,713 | \$1,229,713 |
| --Ingreso anual por tratamiento de agua | | \$227,048 | | | | | | | | | |
| --Ingreso anual por venta de fertilizantes | | \$647,244 | | | | | | | | | |
| --Ingreso anual por venta de electricidad | | \$355,420 | | | | | | | | | |
| FLUJO NETO | -\$10,463,700 | \$980,913 | \$980,913 | \$980,913 | \$980,913 | \$980,913 | \$980,913 | \$980,913 | \$980,913 | \$980,913 | \$980,913 |

| Año 11 | Año 12 | Año 13 | Año 14 | Año 15 | Año 16 | Año 17 | Año 18 | Año 19 | Año 20 | VNA | VAE |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|---------------|
| | | | | | | | | | | \$10,463,700 | \$1,229,062 |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 |
| \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$2,118,175 | \$248,800 |
| \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$248,800 | \$12,581,875 | \$1,477,862 |
| \$1,229,713 | \$1,229,713 | \$1,229,713 | \$1,229,713 | \$1,229,713 | \$1,229,713 | \$1,229,713 | \$1,229,713 | \$1,229,713 | \$1,229,713 | \$10,469,237 | \$1,229,713 |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| \$980,913 | \$980,913 | \$980,913 | \$980,913 | \$980,913 | \$980,913 | \$980,913 | \$980,913 | \$980,913 | \$980,913 | -\$2,112,637.65 | -\$248,149.63 |

ANEXO 5. LAYOUT DEL SISTEMA

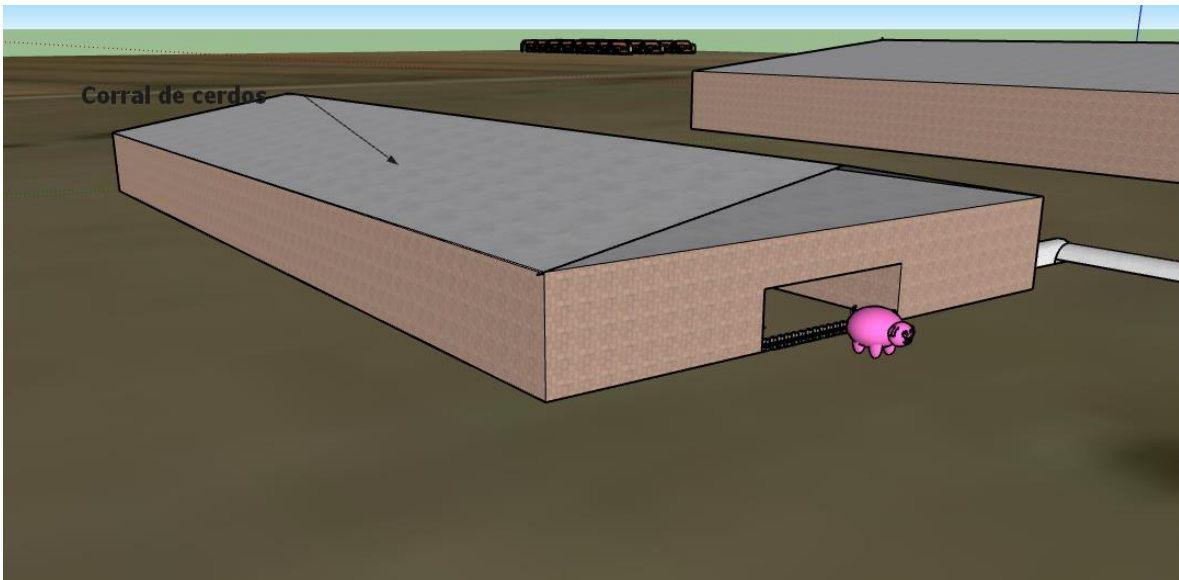


Figura A5.1 Corral de cerdos.

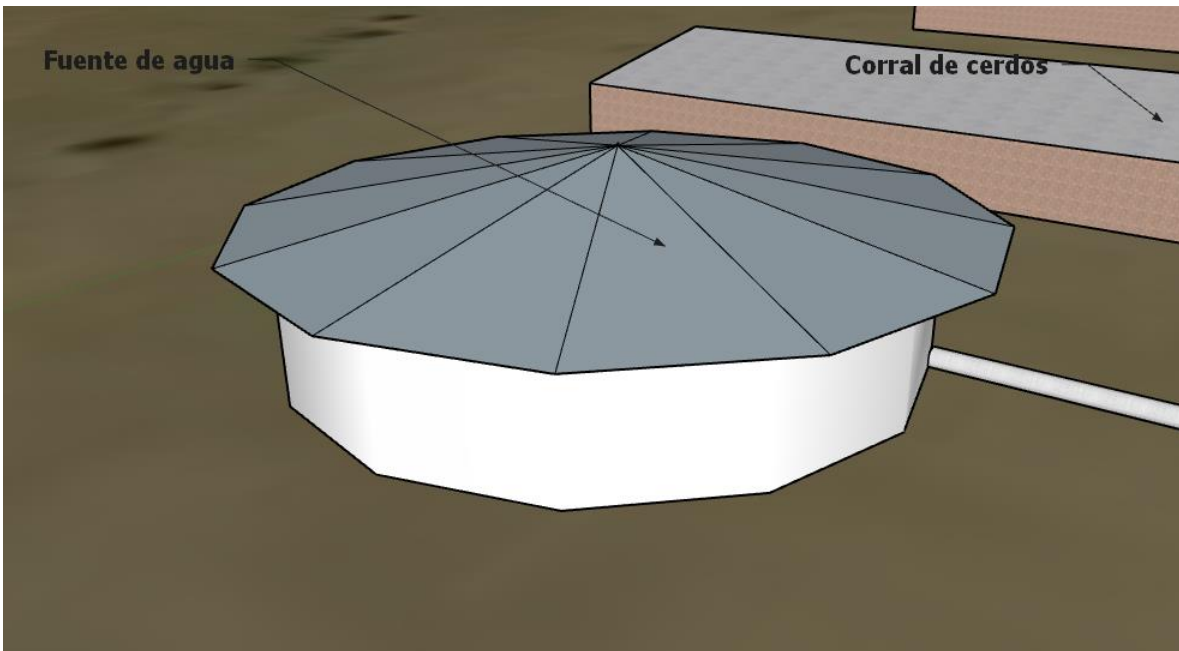


Figura A5.2 Fuente de agua (pozo de agua residual).

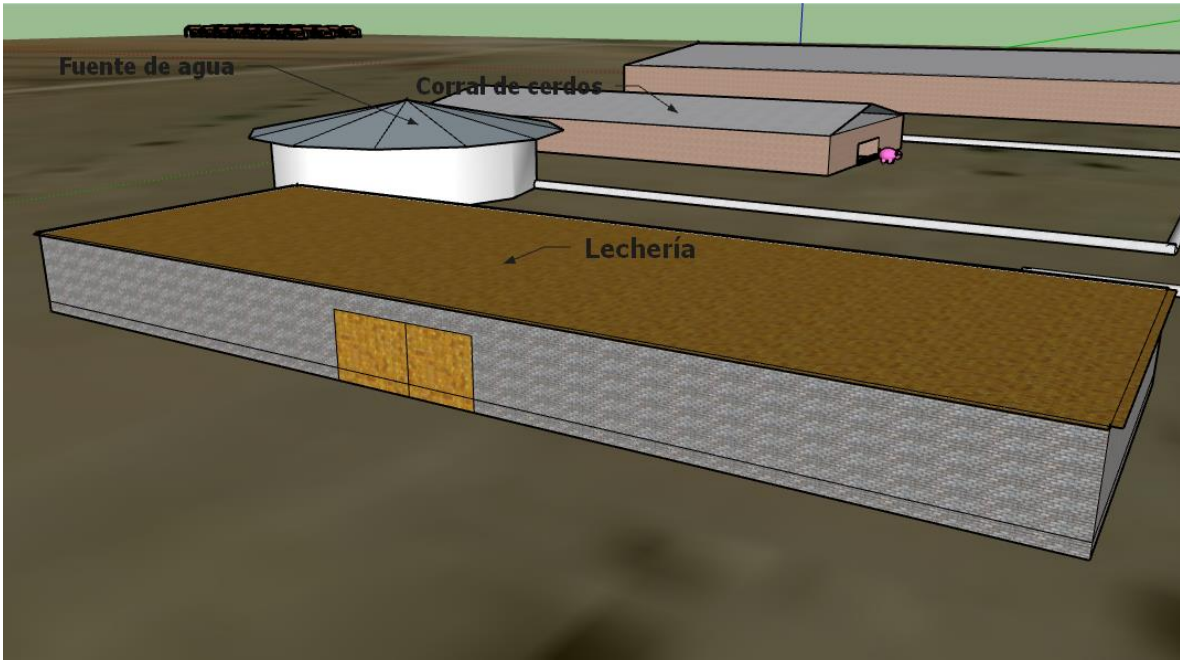


Figura A5.3 Lechería.

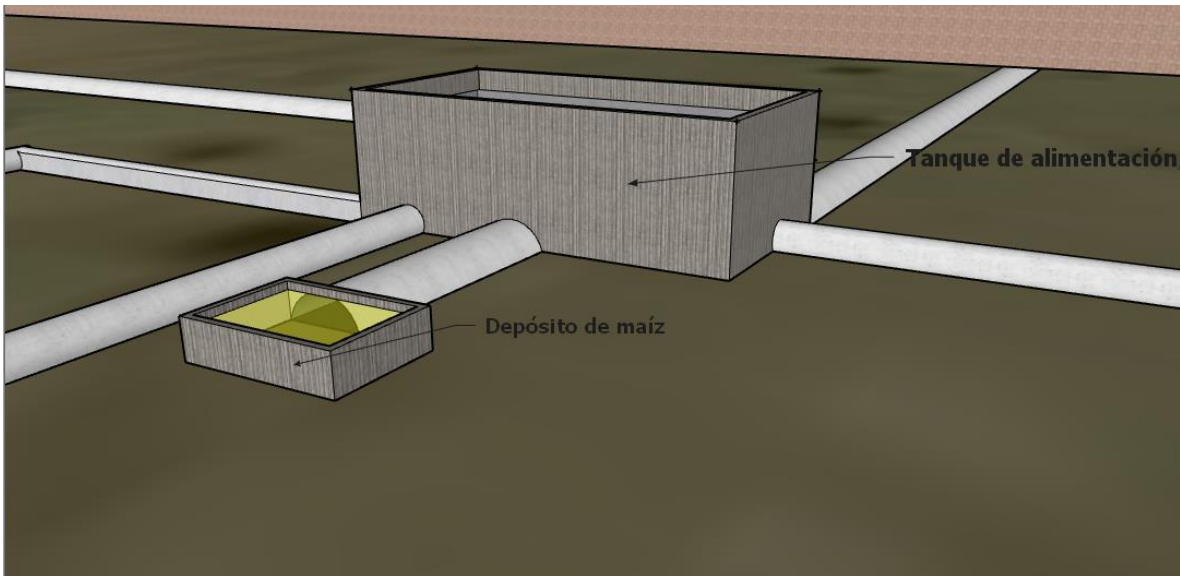


Figura A5.4 Depósito de maíz y tanque de alimentación.

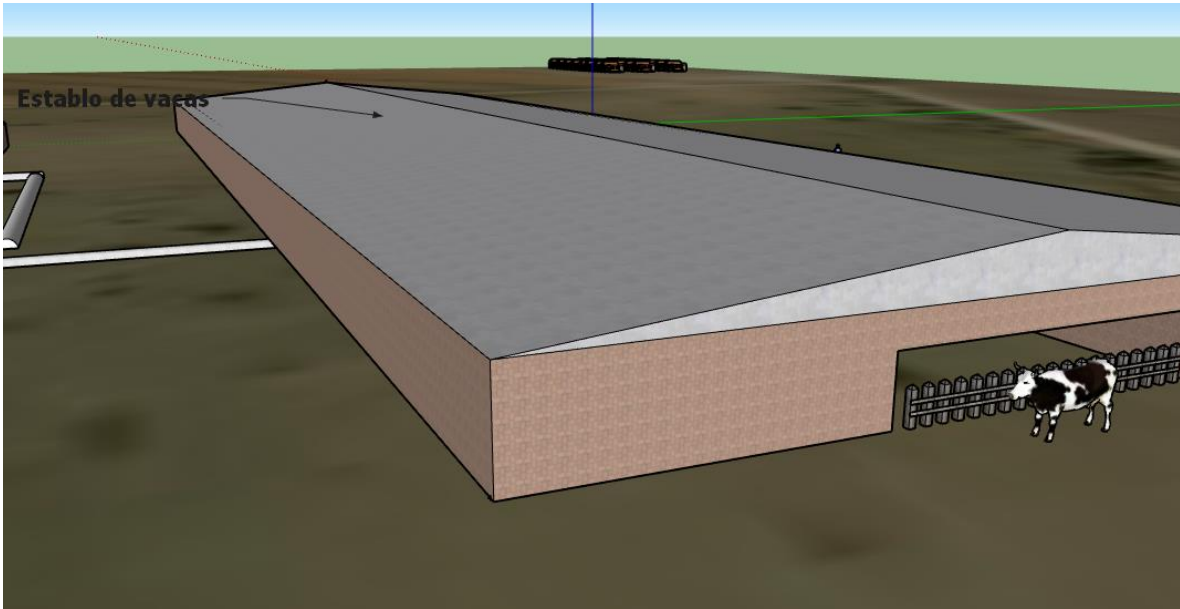


Figura A5.5 Establo de vacas.

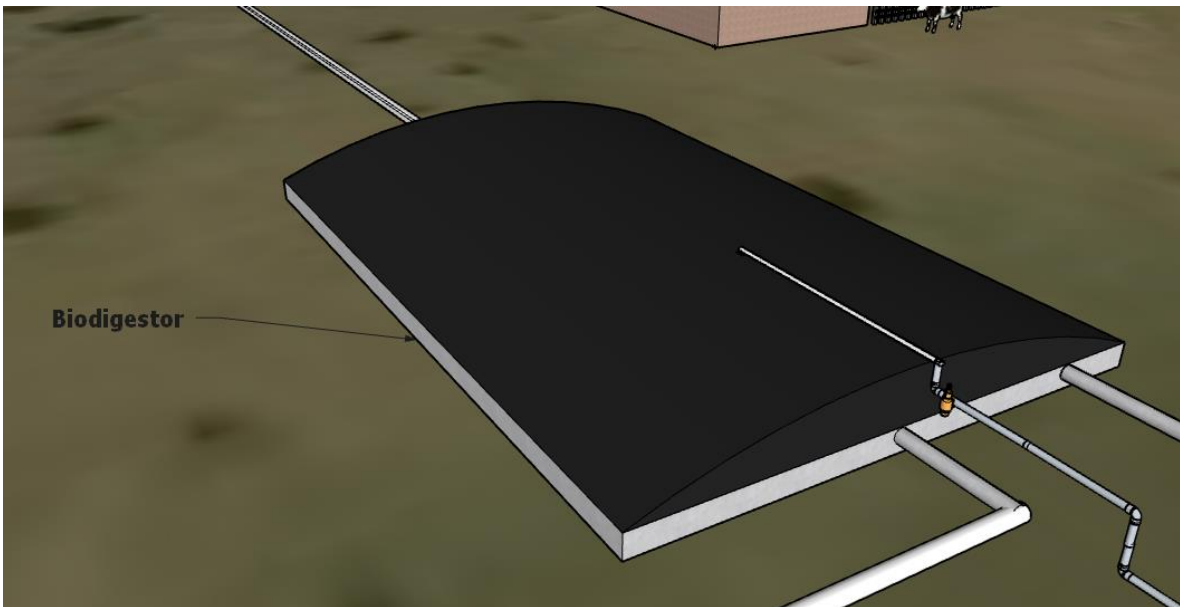


Figura A5.6 Biodigestor.

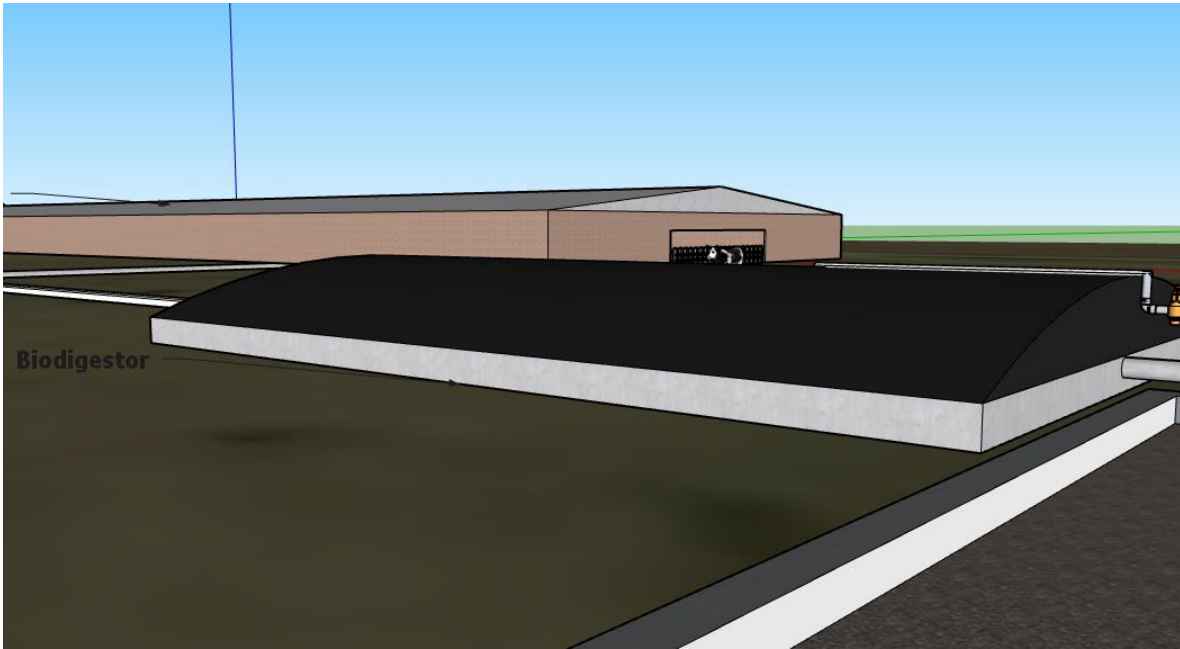


Figura A5.7 Biodigestor (2).

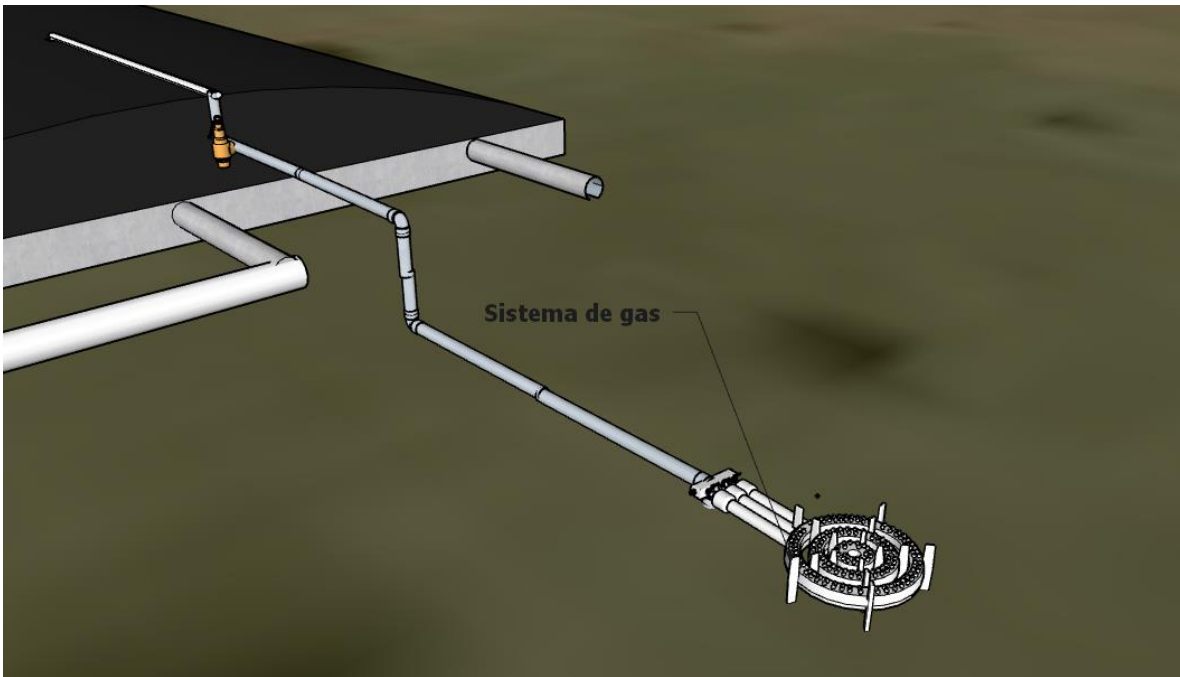
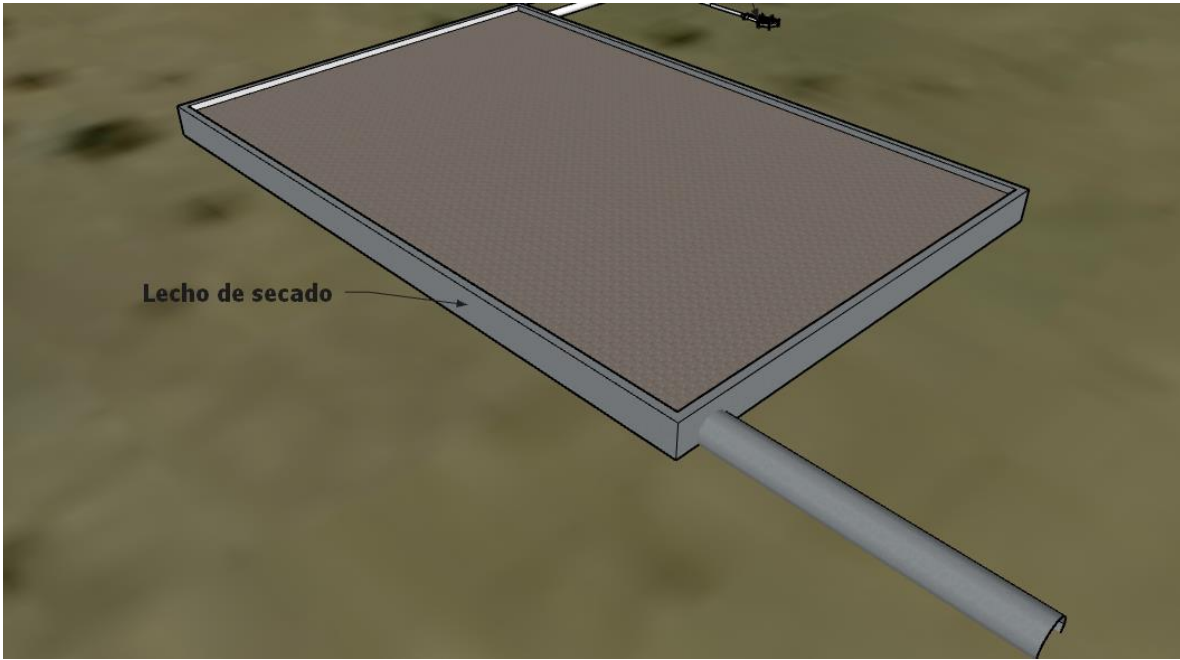


Figura A5.8 Sistema de gas



Lecho de secado

Figura A5.9 Lecho de secado.

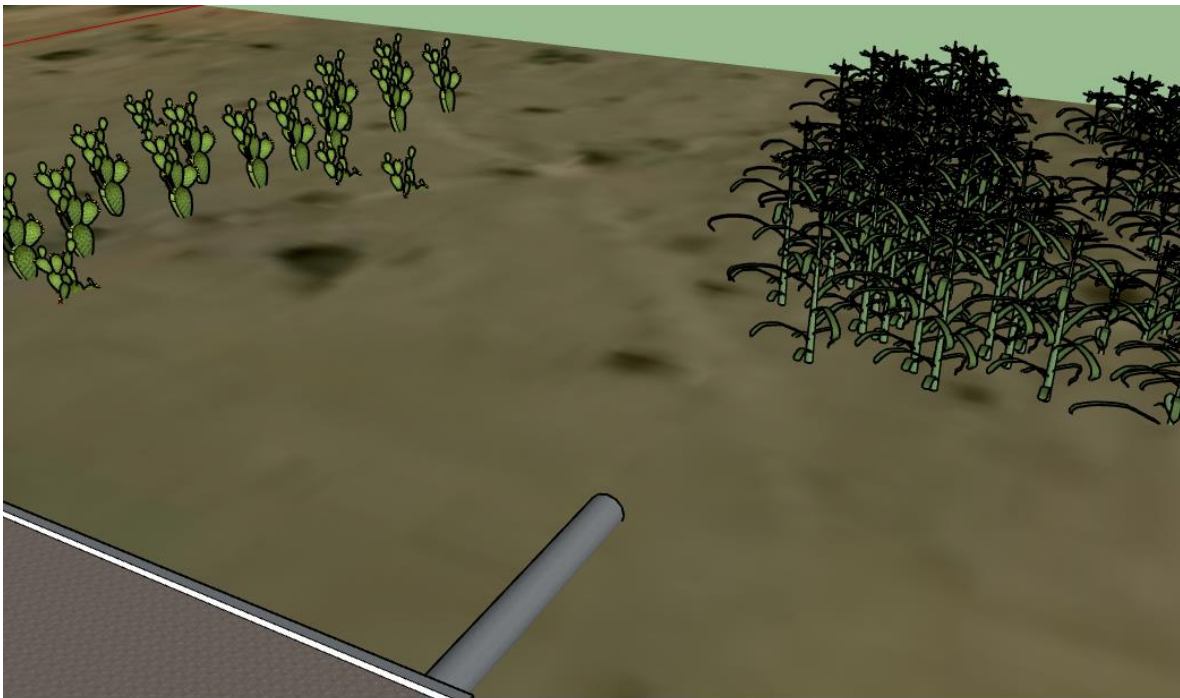


Figura A5.10 Uso de biofertilizante.

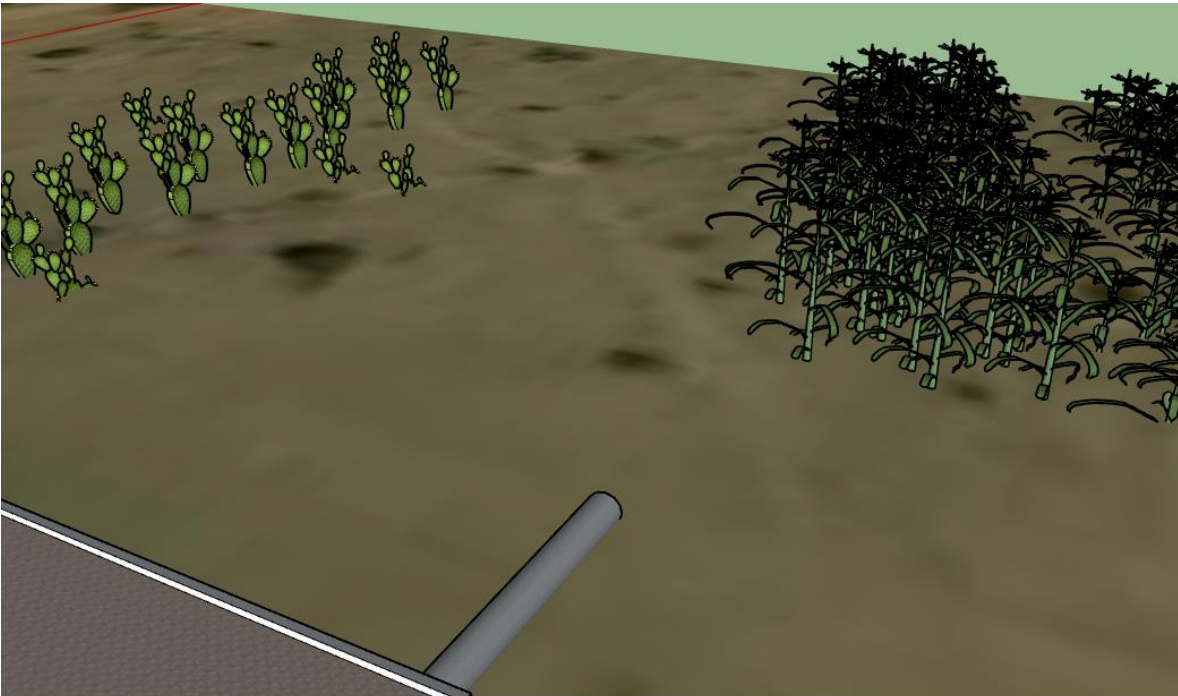


Figura A5.11 Uso de biofertilizante (2).

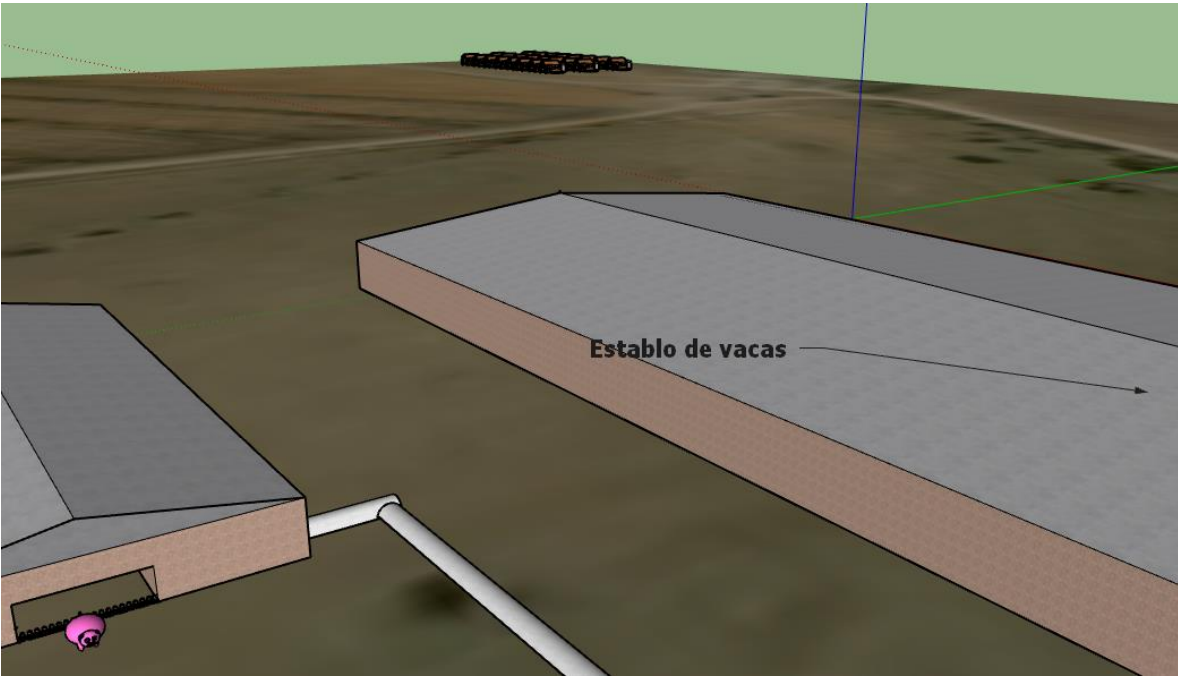


Figura A5.12 Vista al asentamiento urbano.