



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERIA

**SISTEMA PARA GENERAR BIOENERGIA A PARTIR DE
DESECHOS PECUARIOS EN EL CENTRO DE
INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE VETERINARIA
DE LA UNAM EN CHAPA DE MOTA, ESTADO DE
MÉXICO**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

PRESENTAN:

**MIGUELÓN LÓPEZ VALENCIA
TOMÁS FABIÁN PEÑALOZA CERVANTES**

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. ALEJANDRA CASTRO GONZÁLEZ

MÉXICO D.F., CIUDAD UNIVERSITARIA 2012



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: Ing. Francisco J. Rodríguez Ramírez

VOCAL: Dra. Alejandra Castro González

SECRETARIO: Dr. Arturo Guillermo Reinking Cejudo

1er. SUPLENTE: M.I. Juan Carlos Cedeño Vázquez

2do. SUPLENTE: Dr. Rafael Olea Pérez

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

El proyecto se llevó a cabo bajo el proyecto PAPIME 100810: "Prototipos de sistemas de Bioenergía y Biocombustibles" Dentro de los estudios de degradación con diferentes sustratos en un sistema de bioenergía. Se agradece al programa por el apoyo otorgado por DGAPA-UNAM a la investigación para estos tipos de temas.

ASESORA DEL TEMA:

Dra. Alejandra Castro González

SUSTENTANTES:

Miguelón López Valencia

Tomás Fabián Peñaloza Cervantes

Agradecimientos

A mi familia López Valencia por el apoyo siempre brindado.

A mi mamá Olivia Valencia Mendoza por el apoyo brindado durante todo mi periodo académico, y por todas las veces que me recordó que siempre hay que echarle ganas al estudio porque es la única herencia que me ha de dejar.

A mi papá Romualdo López Gutiérrez por demostrarme cada día que siempre hay que seguir adelante ante cualquier circunstancia, y por la determinación de decirme “tú sabes lo que haces”, “échale ganas”.

A mi hermana Yenny López Valencia por demostrarme que los sueños siempre son posibles sin importar que tan lejos se tenga que viajar para lograrlos, y sus comentarios “córtate la greña.. hash”.

A mi hermano Jesús López Valencia por ser el peque de la casa y el conse, y a un más por ser tan determinado en sus caprichos para lograrlos.

A mi tío Ricardo Valencia Mendoza por acordarse de los pobres jaja, gracias.

A Leslie Reyes Recillas, por el beso robado, cariño y amor brindado, y ante todo por demostrarme que hay muchos sueños que se pueden compartir, gracias “chaparrita”.

A Margarita Recillas, por brindarme su amistad y sabiduría, ante todo darme alojamiento en su casa para llenarme la pancita.

A la familia Reyes Recillas por su hospitalidad brindada, gracias.

A mis tíos más cercanos y vecinos Rubén y su esposa Irma por brindarme su amabilidad y bendiciones cada día.

A Tomas Fabián Peñaloza Cervantes, por compartir la carrera y esta tesis. En la cual nos llevamos muchas anécdotas.

A todos mis compañeros con los cuales fueron colegas de todas las desventuradas ocurridas en la carrera.

A mis mascotas, las cuales siempre estuvieron conmigo, en especial a mi conejo BOMBON, canario MANCHITAS y cotorro CHIQUITIN.

Al jurado por la revisión del manuscrito y las sugerencias para mejorarlo.

A la Facultad de Ingeniería, UNAM por darme un lugar en su recinto.

Gracias a todos lo que conforman mi vida.

Miguelón López Valencia

Agradecimientos

A mis padres: Epifanio Peñaloza López y Elvira Cervantes García por el apoyo brindado en todo desde que me dieron la vida hasta hoy en día. Por enseñarme un poco de lo que saben, por sus consejos, sus precauciones, sus regaños, su comprensión y sobre todo por cuidarme y quererme al igual que a mis hermanos.

A mis hermanos que siempre estarán ahí: Ray, Beto y Titis.

A mi papá, no dejarse vencer nunca ante las adversidades que se le presentan en la vida. Échale ganas “pifas” que quiero que veas que todo aquello que se deposito en mí no fue en vano.

A mi mamá, por estar siempre atenta y fuerte. Gracias por desvelarte y levantarte a la misma hora que yo, aunque no quisieras...bueno, sí.

A Raymundo Peñaloza Cervantes, por ser mi hermanito de toda la vida y que yo recuerde siempre hemos estado juntos en todo aunque te enojas o te rías. No pongo tu apodo porque un animalito puede sentirse herido jaja.

A Roberto Abat Peñaloza Cervantes “beto, gordo o betito”, por ser mi hermano menor con el que me puedo divertir con sus ocurrencias y enojos. Tu que apenas vas hacia delante en esto que se llama vida, échale muchas ganas.

A Damián Arturo Peñaloza Cervantes “titis, chichito o pidiorro morro”, por ser el hermanito menor de la familia que con tu alegría y cariñitos para todos, nos alegras el día. Algún día tendrás la edad para hacer y deshacer lo que quieras, por lo mientras no te agüites.

A Juan Vizcaya Becerra “Peluca o juan”, por tu amistad y compañía que de ahí viene que seamos “compas” y casi hermanos. Por todas las parrandas a las que fuimos, vamos e iremos.

A la Srita. Iraís Reza Arenas, por su cariño, confianza, amistad y amor. También por todas las correcciones de ortografía en este trabajo.

A Miguelón López Valencia, por su amistad y entusiasmo. Por discutir conmigo cualquier tema para nuestro saber. Ahora vamos a darle juntos a lo que sigue.

A Daniel Ramírez Yáñez por su amistad y anécdotas en algunas materias en la carrera.

A Rogelio, Silvia y Vivianita, por ser mis compadres, amigos y ahijada que uno pueda desear.

A la banda del museo, America, Marce, Nancy, Naye y Tavo por estar en las fiestas y no tan fiestas. Por su amistad y confianza. Sigamos para adelante.

A la banda de la facultad, Alexinho, Baranda, Benji, Amhed, Hector, Memorbo, Machorro, Maricruz, Dafne, Isras, por todas las cáscaras de fucho, fiestas y viernes sociales que pasamos juntos.

Al jurado de este trabajo, por las revisiones y sugerencias para la mejora del mismo.

A mi queridísima Facultad de Ingeniería y a las personas que la componen, ahí me forjé como Ingeniero y se que seguirá forjando a muchos más.

A la máxima casa de estudios, la Universidad Nacional Autónoma de México, por todo.

Tomás Fabián Peñaloza Cervantes

Índice

Índice de figuras	X
Índice de tablas	XIII
Abreviaturas	XV
Resumen	XVIII
Introducción	XIX
Objetivos	XXII

Capítulo 1. Antecedentes

1.1 Manejo de desechos pecuarios en México.....	1
1.2 Producción de energía a través de desechos pecuarios.....	1
1.3 Situación actual en México sobre los desechos pecuarios.....	4
1.4 Mecanismo de desarrollo limpio.....	5
1.5 Barreras de la producción de energía a través de desechos pecuarios.....	6
1.6 Problemática de plantas de biogás instaladas actualmente en México.....	7

Capítulo 2. Fundamentos

2.1 Energía renovable.....	10
2.2 Biogás.....	15
2.3 Degradación anaerobia.....	19
2.4 Tipos de reactores anaerobios utilizados para el tratamiento de desechos pecuarios.....	20
2.4.1 Reactor anaerobio tipo chino.....	20
2.4.2 Reactor anaerobio tipo indio.....	21
2.4.3 Reactor anaerobio de tipo Sri Lanka.	22
2.4.4 Reactor anaerobio tipo laguna.....	23
2.4.5 Reactor anaerobio de flujo tapón o “salchicha”.	24

2.4.6 Reactor de auto mezclado.....	25
2.5 Parámetros de control de los reactores anaerobios.....	28
2.5.1 Temperatura.	28
2.5.2 pH.....	30
2.5.3 Mezclado.	32
2.5.4 Nutrientes y relación carbono:nitrógeno.....	33
2.5.5 Demanda química de oxígeno (DQO).....	34
2.5.6 Alcalinidad.....	34
2.6 Parámetros de diseño de reactores anaerobios.....	35
2.6.1 Tiempo de residencia hidráulica (TRH).	36
2.6.2 Porcentaje de sólidos.....	38
2.6.3 Descripción general del sistema.....	38
2.6.4 Condiciones de proceso.....	38
2.6.5 Composición del biogás.....	39
2.6.6 Modelado.....	39
2.6.7 Tanque reactor anaerobio.....	39
2.6.8 Manejo del biogás.....	40
2.6.9 Limpieza del biogás.....	41
2.6.10 Equipo de control y análisis de sustratos.....	42
2.6.11 Principios de digestión.....	44
2.6.12 Cálculos de diseño.....	45
2.7 Disposición de los productos de sistemas anaerobios.....	49
2.7.1 Biogás.....	49
2.7.2 Uso del lodo digerido.....	49
2.8 Producción de biogás de desechos pecuarios.....	51
2.9 Necesidades energéticas en granjas de México.....	53

Capítulo 3. Estudio de caso

3.1 Centros de Enseñanza, Investigación y Extensión en Producción Animal de la Facultad de Veterinaria de la UNAM.....	55
3.2 Centro de Enseñanza, Investigación y Extensión en Producción Agro-Silvo Pastoral (CEIEPASP).....	55

3.3 Planos del lugar.....	58
3.4 Estadísticas de población animal.....	61
3.5. Clima e hidrología.....	72
3.6 Problemática del caso de estudio.....	72

Capítulo 4. Metodología

4.1 Manejo actual de excrementos en el CEIEPASP.....	73
4.2 Propuesta de manejo de excrementos en el CEIEPASP.....	75
4.3 Pruebas de laboratorio.....	75
4.4 Diagrama de metodología propuesta.....	77

Capítulo 5. Resultados

5.1 Determinación cuantitativa de desechos pecuarios en el CEIEPASP.....	79
5.2 Necesidades energéticas en el CEIEPASP.....	92
5.3 Pruebas de laboratorio.....	93
5.4 Dimensionamiento del reactor anaerobio.....	94
5.5 Planos de instalación del reactor anaerobio.....	97
5.6 Generación de energía a partir del biogás generado.....	109
5.6.1 Electricidad.....	109
5.6.2 Energía térmica.....	111
5.7 Energía sustituida con el biogás.....	112
5.8 Factibilidad económica.....	113
5.8.1 Inversión y flujo de efectivo.....	113
5.8.2 Valor presente neto (VPN).....	114
5.8.3 Tasa interna de retorno (TIR).....	116
5.9 Factibilidad ambiental.....	117

Capítulo 6. Conclusiones.....

Referencias.....	123
-------------------------	------------

Índice de figuras

Figura 1.1	Ejemplo de cómo aprovechar los desechos pecuarios.....	3
Figura 1.2	Escenario prospectivo al 2030 de la generación de electricidad en México.....	3
Figura 1.3	Esquema del uso mayoritario del estiércol.....	4
Figura 1.4	Ejemplo de intercambio con bonos de carbono (MDL).....	6
Figura 1.5	Problemas comunes de un reactor anaerobio.....	8
Figura 2.1	Distribución global del potencial de conversión térmico solar mediante colectores solares.....	11
Figura 2.2	Distribución global del potencial de conversión de la energía del viento tanto en la superficie marina como en la terrestre.....	12
Figura 2.3	Principio de funcionamiento de una celda de combustible de hidrógeno-oxígeno.	15
Figura 2.4	Varios usos del biogás.....	18
Figura 2.5	Composición de un reactor anaerobio de tipo chino.....	21
Figura 2.6	Reactor anaerobio tipo indio.....	22
Figura 2.7	Estructura del reactor anaerobio tipo Sri Lanka.....	23
Figura 2.8	Vista de un reactor anaerobio de tipo laguna	24
Figura 2.9	Reactor tipo “Salchicha”.....	25
Figura 2.10	Esquema del reactor de auto-mezclado.....	27
Figura 2.11	Rangos de temperatura psicrófila, mesófila y termófila.....	29
Figura 2.12	Tiempo de digestión con respecto a la temperatura en intervalos mesófilas y termófilos	29
Figura 2.13	Producción de gas por unidad de tiempo con respecto a la temperatura de operación.....	30
Figura 2.14	Comportamiento del pH en un reactor anaerobio, con respecto a su degradación	31
Figura 2.15	Concentración de CO ₂ vs. Alcalinidad en la operación de un reactor anaerobio.	35
Figura 2.16	Aparatos de mezclado.....	40
Figura 2.17	Fotografía de una unidad CHP	41

Figura 2.18	Instrumentos para la limpieza del biogás.....	42
Figura 2.19	Reactor horizontal tipo salchicha.....	44
Figura 2.20	Reactor vertical_tipo indio.....	44
Figura 3.1	Croquis para llegar al CEIEPASP.....	57
Figura 3.2	Vista panorámica del CEIEPASP.....	58
Figura 3.3	Vista del terreno que se usa para cultivo temporal.....	58
Figura 3.4	Planos de la nave en donde se tienen a los animales de estudio.	59
Figura 3.5	Modelado en 3D de la nave en donde se tienen a los animales de estudio.....	60
Figura 3.6	Planos en 3D de los drenajes de los corrales donde se tienen a los animales de estudio.....	60
Figura 3.7	Planos de nivel de drenajes de los corrales donde están los animales de estudio.....	61
Figura 3.8	Población de animales en 2010.....	69
Figura 3.9	Población de animales en 2011.....	70
Figura 3.10	Población total de animales durante los años 2010 y 2011.....	71
Figura 3.11	Clima del Estado de México.....	72
Figura 4.1	Vista de la nave en donde se resguardan los animales.....	73
Figura 4.2	Forma de recolección del excremento.....	74
Figura 4.3	Parte exterior del corral #5.....	75
Figura 4.4	Recipientes para las tomas de muestras.....	76
Figura 4.5	Frascos con muestras de excrementos de cada tipo de animal.....	76
Figura 4.6	Diagrama de metodología propuesta.....	78
Figura 5.1	Carretilla usada para el transporte del excremento en el CEIEPASP.....	79
Figura 5.2	Generación de excremento de animales durante un año en el CEIEPASP en el 2010.....	87
Figura 5.3	Generación de excremento de animales durante un año en el CEIEPASP en el 2010.....	88
Figura 5.4	Generación de excremento de animales durante un año en el CEIEPASP en el 2011.....	89
Figura 5.5	Generación de excremento de animales durante un año en el CEIEPASP en el 2011.....	90

Figura 5.6	Cantidad total de excremento generado de animales del CEIEPASP en los años 2010 y 2011.....	91
Figura 5.7	Pirámide truncada en la cual se basa el diseño del reactor anaerobio.....	95
Figura 5.8	Bolsa de geomembrana del reactor anaerobio.....	96
Figura 5.9	Reactor anaerobio tipo laguna que será instalado en el CEIEPASP.....	97
Figura 5.10	Vista general de la instalación del reactor anaerobio.....	98
Figura 5.11	Partes del reactor anaerobio.....	99
Figura 5.12	Dimensiones del reactor anaerobio (estructura alámbrica).....	99
Figura 5.13	Dimensiones del reactor anaerobio (estilo visual realista).....	100
Figura 5.14	Vista general del contenedor del sustrato.....	101
Figura 5.15	Vista aérea del contenedor del sustrato.....	101
Figura 5.16	Vista lateral del contenedor del sustrato.....	102
Figura 5.17	Vista frontal del contenedor del sustrato.....	102
Figura 5.18	Vista general del reactor anaerobio	103
Figura 5.19	Vista lateral del reactor anaerobio con una inclinación de 2°.....	104
Figura 5.20	Vista aérea del reactor anaerobio con sus respectivas cotas de los ductos efluente e influente.....	104
Figura 5.21	Vista general del contenedor de lodo digerido.....	105
Figura 5.22	Vista frontal del contenedor de lodo digerido.....	106
Figura 5.23	Vista desde abajo del contenedor de lodo digerido.....	106
Figura 5.24	Vista aérea del reactor anaerobio.....	107
Figura 5.25	Vista del reactor anaerobio con marcas de nivel y la rampa.....	108
Figura 5.26	Vista del reactor anaerobio con tubería para la recirculación de biogás.....	108
Figura 5.27	Vista completa del reactor anaerobio.....	109

Índice de tablas

Tabla 2.1	Composición del biogás.....	15
Tabla 2.2	Propiedades químicas del biogás.....	16
Tabla 2.3	Producción específica del biogás.....	16
Tabla 2.4	Composición de biogás producido por estiércol.....	17
Tabla 2.5	Algunas equivalencias del biogás con otros combustibles.....	17
Tabla 2.6	Parámetros de control, físico y químico.....	28
Tabla 2.7	Beneficios de las cepas mesófila y termófila.....	30
Tabla 2.8	Producción de gases dependiendo de la relación C/N.....	33
Tabla 2.9	Relación C/N de diversos desechos disponibles en el medio rural.....	34
Tabla 2.10	Concentración de oligoelementos con respecto a la carga orgánica de entrada al digestor	34
Tabla 2.11	Parámetros y observaciones para un correcto arranque de un reactor anaerobio.....	36
Tabla 2.12	Valores promedio en sustratos provenientes de desechos pecuarios.....	43
Tabla 2.13	Valores promedio en sustratos no provenientes de los desechos pecuarios..	43
Tabla 2.14	Capacidad máxima de kWth en tubos de calefacción.....	47
Tabla 2.15	Características de lodos digeridos.....	50
Tabla 3.1	Población total de ganado ovino en el 2010.....	62
Tabla 3.2	Población total de ganado caprino en el 2010.....	62
Tabla 3.3	Población total de ganado bovino en el 2010.....	63
Tabla 3.4	Población total de ganado porcino en el 2010.....	63
Tabla 3.5	Población total de ganado equino en el 2010.....	64
Tabla 3.6	Población total de ganado avícola en el 2010.....	64
Tabla 3.7	Población total de ganado en el CEIEPASP en el 2010.....	65
Tabla 3.8	Población total de ganado ovino en el 2011.....	65
Tabla 3.9	Población total de ganado caprino en el 2011.....	66
Tabla 3.10	Población total de ganado bovino en el 2011.....	66
Tabla 3.11	Población total de ganado porcino en el 2011.....	67
Tabla 3.12	Población total de ganado equino en el 2011.....	67
Tabla 3.13	Población total de ganado avícola en el 2011.....	68

Tabla 3.14	Población total de ganado dentro del CEIEPASP en el 2011.....	68
Tabla 4.1	Resultados obtenidos en el laboratorio.....	76
Tabla 4.2	Porcentaje de cada especie en STF y STV.....	77
Tabla 4.3	Porcentaje de ST en la muestra.....	77
Tabla 4.4	Cantidad de biogás producida por especie de ganado.....	77
Tabla 5.1	Inventario de animales del CEIEPASP en el 2010.....	82
Tabla 5.2	Cantidad promedio de excrementos por mes durante el 2010.....	82
Tabla 5.3	Cantidad de excremento promedio diario durante el 2010.....	83
Tabla 5.4	Porcentaje de excrementos diarios por especie dentro del CEIEPASP en el 2010.....	83
Tabla 5.5	Cantidad de carretillas por especie al día en el 2010.....	84
Tabla 5.6	Inventario de animales del CEIEPASP en el 2011.....	84
Tabla 5.7	Cantidad promedio mensual de excrementos animales en el CEIEPASP durante el 2011.....	85
Tabla 5.8	Cantidad promedio diaria de excrementos animales dentro del CEIEPASP en el 2011.....	85
Tabla 5.9	Porcentaje de excrementos diarios por especie en el CEIEPASP durante el 2011.....	86
Tabla 5.10	Cantidad promedio de carretillas por especie al día en el CEIEPASP durante el 2011.....	86
Tabla 5.11	Consumo de gas LP en el CEIEPASP.....	92
Tabla 5.12	Consumo de energía eléctrica en el CEIEPASP durante el 2010.....	92
Tabla 5.13	Consumo de energía eléctrica en el CEIEPASP a comienzos del 2011.....	93
Tabla 5.14	Cantidad de gas LP consumido por el CEIEPASP durante el 2011.....	112
Tabla 5.15	Monto de inversión.....	113
Tabla 5.16	Ahorro monetario en el consumo de gas Lp durante un año.....	114
Tabla 5.17	Ahorro monetario ajustado al consumo del compresor.....	114
Tabla 5.18	Valores del VPN y TRI.....	117
Tabla 5.19	Tiempo de recuperación de la inversión.....	117
Tabla 5.20	Comparación de los niveles de nutrientes entre los lodos digeridos y lodos sin tratar.....	119
Tabla 5.21	Comparación entre digestión y compostaje para el tratamiento de desechos biodegradables.....	120

Abreviaturas

A	Área
Bv	Carga orgánica volumétrica
Bx	Carga orgánica másica
C	Carbono
C:N	Carbono:Nitrógeno
CEIEPASP	Centro de Enseñanza, Investigación y Extensión en Producción Agrosilvopastoril
CER	Certificados de Reducción de Emisiones
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CH ₄	Metano
Cl	Cloro
cm	Centímetro
CMNUCC	Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CRE	Comisión Reguladora de Energía
CS	Cantidad de otro sustrato
DM	Contenido de materia seca
DOE	Entidad operacional designada
DOF	Diario oficial de la federación
DQO	Demanda química de oxígeno
E	Energía
EE	Eficiencia eléctrica
ET	Energía total
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nation (por sus siglas en ingles)
g	Gramo
GEI	Gases de efecto invernadero
Gw	Gigawatt
h	Altura

H	Hidrógeno
H ₂ O	Agua
H ₂ S	Ácido sulfhídrico
HFC	Hidrofluorocarbonos
IILSEN	Instituto de Investigación Legislativo del Senado de la República Mexicana
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
K	Potasio
Kcal	Kilocaloría
Kg	Kilogramo
KJ	Kilojoule
Kw	Kilowatts
Kwh	Kilo watts hora
L	Litro
LFDMA	Ley Federal de Derechos en Materia de Agua
LMP	Límites Máximos Permisibles
Lp	Gas licuado del petrolea
m	Metro
m ³	Metro cúbico
MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio
MG	Moto-generator
MJ	Megajoule
ml	Mililitro
Mm	Milímetro
Mmax	Cantidad máxima de metano obtenido
MO	Materia orgánica
MS	Materia seca
Mw	Megawatts
N	Nitrógeno
N ₂ O	Oxido nitroso
NH ₃	Amoniaco
°C	Grados centígrados
ODM	Partícula orgánica del sustrato
OM	Porcentaje de materia orgánica

ONU	Organización de Naciones Unidas
P	Fósforo
PB	Producción de biogás
PC	Poder calorífico
PCB	Poder calorífico del biogás
pH	Potencial hidrogeno
PK	Protocolo de kyoto
ppb	Partes por billón
ppm	Partes por millón
Q	Gasto ó caudal
S	Azufre
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, Pesca y Alimentación
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SENER	Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México
SF	Sólidos fijos
SF ₆	Hexafluoruro de azufre
SIMEPRODESO	Sistema Metropolitano de Desechos Sólidos
SO ₂	Dióxido de azufre
SST	Sólidos suspendidos totales
SSV	Sólidos suspendidos volátiles
ST	Sólidos totales
SV	Sólidos volátiles
T _{CO2eq}	Toneladas de dióxido de carbono equivalente
TIR	Tasa interna de retorno
Ton	Toneladas
TRH	Tiempo de residencia hidráulico
UNEP	Programa de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente
V	Volumen
V _{ch₄}	Volumen de metano generado
VPN	Valor presente neto
Weh	Watts eléctricos hora
%	Porcentaje

Resumen

Este trabajo consistió en el diseño de un reactor anaerobio en un Centro de Enseñanza, Investigación y Extensión en Producción Agrosilvopastoril (CEIEPASP), de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia (FMVZ), de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Para lograr lo mencionado, se caracterizaron los desechos que se generan en el CEIEPASP. El CEIEPASP cuenta con una población de 42 cabras, 28 vacas, 8 becerros, 12 cerdos, 106 borregos y 6 caballos. Se caracterizaron los desechos con una masa de 873 kg/día. Por la noche son guardados en los establos y durante el día se llevan a pastorear al sotobosque de encino, pastizal nativo abierto, praderas inducidas (*Rye grass*, *Festuca*, Trébol blando y Trébol rojo), rastrojo de avenales y milpas. Las heces fecales de los animales en los establos, actualmente son esparcidos en el bosque donde los rebaños van a pastorear; pero este manejo no es el correcto debido a que se generan emisiones de gases al medio ambiente y no es un compost adecuado. Se plantea en este trabajo, un diferente manejo y un tratamiento de estos desechos mediante el reactor anaerobio para su conversión a biogás en el CEIEPASP.

El lugar en donde se implementará el reactor anaerobio, tiene un área de 20m x 10m x 2m. El digestor diseñado tiene un volumen de 84m³, un tanque de lodo digerido de 3m³ y una producción de biogás de 8.43 m³/día. El tiempo de residencia de diseño fue de 28 días. Estos valores fueron determinados mediante la operación de un digestor a nivel laboratorio con muestras representativas de la caracterización de los desechos.

La producción de biogás resultó ser escasa, pues no hay un control de dónde defecan los animales durante el día. Con la equivalencia de biogás con el gas LP podría tener un ahorro en el consumo de este para el CEIEPASP, desde un mínimo 90 % hasta un máximo 100 %. Para energía eléctrica, el ahorro queda descartado, ya que generarían 0.44kWe. El valor del presente neto es \$5,160.31 con una tasa del 15% a 20 años, y la TIR es de 16.47%. Lo que indica que es factible económicamente y que la inversión se recuperaría de 14 a 15 años. La reducción de gases efecto invernadero será de 28.56 TonCO_{2eq}/año.

Introducción

Los Centros de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia (FMVZ) de la UNAM, son espacios destinados a contribuir a la enseñanza, investigación y difusión de la producción animal a través del proveer los modelos prácticos de ésta. La FMVZ cuenta con ocho Centros de Enseñanza Investigación y Extensión (CEIEP), atendiendo las especies de mayor interés pecuario en México: Bovinos lecheros, bovinos de carne, bovinos de doble propósito, ovinos, caprinos, porcinos, pollos de engorda, gallinas de postura, conejos, peces y abejas; e inclusive algunas especies exóticas de interés pecuario, tales como los ciervos y avestruces.

Las funciones de los centros son las siguientes: 1) Apoyar a los departamentos académicos de la facultad en la enseñanza, investigación y difusión de los aspectos técnicos, científicos y financieros de la producción animal; 2) Desarrollar y difundir tecnología eficiente y adecuada de producción animal que coadyuve a la satisfacción de necesidades técnicas, económicas y ecológicas de sus áreas de influencia y del país; 3) Informar a los departamentos relacionados con la producción animal sobre sus programas productivos para la coordinación con la ejecución de prácticas escolares; 4) Atender a los estudiantes en prácticas escolares sobre tópicos en la producción animal; 5) Elaborar un programa de producción, presupuesto y académico, aprobados por la Secretaría de Producción Animal y 6) Conducir y/o asistir en la ejecución de proyectos de investigación aplicada a la resolución de problemas de la producción animal de interés nacional. Uno de los ocho CEIEP se eligió para realizar un estudio de manejo de desechos pecuarios y convertirlos en energía, el cual es el Centro de Enseñanza, Investigación y Extensión en Producción Agro-Silvo Pastoril (CEIEPASP) ubicado en Chapa de Mota, Estado de México.

El CEIEPASP cuenta con 253 hectáreas donde se siembra maíz, avena y bellotas (árboles de robles y encinos) y en esas áreas pastorean los rebaños de animales. Los animales de esta actividad pastoril son aproximadamente 42 cabras, 28 vacas, 8 becerros, 12 cerdos, 106 borregos y 6 caballos.

Los excrementos pecuarios por el día son esparcidos en la zona de pastoreo y por la noche, los excrementos pueden recolectarse en los establos y corrales donde pernoctan los animales y actualmente son llevados a los campos para esparcirlos como abono.

Desde el punto de vista energético y ambiental, de acuerdo con la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 37% del metano producido por el hombre proviene del ganado. Aunque el metano calienta la atmósfera mucho más fuertemente que el CO₂, su vida media en la atmósfera es de apenas 8 años, versus 100 años para el CO₂. Como resultado, una reducción importante en el ganado criado globalmente reduciría los gases de efecto invernadero (GEI) relativamente rápido comparado con las medidas que involucran energía renovable y eficiencia energética.

La capacidad de los GEI para atrapar calor en la atmósfera se describe en términos de su potencial de calentamiento global (PCG), que compara su potencia con la del CO₂ (con PCG de 1). La nueva figura ampliamente aceptada para el PCG del metano es 25, usando un margen de tiempo de 100 años pero es de 72 usando un margen de tiempo de 20 años, que es más apropiado tanto por el gran efecto que pueden tener las reducciones de metano en 20 años, como por la seria alteración climática que se espera dentro del margen de los 20 años que vienen si no se logra una reducción importante. El Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change), apoya el uso de un margen de 20 años para el metano.

La FAO estima que la ganadería es responsable de 103 millones de toneladas de emisiones de metano en el 2004 mediante la fermentación entérica y manejo de excremento, equivalente a 2,369 millones de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) equivalente. Esto es el 3.7% de los GEI globales usando, como lo hace la FAO, el potencial de calentamiento global (PCG) desactualizado de 23. Utilizando el PGC de 72, el metano del ganado es responsable de 7,416 millones de toneladas de CO₂ equivalente ó 11.6% de los GEI globales. Así que utilizar el margen de tiempo de 20 años en lugar de 100 años para el metano eleva la cantidad total de GEI atribuibles a los productos y derivados de la ganadería en 5,047 millones de toneladas de CO₂ equivalente o 7.9% en puntos porcentuales. Se requiere más investigación para recalibrar las emisiones de metano adicionales a aquellas que emiten los productos de la ganadería al utilizar el margen de 20 años. Y para ello se utilizan estudios sobre análisis de ciclo de vida. Los bovinos productores de carne y de leche son responsables de, aproximadamente, el 95 % de

estas emisiones, correspondiendo, el 5 % restante, a todas las demás especies de producción (ovinos, caprinos, porcinos, equinos, aves, búfalos, asnales, mulares y camélidos sudamericanos). Según estimaciones propias, entre los años 1990 y 2005, se registró un incremento del 7.7 % en las emisiones de GEI del sector ganadero.

Muchas oportunidades de mitigación involucran tecnologías actualmente disponibles en la UNAM y que podrían implementarse en forma inmediata para el centro de investigación de la Facultad de Veterinaria. El CEIEPASP genera 0.08 toneladas métricas de dióxido de carbono equivalente por día y que sería necesario un plantío de 488.8 m² de árboles maduros para evitar el efecto de gases invernadero. Los sistemas anaerobios tratan los excrementos y se aprovecharía el biogás como una fuente de energía renovable. Convirtiendo el centro en un modelo energético de mitigación de gases efecto invernadero para el país.

Existen en la actualidad reactores anaerobios comerciales en granjas, todos de origen extranjero instalados en las zonas del norte y sur del país. Tan solo en el estado de Yucatán, se tiene proyectado instalar 52 reactores anaerobios antes de que termine la presente administración. En la región del Bajío y de la Comarca Lagunera, en el centro y norte del país se instalaron reactores anaerobios a partir de 2007. Pese a estos esfuerzos, el manejo de las excretas a través de sistema anaerobios no ha producido los resultados esperados, pues no se han conseguido darle uso a los productos generados y en muchos casos el biogás solo se quema y los efluentes aún contaminados se siguen descargando en la forma acostumbrada. Todas estas instalaciones han desarrollado muchas dificultades en su funcionamiento y esto reduce considerablemente su factibilidad técnica, económica y ambiental. Aunado que al no funcionar correctamente, los sistemas no están aptos para una eficiente conversión del biogás en energía. En México, específicamente en la Facultad de Ingeniería de la UNAM se tiene una amplia experiencia en la instalación y operación de estos sistemas. Por lo que se garantiza que la obtención de energía a partir de los excrementos será la adecuada.

De acuerdo a lo planteado, se exponen a continuación los siguientes objetivos de este trabajo.

Objetivos

Objetivo general:

Diseñar un sistema energético a partir de los desechos pecuarios para su uso en el CEIEPASP ubicado en el municipio de Chapa de Mota en el Estado de México.

Objetivos específicos:

- Estudiar el proceso de producción, manejo y disposición actual de desechos en el CEIEPASP de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UNAM ubicado en Chapa de Mota, Estado de México.
- Realizar una propuesta de manejo de residuos en el CEIEPASP, para reducir los daños ecológicos y su transformación en energía.
- Realizar el estudio de factibilidad técnica, económica y ambiental para la implementación de la conversión de desechos pecuarios en biogás y electricidad.
- Abordar un problema real sobre desechos aportando una solución de aprovechamiento energético para el CEIEPASP.

Capítulo 1. Antecedentes

1.1 Manejo de desechos pecuarios en México

En las últimas décadas, en México se ha tomado conciencia sobre el potencial del aprovechamiento de la materia fecal del ganado para convertirla en energía. Tiempo atrás, en la mayoría de las veces, ésta era desechada al drenaje o, en el mejor de los casos, utilizada como compost. Debido a la gran diversidad de sistemas de producción pecuaria en nuestro país, no existen técnicas universales de manejo para sus desechos. Sin embargo, hay diversas opciones para su aprovechamiento, donde la conversión al biogás resulta una de las estrategias más redituables. Además existen varias opciones que nos permiten recomendar un enfoque para la selección de estrategias aprobadas pero aplicables bajo distintas condiciones (2000AGRO, 2011).

Para tener un buen manejo de excretas en cualquier lugar pecuario y así lograr una retribución propia y ambiental, se debe considerar lo siguiente:

- * Un aseo adecuado
- * Facilidad para la remoción del estiércol
- * Consumo de poca agua
- * Requerimiento de poca mano de obra
- * Conservación de las propiedades nutritivas
- * Facilidad para suficiente almacenamiento
- * Eliminación de la emisión de olores ofensivos
- * Tratamiento adecuado al tipo de producto a obtener
- * Supresión de patógenos

1.2 Producción de energía a través de desechos pecuarios

La biomasa es la materia orgánica contenida en productos de origen vegetal y animal que puede ser capturada y usada como una fuente de energía química almacenada (IILSEN, 2004). La producción de energía a través de desechos pecuarios se refiere a la generación de energía

a partir de biomasa. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) agrupa los biocombustibles o bioenergéticos, en tres categorías: 1) Combustibles de madera; 2) Agro-combustibles, y 3) Subproductos de origen municipal. En el caso de México se han creado siete subcategorías (González, 2009):

- 1) Combustibles de madera (bosques naturales y plantaciones)
- 2) Subproductos de la extracción forestal e industria maderera
- 3) Subproductos agrícolas
- 4) Subproductos pecuarios
- 5) Subproductos agroindustriales
- 6) Cultivos energéticos
- 7) Subproductos de origen municipal

Considerando las categorías 3, 4, 5 y 7, se puede obtener un combustible en común: El biogás. La producción de éste, depende sobre todo del potencial ambiental, social y económico de cada región. En México no se tiene un dato exacto de producción de energía a partir del sector pecuario, ya que son muy pocas las instalaciones de reactores anaerobios (contenedores para producir biogás) que reportan su producción en toda la república y su operación no es eficiente (Figura 1.1). Actualmente operan más de 800 a gran escala.

La energía proveniente de los residuos es renovable cuando el biogás es generado por residuos orgánicos. El potencial técnico de esta bioenergía en México, se estima en 3,771 Petajoules al año, sin embargo, su uso hasta el 2008 era 10 veces menor (Guzmán, 2008). Se estima que para el año 2030 (Figura 1.2) habrá un aumento en la generación de energía eléctrica del 3% usando como combustible a la biomasa.

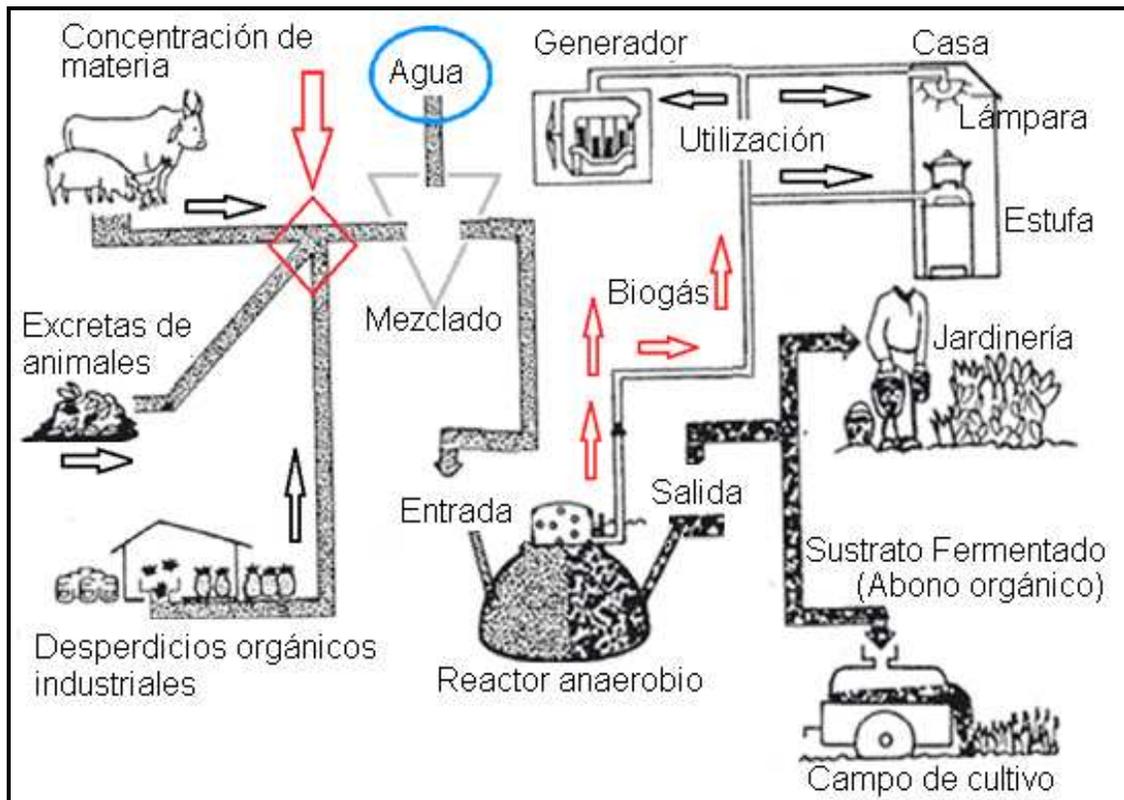


Figura 1.1 Ejemplo de como aprovechar los desechos pecuarios (Castro A., 2011d)

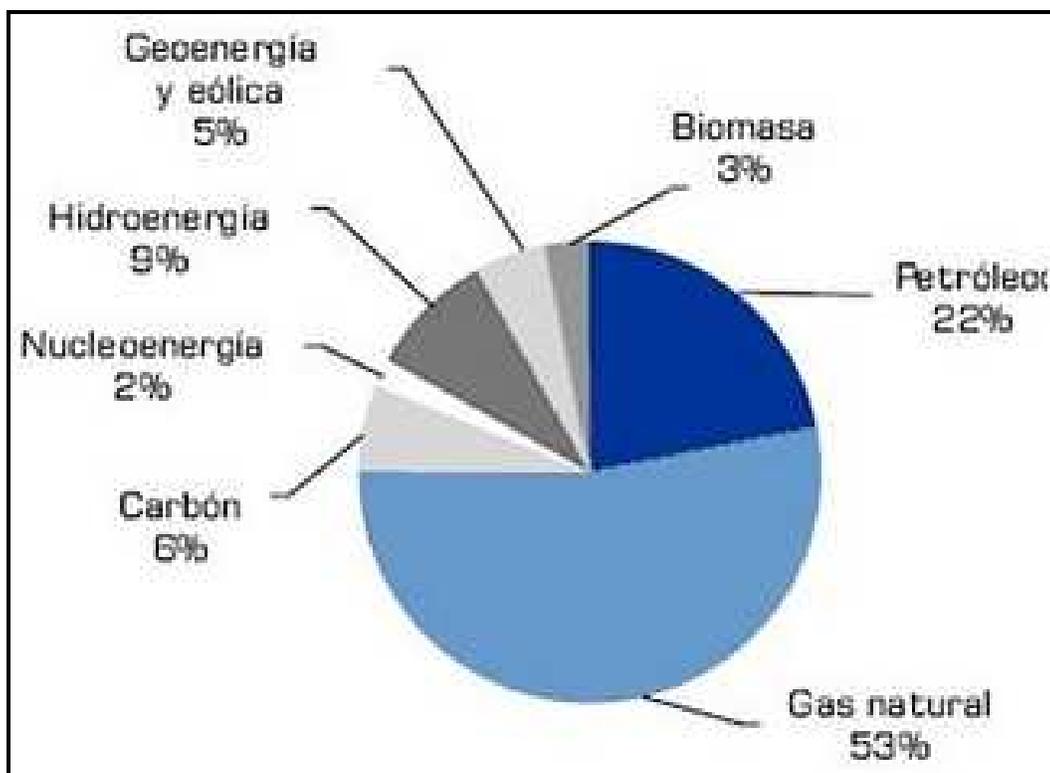


Figura 1.2 Escenario prospectivo al 2030 de la generación de electricidad en México. (Gómez, 2006)

1.3 Situación actual en México sobre los desechos pecuarios

Actualmente, México es un país que está en vías de crecimiento en la utilización y manejo de los desechos pecuarios, ya sea para utilizarlos como abono o para la obtención de energía a través de su transformación (SAGARPA, 2007a). Se contemplan como desechos: hojas, rastrojos, zacates, cáscaras, basuras orgánicas caseras, aserrín y virutas, ramas, estiércoles, y residuos industriales de origen orgánico (SAGARPA, 2007a). La Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) registra que lo poco aprovechado de los desechos pecuarios (Figura 1.3), se usa actualmente para el compostaje y la creación de compost vermicular en gran parte de las zonas ganaderas del país, y también como una alternativa de fertilización usada en invernaderos de la región conocida como La Comarca Lagunera (2007).

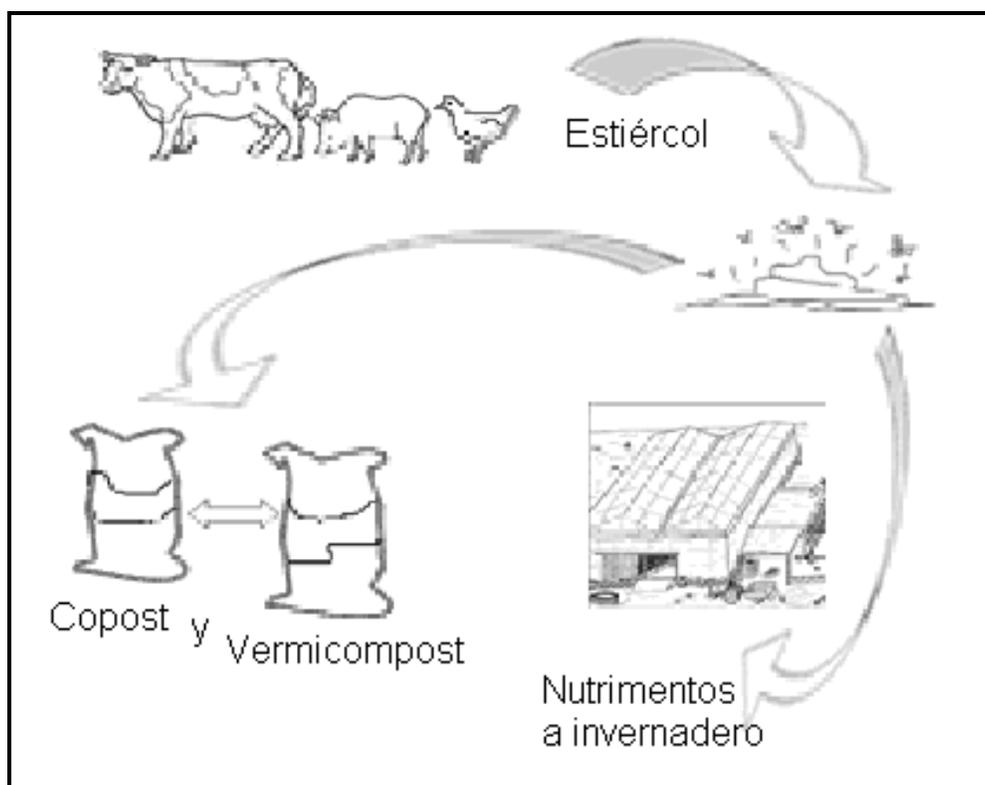


Figura 1.3 Esquema del uso mayoritario del estiércol (SAGARPA, 2011a)

Los desechos generados diariamente en México, son cantidades gigantescas que se pueden aprovechar para su transformación en energía y no nada más para los usos mencionados anteriormente, desafortunadamente esta última alternativa es de un conocimiento y uso

minúsculo. Las siguientes cantidades de cabezas de ganado en el país, muestran el potencial de disponibilidad de los desechos pecuarios:

- 356, 824,000 cabezas de aves de corral
- 23, 316,000 cabezas de ganado bovino
- 8, 600,000 cabezas de ganado porcino (INEGI, 2007a).

El más reciente “Censo Agrícola, Ganadero y Forestal” elaborado por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) en el 2007, no arrojó cifras sobre el uso del estiércol como energía y sí como abono. Esto refleja los usos mayoritarios dados a los desechos pecuarios en el país.

1.4 Mecanismos de desarrollo limpio

El Protocolo de Kyoto (PK) define a un Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) como un procedimiento en donde países desarrollados pueden financiar proyectos para disminuir o suavizar las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) dentro de países en vías de desarrollo, y recibir a cambio Certificados de Reducción de Emisiones (CER) aplicables a cumplir con su propio compromiso de reducción. En este protocolo, se consideran como GEI a los siguientes: Dióxido de carbono (CO₂), Metano (CH₄), Óxido nitroso (N₂O), Hidrofluorocarbonos (HFC), Perfluorocarbonos (PFC), Hexafluoruro de azufre (SF₆). El propósito del MDL es: “Ayudar a los países en vías de desarrollo a lograr un desarrollo sustentable y contribuir al objetivo último de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Así como ayudar a las Partes incluidas en el anexo I a dar cumplimiento a sus compromisos contraídos en virtud del artículo 3 del PK sobre la limitación y reducción de las emisiones de GEI” (PK, Artículo 12).

Es decir, el MDL reduce el costo de cumplimiento de compromisos para países desarrollados acordados en el PK comprando CER a países en desarrollo para mitigar sus emisiones de GEI a la atmosfera (un CER equivale a una tonelada de GEI). Así, los países en desarrollo se benefician del incremento en movimientos financieros de capital de inversión para proyectos de reducción de GEI y de los resultados que estos ofrecen (Figura 1.4).

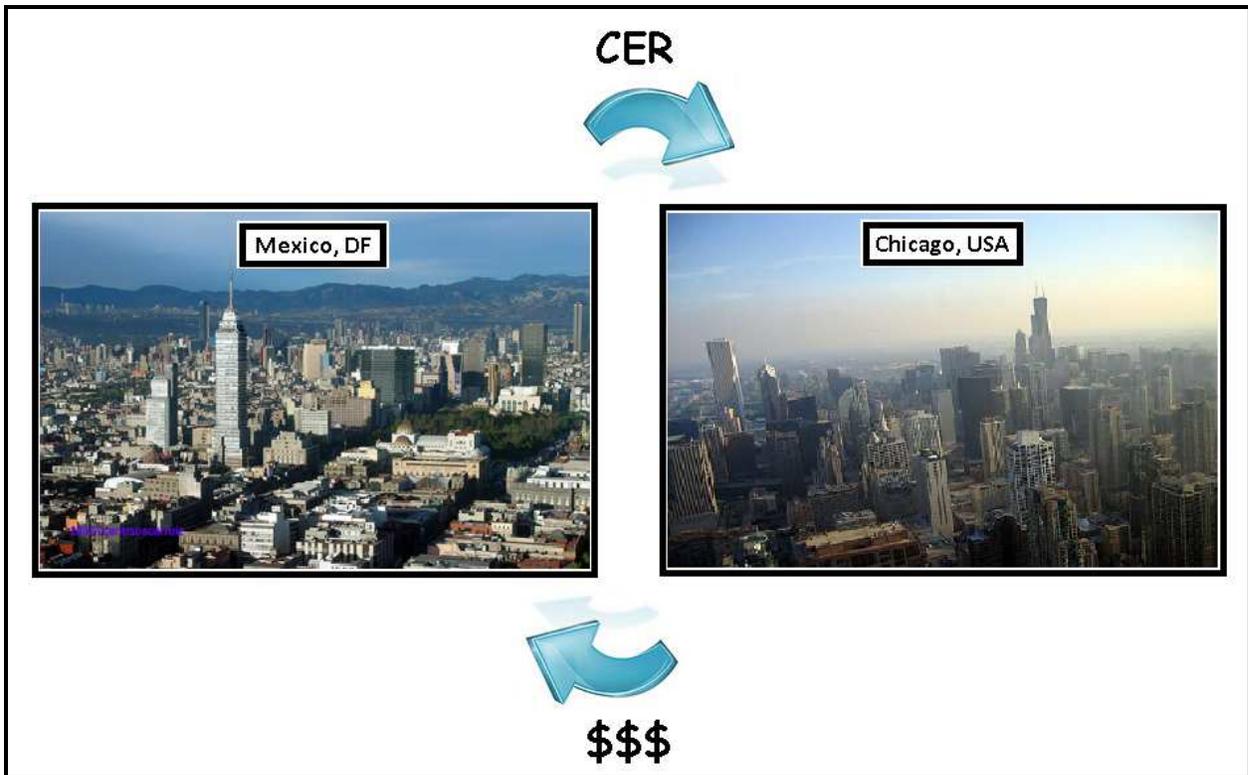


Figura 1.4 Ejemplo de intercambio con bonos de carbono (UNFCCC, 1997)

1.5 Barreras de la producción de energía a través de desechos pecuarios

Como en todo país tratando de implementar nuevos métodos para producir energía renovable, México se enfrenta a grandes problemas que combatir para la aplicación de éstos usando desechos pecuarios, desde los problemas técnicos, políticos, institucionales hasta los de tipo sociocultural. A continuación se listan algunos de éstos (Pernudi, 2005):

Políticos: Los promotores de las energías renovables cuentan con poco peso político.

Institucionales: Existe una burocracia excesiva para establecer empresas. Hay desconocimiento o desconfianza en el sector privado acerca de la magnitud y potencial de aprovechamiento de la energía obtenida a través de los desechos pecuarios.

Administrativos: Existe falta de sinergia entre los planes de electrificación rural y el desarrollo de fuentes renovables.

Económicos: Las energías renovables tienen actualmente altos costos y generalmente para el aprovechamiento de los desechos pecuarios se necesita una gran inversión inicial.

Técnicos: Existe poca información detallada y confiable sobre los recursos que se pueden aprovechar mediante la explotación de los desechos pecuarios.

Recursos humanos: Son pocas las personas capacitadas para labores de desarrollo de proyectos e ingeniería.

Sociales/Culturales: No se valora en México la cobertura energética de largo plazo. Las energías renovables no forman parte de nuestras costumbres, por ejemplo; es muy fácil subir a tender la ropa al sol, pero es imposible que la misma persona cocine con una estufa que utilice gas metano derivado de los desechos orgánicos.

Legal: Anteriormente, no existían leyes para el aprovechamiento de las energías renovables y fue hasta el año 2008. En el cual, se aprobaron dos leyes importantes en materia de recursos energéticos; la “Ley De Promoción Y Desarrollo De Los Bioenergéticos (DOF, 2008a)” publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 1 de Febrero del mismo año y la “Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (DOF, 2008b)” (última reforma publicada en el DOF el día 1° de junio del año 2011). Estas leyes recién vigentes van de la mano y se irán enfrentando a problemáticas de aceptación entre la sociedad, el sector público y privado, sufriendo reformas y en el peor caso, un cambio total de acuerdo a las necesidades cambiantes del país.

1.6 Problemática en plantas de biogás instaladas actualmente en México

Unos de los grandes problemas de México, es el desconocimiento relativo sobre la operación y la fabricación de plantas de biogás y en particular sobre los reactores anaerobios. Durante el desarrollo de los reactores anaerobios se han probado muchos tipos de construcciones, las cuales buscan mayor eficiencia en la producción con bajos costos de inversión. En tiempos recientes, las compañías junto con la sociedad, se han enfrentado a una diversidad de problemas para el desarrollo, diseño y hasta la implementación de este tipo de plantas, por los cuales hoy en día no se han resuelto la mayoría de ellos (Figura 1.5) (Solliclima, 2009).

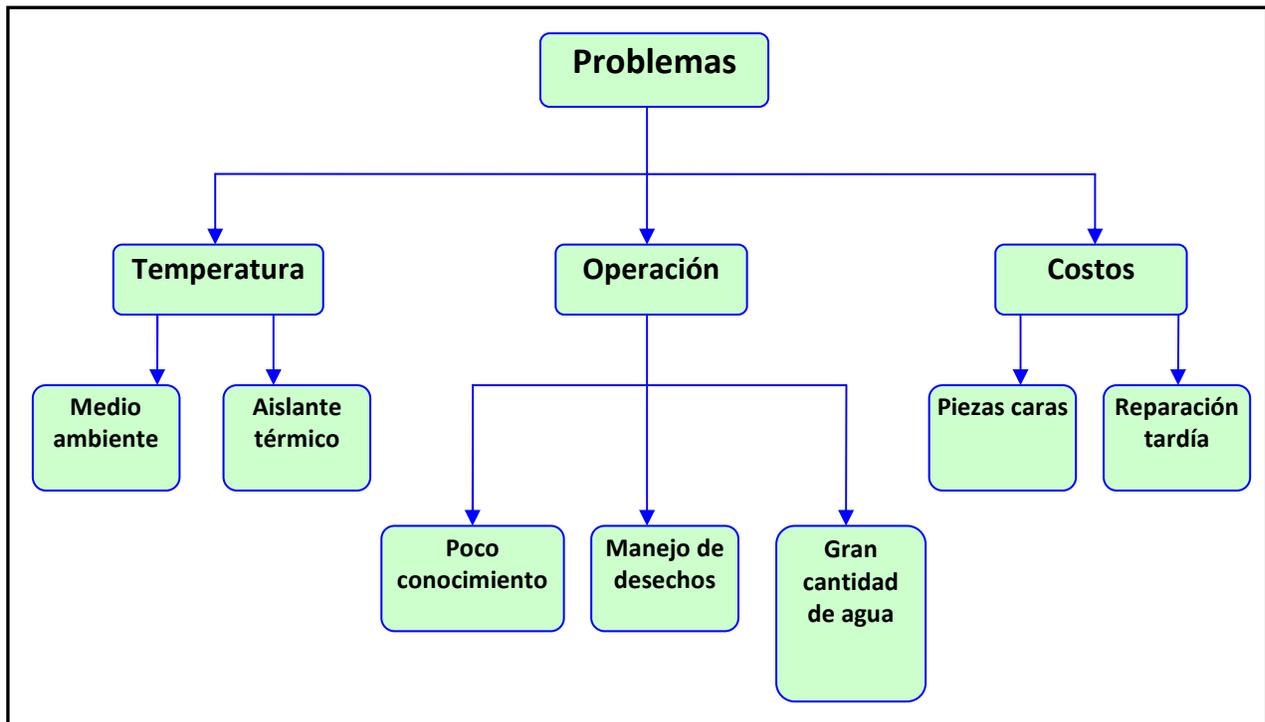


Figura 1.5 Problemas comunes de un reactor anaerobio (Soliclima, 2009)

A continuación se mencionarán algunos aspectos fundamentales por los cuales hacen parecer a los reactores anaerobios poco viables (Lugones, 2011):

- El uso de materiales o piezas que no están disponibles a nivel local, y que por tanto, será imposible un reemplazo inmediato
- El o los usuarios no tienen el suficiente conocimiento sobre el funcionamiento cuando se produzca algún problema
- Se necesita una enorme cantidad de agua para la preparación del sustrato
- Si no se tiene un correcto aislante térmico, provocará que dentro del reactor anaerobio la producción de biogás sea inestable, hasta al grado de no producir biogás
- La temperatura del medio ambiente es muy cambiante en cualquier situación climatológica

- El control del pH, es fundamental para la producción de biogás ya que se debe de mantener en condiciones ideales (neutro 7 pH), de no ser así, el reactor anaerobio operará de manera deficiente
- Se necesita acumular los desechos orgánicos cerca del reactor anaerobio, para su manipulación antes de ser introducidos
- Existe un riesgo de explosión en caso de no cumplirse las normas de seguridad para gases combustibles
- Resulta alto el costo por los materiales usados hoy en día

Por todo esto se debe seguir innovando o implementando alternativas económicas para un mayor beneficio, reduciendo así trabajo y costos.

Capítulo 2: Fundamentos

2.1 Energía renovable

La energía renovable o los energéticos renovables, son aquellos que pueden continuar existiendo mediante procesos de regeneración, siempre que éstos se realicen a una tasa mayor que la de consumo. Esto les permite continuar existiendo a pesar de ser “usados” por la humanidad. La leña puede ser no renovable si las formas de explotación reducen gravemente su disponibilidad o incluso la agotan, aunque, desde luego, este agotamiento es evitable (IILSEN, 2004). Con base en esta definición los siguientes recursos o tipos de energía renovable son los siguientes:

2.1.1 Biomasa

La biomasa se utiliza para producir bioenergía cuando los combustibles de ésta y de reciente origen biológico, son usados para fines energéticos. Los productos secundarios en estado sólido, líquido y gaseoso son a menudo utilizados como portadores de energía y más tarde empleados para proveer calor o electricidad y se conocen como biocombustibles. Los biocombustibles se refieren específicamente a los combustibles obtenidos de la biomasa. Las especies anuales y perennes que son cultivadas específicamente para la producción de materiales energéticos son denominadas “plantaciones energéticas” (IILSEN, 2004).

El estiércol de cerdo, los desechos de pollo y de otros tipos de ganado, son fuentes útiles de bioenergía, pues estos animales a menudo son criados en áreas confinadas, las cuales producen una considerable concentración de materia orgánica. El potencial de la bioenergía obtenida, es tan significativo que la Unión Europea lo ha identificado como una contribución importante para alcanzar su objetivo del 12% de la producción total de energía mediante fuentes renovables. Así como la meta ambiciosa de reemplazar por biocombustibles el 20% de los combustibles usados en el transporte para el año 2020 (IILSEN, 2004).

2.1.2 Energía solar

La energía solar es la radiación de ondas electromagnéticas que se recibe desde el Sol (IILSEN, 2004). Esta energía se puede transformar en electricidad o en calor para ser aprovechada por los seres humanos. La energía solar de cierta forma es un recurso intermitente, su intensidad

varía en el transcurso del día debido a la rotación de la Tierra sobre su eje en 24 horas y también a lo largo del año debido a la traslación de la Tierra alrededor del Sol aproximadamente en 365 días.

En México, esta energía se puede aprovechar casi en todo el país y de mejor manera en la parte norte y centro del país que en la parte sur, pues esta energía no llega a todo el país con la misma intensidad y ni mucho menos a todo el planeta. La Figura 2.1 muestra a todo el planeta y lo divide en 6 zonas de insolación, se ve que casi todo México se encuentra en la segunda zona de mayor radiación.

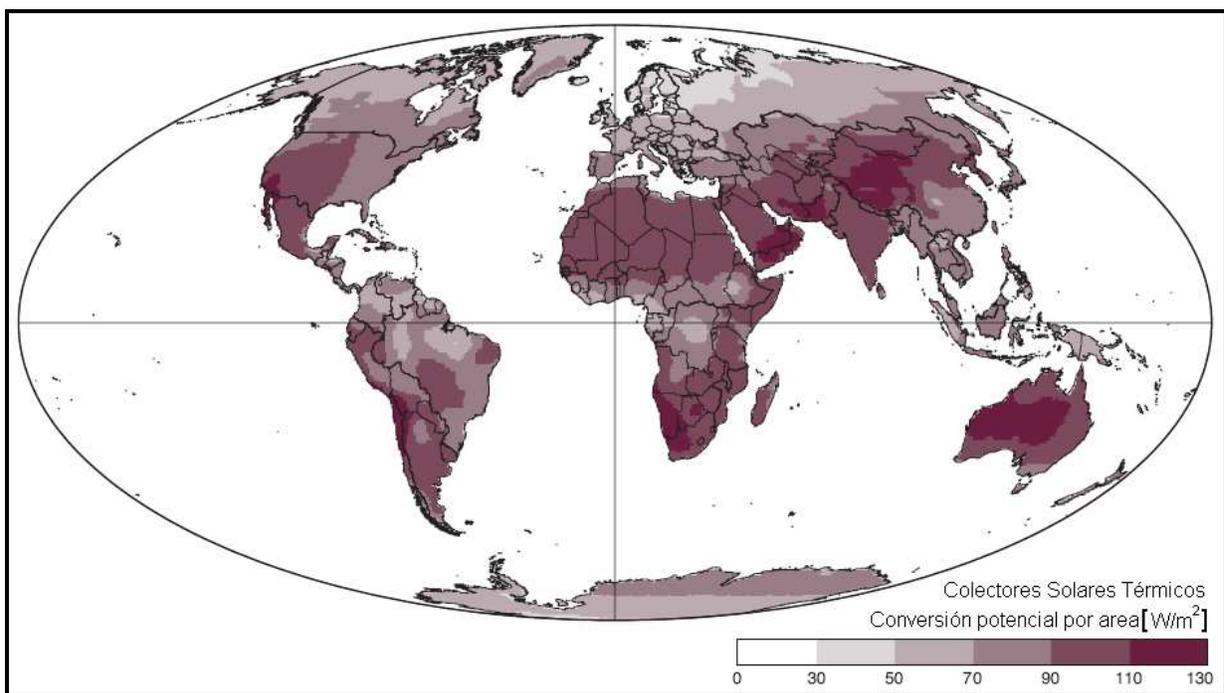


Figura 2.1 Distribución global del potencial de conversión térmico solar mediante colectores solares (Hartmut y col., 2003)

2.1.3 Energía eólica

La energía eólica es aquella que se obtiene al aprovechar la energía cinética del viento. Es una fuente de energía renovable pues el viento resulta de una distribución desigual de presión en la atmósfera producto del calentamiento no uniforme de ésta y de la superficie terrestre debido a la radiación solar. En pocas palabras, existirá el viento mientras exista el sol (Alcalá, 2009). La energía eólica es intermitente debido a la dependencia de la radiación solar y a las diferencias de presión a lo largo de todo el planeta. Para aprovechar la energía del viento y convertirla en energía eléctrica, es necesario que su intensidad tenga pocas variaciones y sea la adecuada

para el generador. Se considera que sólo los vientos con velocidades entre 18 y 45 kilómetros por hora (km/h) son aprovechables. En México existen en la actualidad 170 MW de capacidad eólica en operación, divididos en:

- 85 MW en los proyectos La Venta I y La Venta II operados por la CFE en el Istmo de Tehuantepec
- 80 MW en el proyecto de autoabastecimiento Parques Ecológicos de México
- 0.6 MW en una turbina de la CFE en Guerrero Negro, Baja California Sur.
- 2 MW en pequeños aerogeneradores en sitios aislados de la red
- 3 MW en pequeñas turbinas eólicas que impulsan bombas hidráulicas (aerobombas)

La energía eólica se ha desarrollado a pasos acelerados en el Mundo durante los últimos años. En el año 2008, la capacidad instalada mundial llegó a los 120,800 MW (Alatorre, 2009). En la Figura 2.2 se observa un mapa donde se ilustra el potencial mundial de energía eólica.

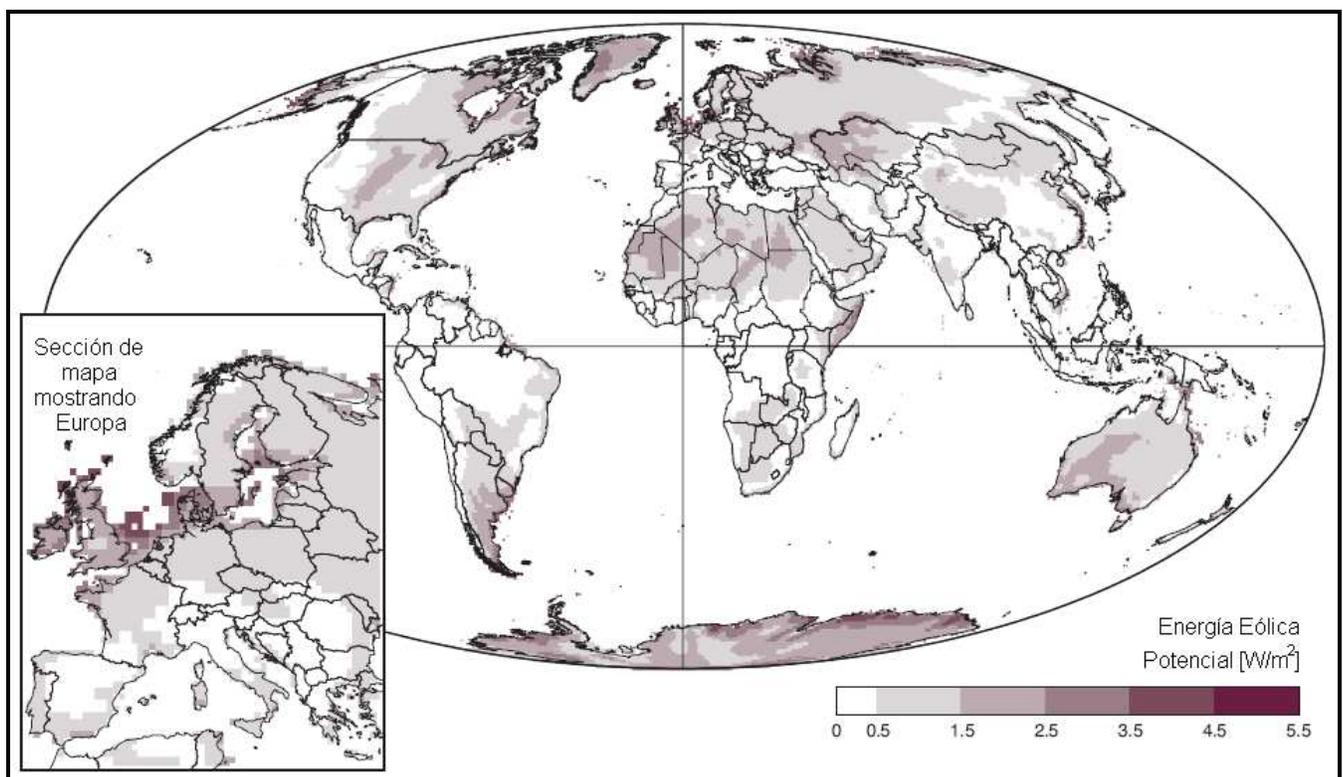


Figura 2.2 Distribución global del potencial de conversión de la energía del viento tanto en la superficie marina como en la terrestre (Hartmut y col., 2003)

2.1.4 Energía hidráulica

La energía hidráulica es la obtenida del aprovechamiento de la energía cinética y potencial del agua proveniente en su mayoría de presas, ríos y caudales de agua. En su mayoría la energía hidráulica es convertida en energía eléctrica mediante el uso de turbinas hidráulicas en plantas hidroeléctricas.

Las centrales hidroeléctricas constan, por lo general, de una presa que permite almacenar el agua de una estación a otra. Sin embargo, existen también pequeñas centrales hidroeléctricas sin presa, denominadas “al hilo del agua”, que aprovechan en cada momento el caudal disponible (Alatorre, 2009). Las grandes presas generan beneficios indudables para los sistemas eléctricos, además de otros beneficios como el riego y el control de inundaciones. Existe en el Mundo una capacidad hidroeléctrica instalada de 860 GW. En México la capacidad hidroeléctrica instalada es de 11.4 GW, de los cuales aproximadamente 300 MW corresponden a pequeñas centrales de las empresas públicas, y 90 MW a centrales privadas de autoabastecimiento. La generación es de 27,300 GWh/año y en la Prospectiva del Sector Eléctrico Mexicano 2010-2025, se contempla la construcción de nuevas centrales hidroeléctricas con una capacidad de 1,224 MW en el transcurso de los próximos 10 años (Alatorre, 2009).

2.1.5 Energía geotérmica

La energía geotérmica es la proveniente del núcleo de la Tierra en forma de calor, que se desplaza hacia arriba en el magma que fluye a través de fisuras en rocas y que alcanza niveles cercanos a la superficie, donde existen condiciones geológicas favorables para su acumulación. Este tipo de yacimiento está asociado a fenómenos volcánicos y sísmicos, cuyo origen común son los movimientos profundos que ocurren continuamente entre los límites de las placas (SENER, 2007).

La generación de electricidad por medio de la energía geotérmica y la estimación del potencial aprovechable, están íntimamente ligados con las condiciones naturales del yacimiento geotérmico utilizado para ese fin. La Comisión Federal de Electricidad estima que el potencial geotérmico en México es de 1,395 MW (CFE, 2008). Sin embargo, el sector académico calcula que dicho potencial pudiera ser mucho mayor. A nivel nacional se cuenta con 964.5 MW de capacidad instalada de energía geotérmica.

2.1.6 Energía oceánica

La energía del océano se manifiesta como energía mecánica. La energía mecánica se presenta en forma de mareas y olas, la energía de las olas es función directa de la cantidad de agua desplazada del nivel medio del mar que a su vez depende de la velocidad del viento y el tiempo que está en contacto con él (IILSEN, 2004).

Las mareas se forman de la atracción gravitacional del Sol y la Luna, y de la rotación de la Tierra. La energía de las mareas se deriva de la energía cinética del agua moviéndose de una localización más alta a una más baja. Al agua de las mareas se le suele embalsar y para convertirla en electricidad se le deja salir a través de turbinas que activan a un generador eléctrico. Actualmente, la planta maremotriz de mayor capacidad se encuentra en La Rance al norte de Francia, la cual tiene 240 MW instalados.

2.1.7 Energía del hidrógeno

El hidrógeno es el elemento químico gaseoso más abundante en el Universo, al quemarse sólo produce energía y agua por lo que es el combustible más limpio que existe. Sin embargo, no se le utiliza como tal, por el contrario tiene varios usos no energéticos en la industria y se emplea de esta manera en grandes cantidades. El uso no energético de hidrógeno que se consume actualmente es alrededor de la quinta parte del consumo actual de gas natural mundial y se le obtiene a partir de la reformación de hidrocarburos fósiles (ILSEN, 2004).

El hidrógeno es un portador de energía ya que puede producirse fácilmente a partir de la disociación del agua en electrolizadores y puede servir para almacenar energía, es fácilmente transportable y si es producido con fuentes renovables de energía tiene el potencial de formar un sistema energético prácticamente sin emisiones contaminantes. Puede ser utilizado para generar electricidad directamente mediante la tecnología de celdas de combustible, en éstas, el hidrógeno se une con los iones hidroxilo en el ánodo para crear agua, liberando electrones que hacen el trabajo. En el cátodo, el oxígeno reacciona con el agua del electrolito y los electrones del circuito externo para formar iones hidroxilo donde el hidrógeno se reduce químicamente en presencia de oxígeno produciendo una corriente eléctrica y agua.

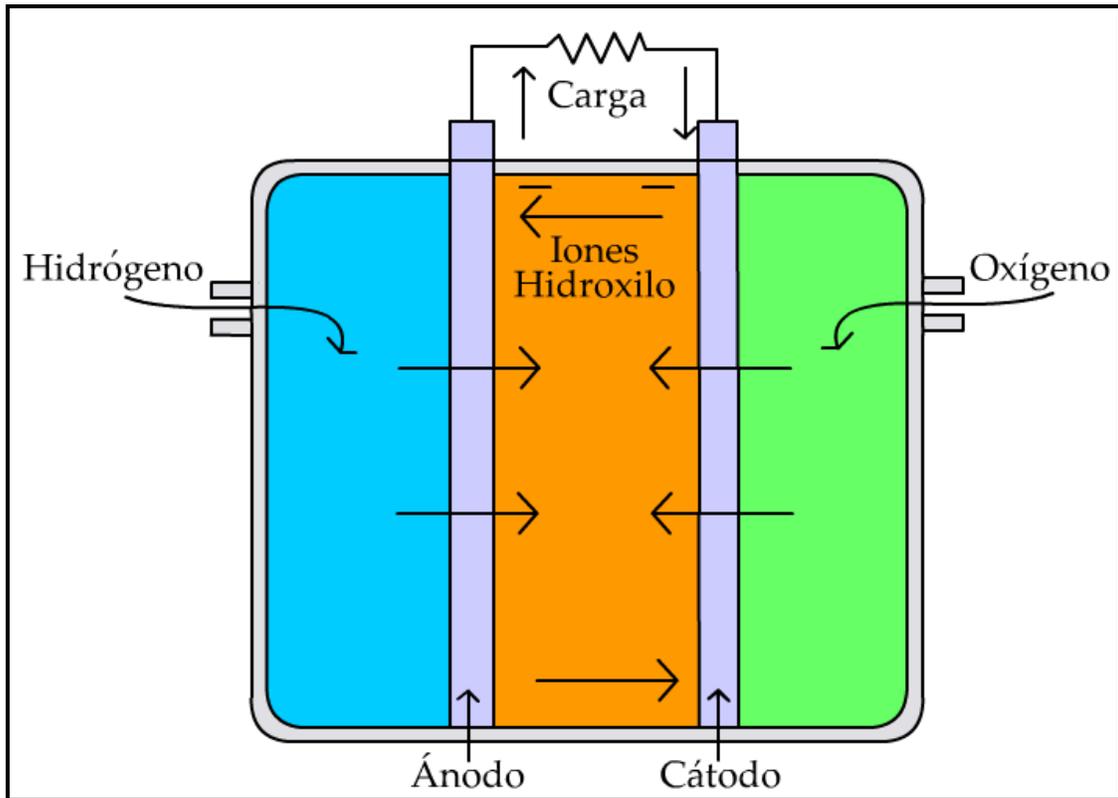


Figura 2.3 Principio de funcionamiento de una celda de combustible de hidrógeno-oxígeno (PUC, 2011)

2.2 Biogás

El biogás es producido por bacterias en el proceso de biodegradación de material orgánico en condiciones anaerobias, es decir, sin oxígeno. Es una mezcla de gases en donde predomina el metano y el dióxido de carbono. El metano, que es el último eslabón de este proceso, es un gas inflamable. (SAGARPA, 2007b). En las Tablas 2.1 y 2.2, se muestran los porcentajes de gas obtenidos en la degradación anaerobia.

Tabla 2.1 Composición del biogás (SAGARPA, 2007b)

Composición del biogás	%
Metano (CH ₄)	55 – 70
Dióxido de Carbono (CO ₂)	35 – 40
Hidrógeno (H ₂)	1-3
Nitrógeno (N ₂)	0.5 – 3
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	0.1
Vapor de agua	Trazas

Tabla 2.2 Propiedades químicas del biogás (Castro, 2011b)

Metano (CH ₄)	40 al 70%	95% en gas natural
CO ₂	25 al 55%	1% en gas natural
CO	0 al 5%	
O ₂	0 al 2%	
H ₂ O	0 al 10%	
H ₂ S	0 al 1%	
Amoníaco	0 al 1%	
Trazas		4% en gas natural
Densidad	1.2 kg/m ³	
Poder calorífico	4 a 7.5 kW-h/m ³	5,400 Kcal/m ³ en gas natural
Temperatura de ignición	700 °C	

La producción de biogás se puede generar por medios naturales o se implementan en dispositivos llamados reactores anaerobios. Los residuos orgánicos que se utilizan son variados y dependen de las características y tipo de la materia orgánica, así como de la cantidad de la misma. Están constituidos por carbohidratos, lípidos y proteínas en diferentes proporciones (Tabla 2.3), por lo que la cantidad obtenida de biogás será variable.

Tabla 2.3 Producción específica del biogás (Sánchez, 2003)

Residuo orgánico	Producción específica de biogás (L/kg _{biomasa})	Contenido proporcional en el biogás (%)	
		CH ₄	CO ₂
Carbohidratos	790	50	50
Lípidos	1,25	68	32
Proteínas	700	71	29

Generalmente, el biogás puede ser obtenido de:

- **Residuos forestales.**- Restos de plantaciones (ramas, cortezas, raíces)
- **Residuos agropecuarios.**- Cáscara y pulpa de frutas y vegetales, estiércol, residuos de cosechas (tallos, hojas, cáscaras, maleza, pastura)
- **Residuos agro-industriales.**- Pulpa y cáscaras, residuos de procesamientos de carnes, aguas de lavado y precocido de carnes, grasas y aceites vegetales
- **Residuos urbanos.**- Aguas negras, desechos domésticos orgánicos, basura orgánica (plantas)

La composición del biogás (Tabla 2.4) obtenido a partir de los excrementos de animales, está constituido por metano (CH₄) en una proporción que oscila entre un 50% a un 70% y dióxido de carbono (CO₂) principalmente. Aunque puede contener trazas de otros gases como hidrógeno (H₂), nitrógeno (N₂), oxígeno (O₂) y sulfuro de hidrógeno (H₂S). Por tanto, es necesaria la limpieza del combustible, dependiendo del uso final. El valor energético del biogás estará determinado por la concentración de metano.

Tabla 2.4 Composición de biogás producido por estiércol (Burgos, 2010)

Compuesto	%
CH ₄	50-70
CO ₂	30-50
H ₂ S	1
H ₂	2

Debido a su alto contenido en metano, el biogás tiene un poder calorífico de más de la mitad que el del gas natural. Una concentración de **metano** al **60%** en el biogás, tiene un poder calorífico de unas 5.500 kcal/m³ (6,4 kWh/m³) (IDAE, 2007). El poder calorífico del biogás depende de la concentración de metano y puede variar de 4,500 hasta 7,500 kcal/m³; si ésta es baja o alta respectivamente.

El biogás puede ser equivalente al diésel, gas propano, gas butano, carbón dependiendo las aplicaciones en las que se utilice (Tabla 2.5).

Tabla 2.5 Algunas equivalencias del biogás con otros combustibles (Castro, 2011b)

1 m ³ de biogás	0.66L diesel
	0.25 m ³ gas propano
	0.2 m ³ gas butano
	0.85 kg carbón
	Corresponde a 6.5 Kw/h de energía. Si se convierte en corriente eléctrica, se obtiene entre 1,8 y 2,5 kW _e de energía eléctrica y el resto se convierte en calor.

El biogás tiene distintas aplicaciones y alternativas de uso, las cuales pueden ser las siguientes:

- Quemarlo en una caldera para generación de calor o electricidad
- Quemarlo en motores o turbinas para generar electricidad

- Purificarlo y añadir los aditivos necesarios para introducirlo en una red de transporte de gas natural
- Usarlo como material base para la síntesis de productos de elevado valor añadido como es el metanol
- Usarlo como combustible de automoción (IDAE, 2007)

En la Figura 2.4 se muestra mejor su aplicación y derivados.

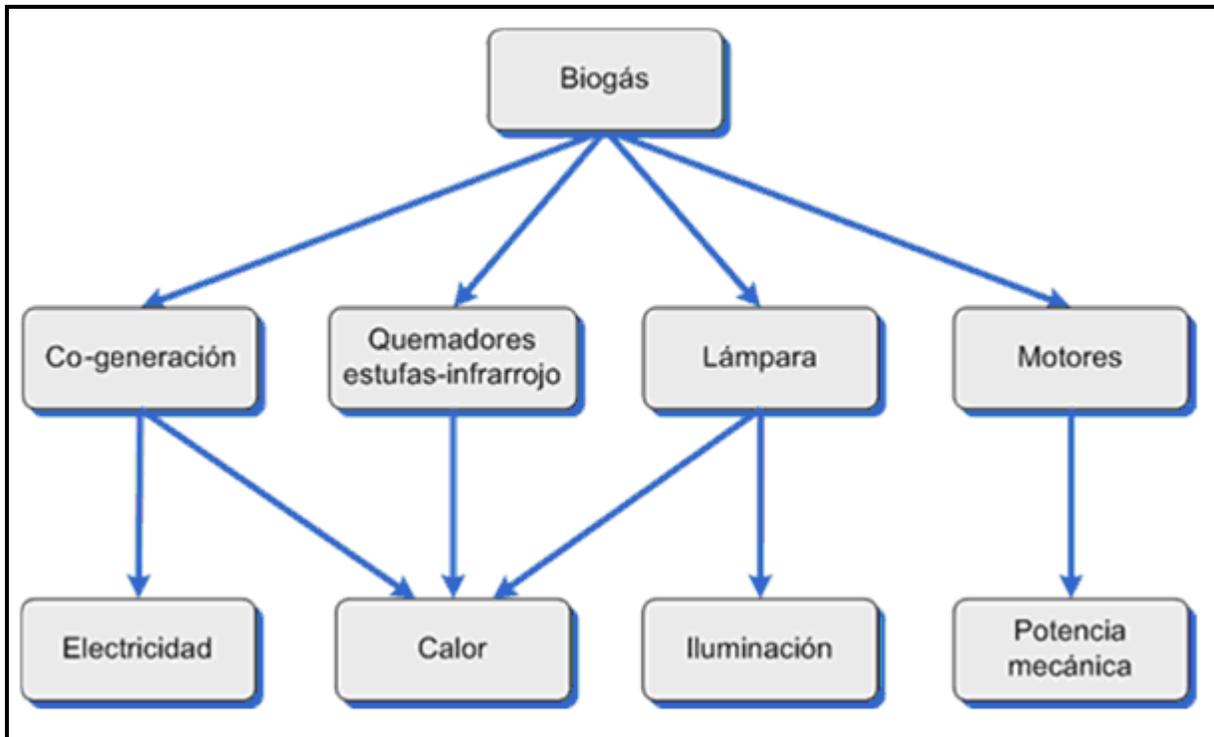


Figura 2.4 Varios usos del biogás (TEXC, 2011)

Dentro de las principales motivaciones para el consumo de biogás destacan:

- Su aprovechamiento directo para iluminación y uso directo para la cocción de alimentos.
- Su uso para la quema directa, mediante convenios con empresas dedicadas a la comercialización de los denominados “bonos de carbono”, mediante el desarrollo de proyectos bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) a partir del estiércol.
- Su aprovechamiento para la generación de energía eléctrica y calórica en unidades productivas, tales como granjas porcinas, establos lecheros y rastros.

Otro aspecto, es que estas unidades productivas tienen la posibilidad de asociarse con empresas que comercializan bonos de carbono, con lo que pueden obtener ingresos por la quema de biogás (SAGARPA, 2007a).

2.3 Degradación anaerobia

La degradación anaerobia o metanogénesis, es el proceso biológico mediante el cual la materia orgánica, susceptible de ser biodegradada, es transformada por la actividad metabólica bacteriana en ausencia de oxígeno libre, obteniéndose como productos finales: metano y dióxido de carbono y algunos otros gases en menor cantidad (Mejía, 1996). Al producto gaseoso de la degradación anaerobia se le conoce como biogás.

La degradación anaerobia puede aplicarse a desechos ganaderos, residuos agrícolas, así como a los residuos de las industrias de transformación de dichos productos. Entre los residuos se pueden citar, estiércol, excedentes de cosechas, etc. También, la degradación anaerobia es un proceso adecuado para el tratamiento de aguas residuales con alta carga orgánica, como las producidas en muchas industrias alimenticias. Los beneficios asociados a la degradación anaerobia son:

- Reducción significativa de malos olores
- Mineralización
- Producción de energía renovable si el gas se aprovecha para convertirlo en energía y así se sustituye a una fuente de energía fósil

Las variables que influyen en el proceso son las siguientes (Mejía, 1996):

- Temperatura: A 35°C la temperatura es ideal, si ha y demasiadas fluctuaciones en la temperatura, las bacterias encargadas del proceso puede ser dañadas severamente
- Acidez: El medio donde se encuentran las bacterias tiene que tender a neutro, pH entre 6.6 y 7.6. Dependiendo de la variación de pH se ve afectada la producción de biogás
- Nutrientes: Para que las bacterias encargadas de la metanogénesis crezcan y se reproduzcan, se requiere de carbono, nitrógeno, fósforo, azufre y algunas sales minerales

- Inhibición: La presencia de oxígeno, concentraciones elevadas de amoníaco, sales minerales y algunas sustancias orgánicas como detergentes y pesticidas pueden causar que el proceso se detenga

2.4 Tipos de reactores anaerobios utilizados para el tratamiento de desechos pecuarios

Un reactor anaerobio es, en su forma más simple, un contenedor cerrado, hermético e impermeable, dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar (excrementos de animales y humanos, desechos vegetales, etcétera) en determinada dilución de agua para que se descomponga, produciendo biogás y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio (SAGARPA, 2011a).

Existen varios tipos de reactores anaerobios y la utilización de uno u otro depende de las necesidades y las condiciones de trabajo que se tengan en el lugar donde se va a construir. Algunos tipos de reactores anaerobios pueden ser: el modelo chino, indio, Sri Lanka, de auto mezclado, de tipo laguna y de flujo tapón o “salchicha”.

2.4.1 Reactor anaerobio tipo chino

El reactor anaerobio tipo chino fue desarrollado para adaptarse a las necesidades de China, ya que su problema no era energético sino sanitario. Con el reactor anaerobio se eliminan los malos olores y se obtiene gas para cocinas y alumbrado. El reactor anaerobio chino funciona con presión variable ya que su objetivo no es producir gas sino abono orgánico ya procesado (SAGARPA, 2011b).

El diseño del tipo chino utiliza para el almacenamiento del biogás una cúpula fija unida al tanque de almacenamiento, que puede ser construida de tabiques, piedra o cemento. La cima y fondos son semiesféricos y son unidos por lados rectos. La superficie interior es sellada por muchas capas delgadas de mortero para hacerlo firme. La tubería de la entrada es recta y de extremos nivelados. Hay un tapón de la inspección a la cima del reactor anaerobio que facilita el limpiado. Se guarda el gas producido durante la digestión bajo el domo (Figura 2.5)(Mirez, 2011).

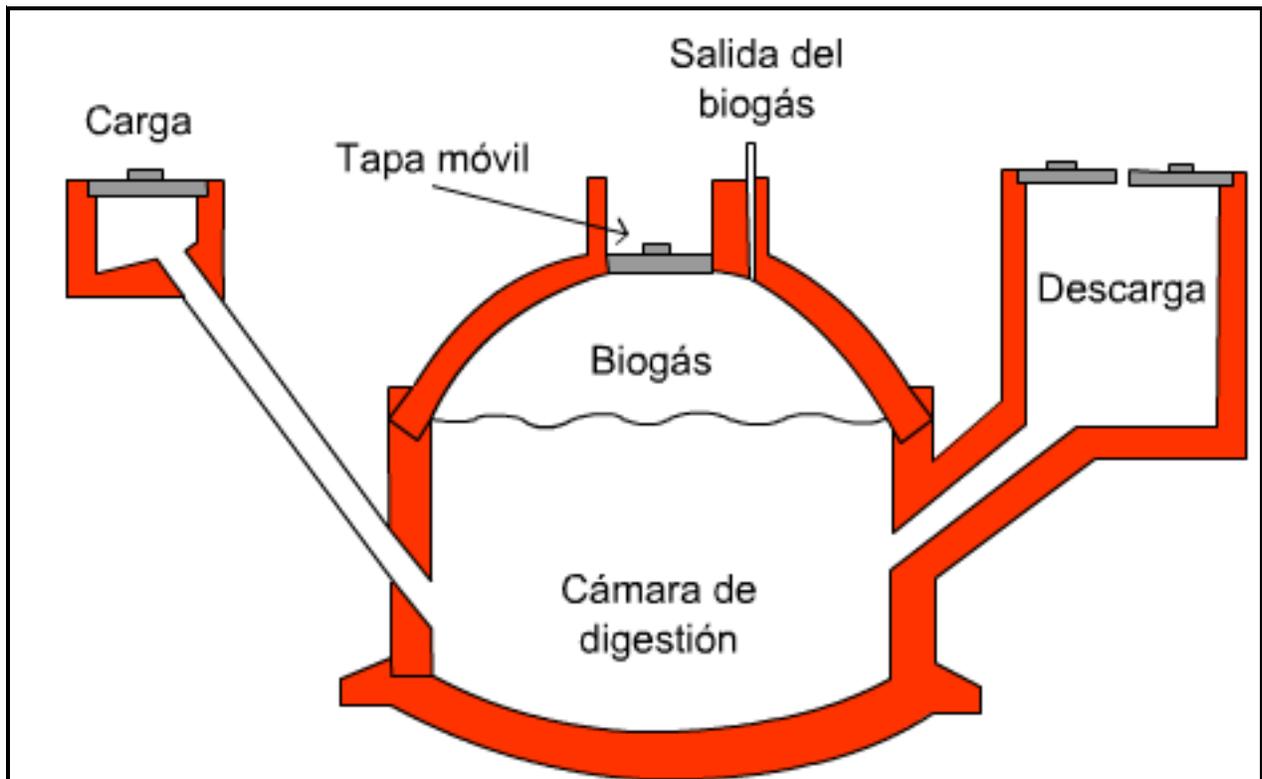


Figura 2.5 Composición de un reactor anaerobio de tipo chino (Mirez, 2011)

2.4.2 Reactor anaerobio tipo Indio

Fue desarrollado en la India después de la segunda guerra mundial. Este reactor anaerobio trabaja a presión constante y es de fácil operación ya que fue ideado para ser manejado en regiones de alta marginación (SAGARPA, 2011c).

Este reactor anaerobio, está constituido básicamente por una cámara hermética vertical donde ocurre la digestión anaerobia y de 2 cajas conectadas por tubos a esta, la caja de carga de materia orgánica y la caja de descarga de materia orgánica ya procesada. Al igual que el modelo chino, puede ser construido de cemento, ladrillos o piedras (Figura 2.6) (Mirez, 2011).

Lo que caracteriza a este modelo de reactor anaerobio, es el uso de un domo flotante que es un tanque de almacenamiento en forma cilíndrica que asciende al aumentar la presión del gas que se encuentra adentro. Originalmente fue hecho de acero pero después reemplazado por fibra de vidrio reforzado en plástico para superar el problema de corrosión (Martínez, 2008).

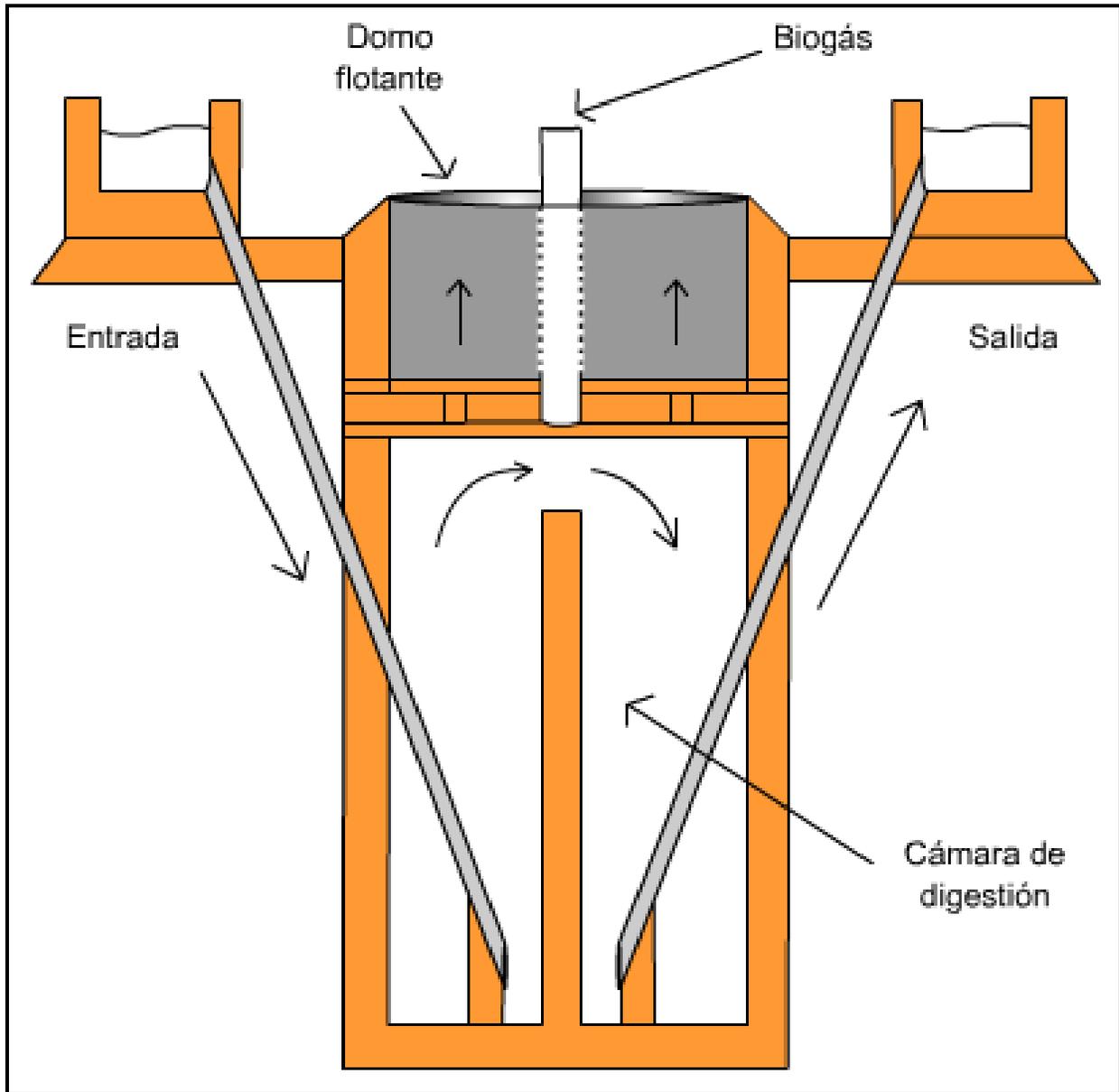


Figura 2.6 Reactor anaerobio tipo indio (Mirez, 2011)

2.4.3 Reactor anaerobio de tipo Sri Lanka

Este reactor es un novedoso sistema desarrollado por el Instituto Nacional de Investigación e Ingeniería de Sri Lanka. La cámara de digestión puede ser construida por ladrillos y cemento y la materia orgánica es vertida removiendo únicamente la tapa de ésta cámara. Tiene una cámara continua y está separada de la cámara de digestión y conectada únicamente por tuberías de gas, ésta tiene una capacidad de 45 galones y está diseñada para ser construida al más bajo costo del mercado. Al igual que el modelo indio, este reactor consta con un domo flotante donde se almacena el biogás (SCTD, 2011) (Figura 2.7).

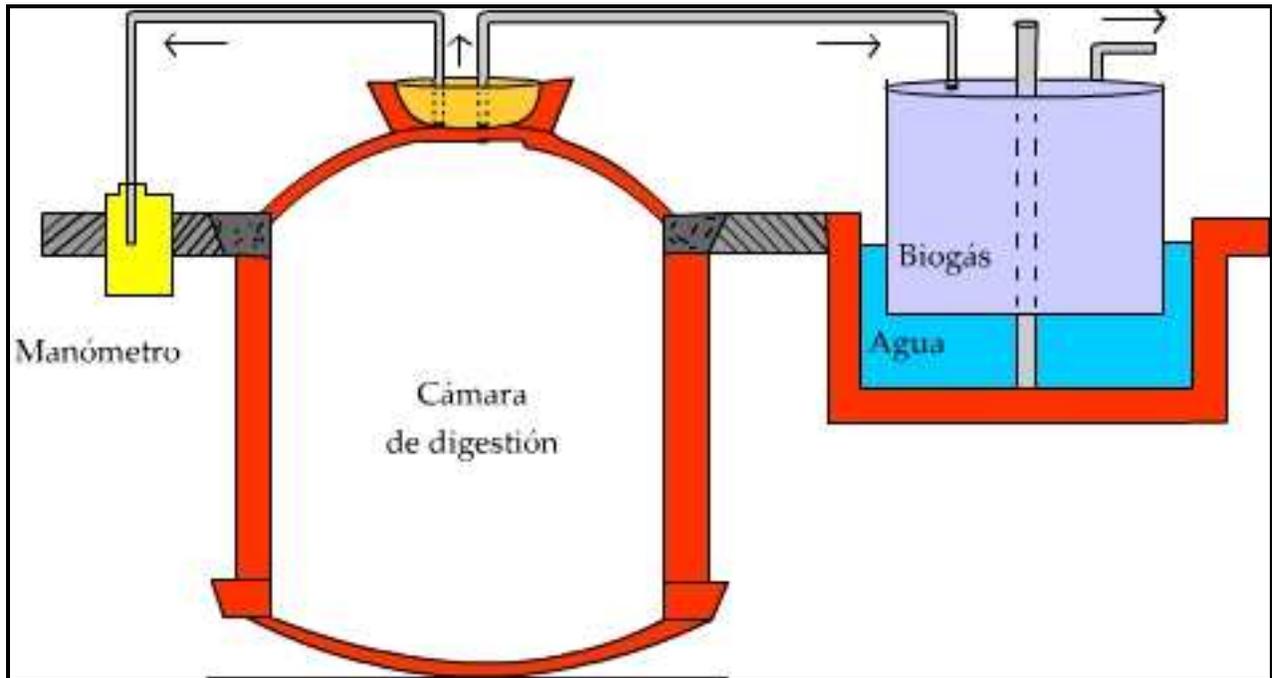


Figura 2.7 Estructura del reactor anaerobio tipo Sri Lanka (SCTD, 2011)

Algunas características de este reactor anaerobio son:

- Cuando el reactor está lleno, se puede obtener biogás de 5 a 6 meses
- No es necesario introducir materia orgánica diariamente
- Puede usarse para tratar los desechos de algunas fábricas

2.4.4 Reactor anaerobio tipo laguna

Este tipo de reactor, tiene la ventaja de hacerse con mayores profundidades lo que reduce el área para el proyecto de digestión. Se realiza una laguna con las dimensiones adecuadas y luego se hace un cubrimiento de la misma utilizando Polietileno de Alta Densidad (PEAD). Luego se coloca la cubierta, que puede ser PVC reforzado. Algunas ventajas de usar reactores tipo laguna (Figura 2.8) comparado con otros tipos (chino, indio o Sri Lanka) son las siguientes (Agenieria, 2011):

- Menor costo de inversión tomando en cuenta la cantidad de materia a tratar
- Fáciles de construir
- Las lagunas pequeñas y profundas son mucho más flexibles, ya que permiten establecer distintos tipos de circulación y modificar los tiempos de tratamiento si se detectan anomalías en su funcionamiento.



Figura 2.8 Vista de un reactor anaerobio de tipo laguna (Agenieria, 2011)

2.4.5 Reactor anaerobio de flujo tapón o “salchicha”

Este reactor anaerobio es una gran bolsa de polietileno encima de una fosa o surco (Figura 2.9) y se caracteriza por ser más económico y fácil de construir en comparación con los modelos mencionados anteriormente. Las fosas o surcos en donde se construye son de poca profundidad y generalmente, lo largo es varias veces mucho más grande que lo ancho y de esto se deriva que su forma sea alargada. Las secciones transversales del surco o fosa pueden ser circulares, cuadradas o en forma de trapecio (SAGARPA, 2011c).

Su forma de operación es parecida a los demás reactores anaerobios, se ingresa cierta cantidad de materia orgánica por un extremo y por el otro se obtiene la misma cantidad pero ya tratada orgánicamente. Las condiciones ideales para este reactor, implican que las proporciones líquidas, sólidas y de microorganismos entren y salgan del reactor en tiempos semejantes.

La razón más común para la utilización de este reactor anaerobio es el volumen a tratar y se recomienda que éste sea mayor a 15 m^3 . Por otro lado, en este reactor anaerobio, el gas se acumula en la parte superior de la bolsa y ésta se va inflando lentamente con una presión de operación baja, pues no se puede exceder la presión de trabajo de la misma (SAGARPA, 2011c).

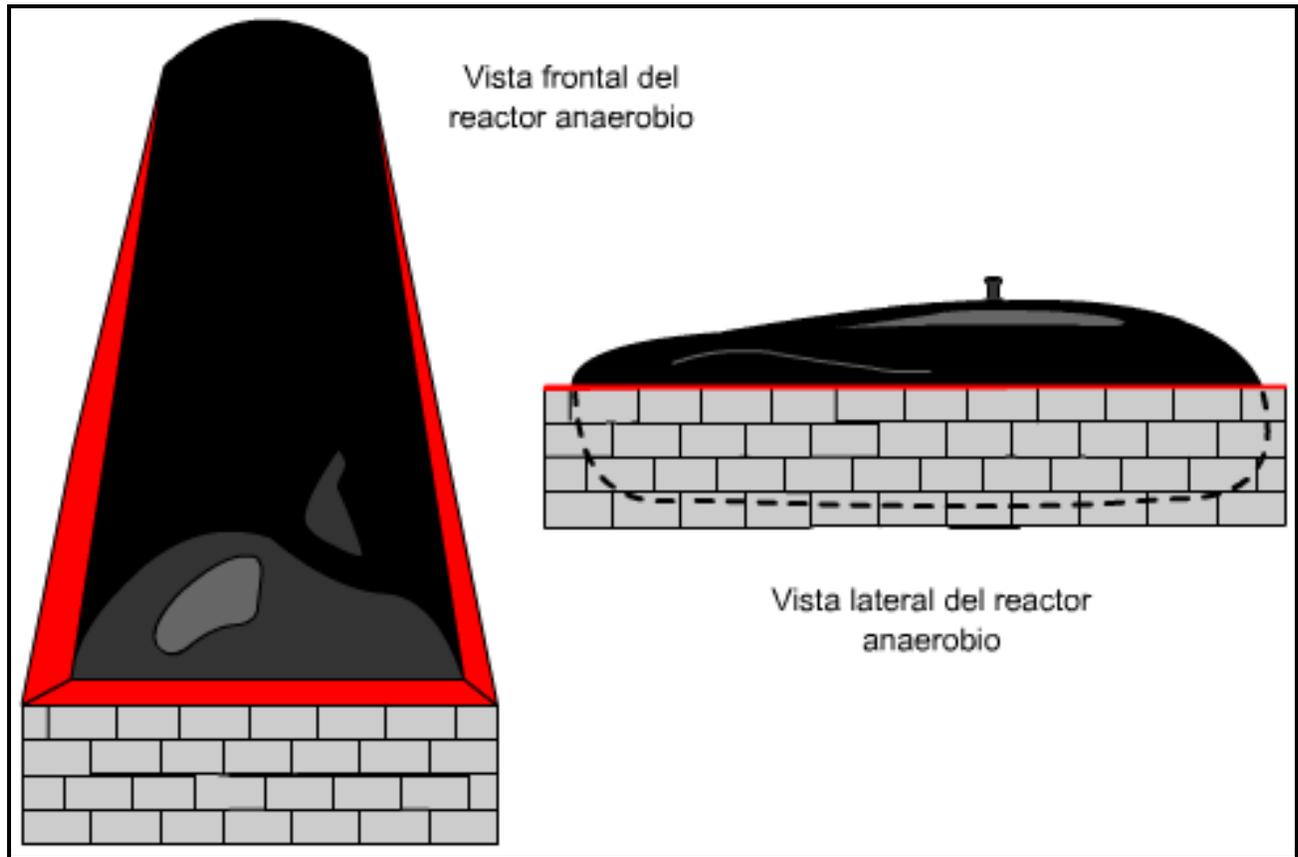


Figura 2.9 Reactor tipo “salchicha” (SAGARPA, 2011c)

2.4.6 Reactor de auto mezclado

El reactor de auto mezclado (RAM), conocido como Reactor-SMD, por sus siglas en inglés (Self Mixing Digester); es un reactor con un volumen máximo 2,400 m³ el cual consiste en dos tanques cilíndricos verticales, uno dentro del otro, sin mezcladores (Figura 2.10). La única pieza móvil es la válvula de gas, situada en el tubo que conecta las dos cámaras. La mayoría de las plantas convencionales de biogás trabajan con diferentes tipos de agitadores en las cámaras de fermentación, los cuales consumen energía adicional y requieren de un mantenimiento regular. En el RAM no hay mezcladores y generalmente consta de 3 etapas (AGROE, 2011):

Etapa no operativa:

En la etapa no operativa la válvula de gas, situada en el tubo de diámetro ancho, que conecta las cámaras principal y secundaria, está abierta. Esto permite equilibrar el nivel del fluido entre las dos cámaras

Período de compresión:

Durante la operación la válvula de gas es cerrada. El biogás producido no puede escapar; en su lugar es comprimido y presionado hacia abajo en la columna de la cámara principal. El substrato desplazado es dirigido hacia la cámara secundaria a través de los cuatro a ocho jets estáticos de mezcla, situados en la parte inferior del reactor.

- Aproximadamente de 110m³ de substrato es desplazado
- Hasta 450 hPa de presión en la cámara principal
- Los niveles de fluido entre la cámara principal y secundaria tienen aproximadamente 4.5 metros de diferencia

Período de reposo (AGROE, 2011):

Cuando la diferencia de presión (450 hPa) entre la cámara principal y la secundaria es alcanzada; el conocido: “Estado de reposo” empieza. Esto significa, que el substrato digerido (conocido también como efluente) que rebasa el límite superior de la cámara secundaria, es drenado hacia afuera del tanque. El efluente es expulsado a través de un tubo hacia el siguiente fermentador o tanque de almacenamiento (laguna). Al final del período de descanso, la válvula de gas es abierta por medio de un control neumático. En fracción de segundos el equilibrio de presión es alcanzado para dar paso a un gran cráter formado en la superficie del fermento en la cámara secundaria. Esto destruye la escoria superficial. En los siguientes cinco a diez segundos el fermento es expulsado contracorriente afuera de la cámara secundaria hacia la cámara principal. El substrato fluirá en tres distintas direcciones al mismo tiempo:

- *Flujo de substrato a través de las columnas pequeñas de mezclado:* Material digerido con una gran proporción de bacterias hambrientas es rociado energéticamente dentro del material fresco (sin digestión) en la cámara principal, a través de las columnas cortas de mezclado.

- *Flujo de substrato a través de los jets estáticos de mezclado:* Al mismo tiempo, el material es forzado hacia la cámara principal a través de los jets estáticos de mezcla. El sedimento de esta biomasa es enviado hacia adentro del fermento activo (aproximadamente: 50-75m³ en cinco segundos, a través de las cuatro a ocho boquillas de los jets). Dada la gran cantidad de energía liberada, la columna de fluido en la cámara principal comienza a rotar. Esta rotación facilita el esparcimiento de cada centímetro cúbico de la superficie superior de la cámara principal con el substrato recibido de la cámara secundaria, que llega a través de las columnas pequeñas y

largas de mezclado. En consecuencia, la superficie de escoria es destruida y reprocesada dentro del fermento (AGROE, 2011).

- *Flujo de substrato a través de las columnas largas de mezclado:* En las capas de lodos sedimentadas de la unidad de biogás, existe una gran concentración de bacterias hambrientas, dado el poco suministro de nutrientes. Parte de este material es enviado contracorriente de regreso a la parte superior del substrato en la cámara principal, a través de las columnas largas de mezclado y es combinado con el material sin digestión. Este suministro adicional de nutrientes causa una rápida multiplicación en la cantidad de bacterias. De esta manera, puede ser alcanzada una máxima producción de biogás en un corto período de tiempo.

La duración de tiempo desde un intervalo de mezclado y el siguiente, depende de la materia prima utilizada. Usualmente, varía entre una a dos horas, dependiendo de la digestibilidad del substrato. Materia prima con alto contenido energético producirá intervalos de mezcla más cortos.

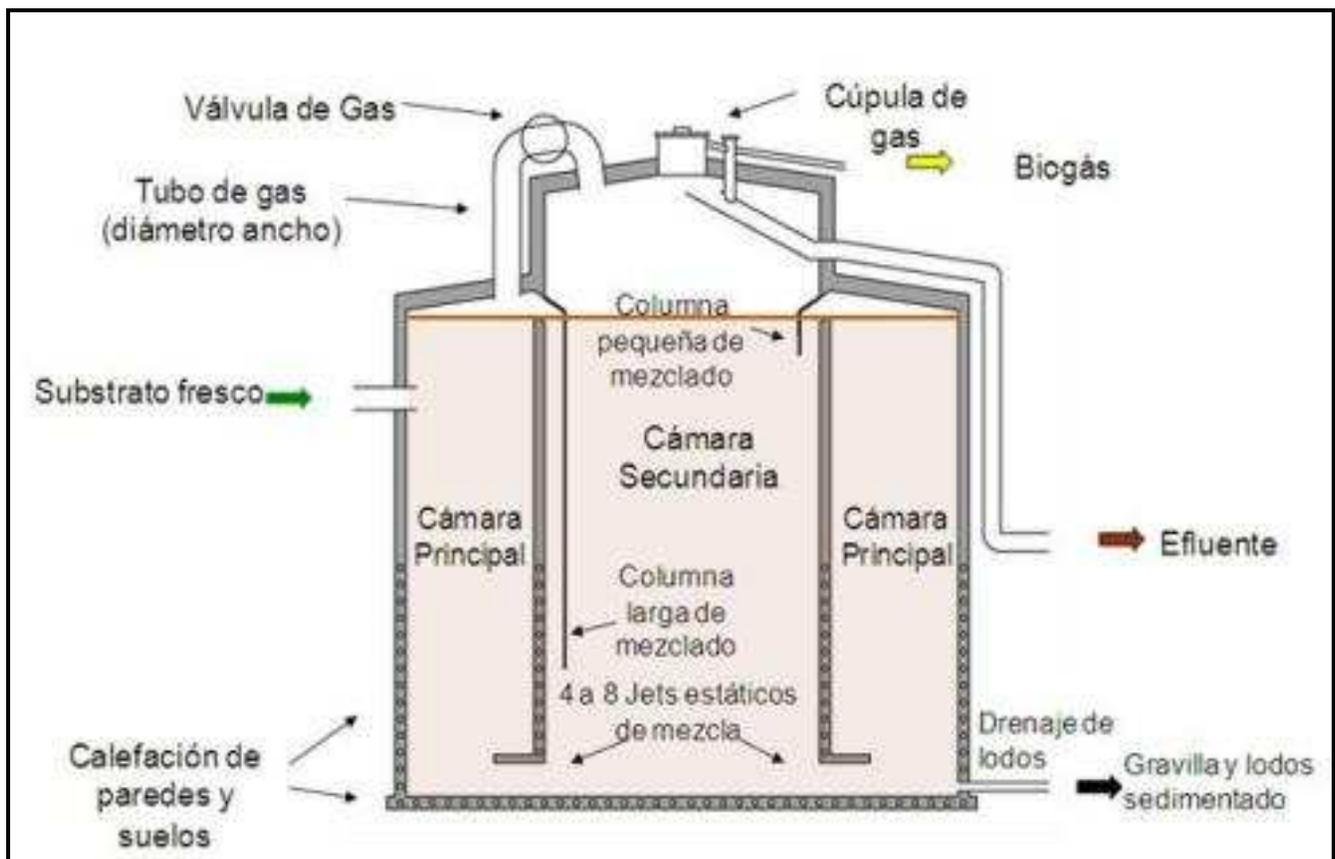


Figura 2.10 Esquema del reactor de auto-mezclado (AGROE, 2011)

2.5 Parámetros de control de los reactores anaerobios

El control de cualquier reactor anaerobio es delicado, debido a la baja producción de biomasa en relación al sustrato consumido, depende de los parámetros biológicos, químicos y físicos (Tabla 2.6). Por la concentración y composición de los desechos sólidos, el volumen, las condiciones ambientales, parámetros de control y por último la configuración del reactor.

Tabla 2.6 Parámetros de control, físico y químico (Castro, 2011a)

PARÁMETRO	ANÁLISIS
Físico	Temperatura
	pH
	Mezclado
Químico	Nutrientes C:N
	Demanda Química de Oxígeno (DQO)
	Alcalinidad

2.5.1 Temperatura

Lo principal es mantener la temperatura constante. En general, la degradación anaerobia se realiza a temperaturas comprendidas entre los 10 y 65°C. En la Figura 2.12 se distinguen tres puntos máximos donde la producción de biogás es óptima, el rango de temperatura mesófila a los 35°C y el de temperatura termófila a los 55°C. Existe otro rango de operación, conocido como psicrófila; en donde la temperatura oscila entre los 10 y 25°C, y para obtener cantidades de gas apreciables es necesario que el residuo tenga bajo contenido en materia sólida (Brambila, 2008).

Las cepas más usadas son mesófila y termófila en los procesos de generación de biogás. En la Figura 2.13 se aprecian curvas de crecimiento en relación de temperatura/día en la producción de biogás, usando cepas mesófilas y termófilas. En la Figura 2.14 se muestra otra apreciación. Entre las cepas mesófilas y termófilas, hay ventajas y desventajas que se muestran en la Tabla 2.7.

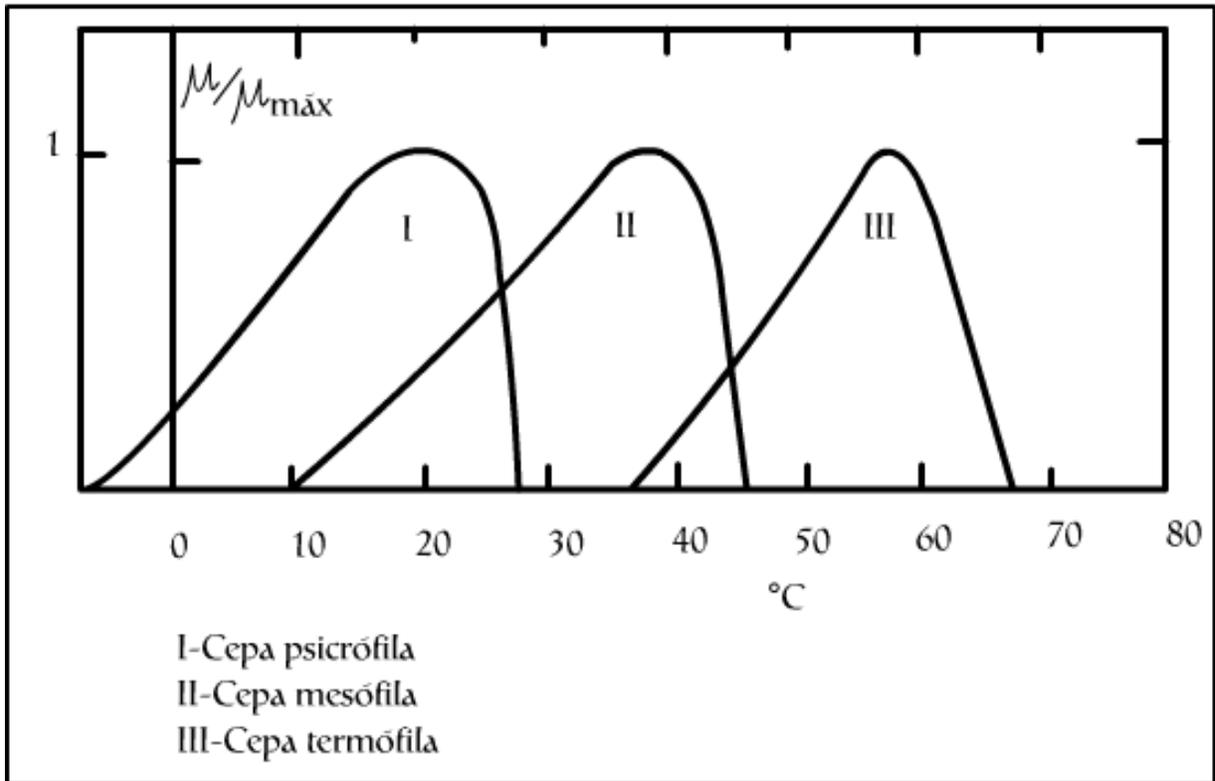


Figura 2.11 Rangos de temperatura psicrófila, mesófila y termófila (Castro, 2011b)

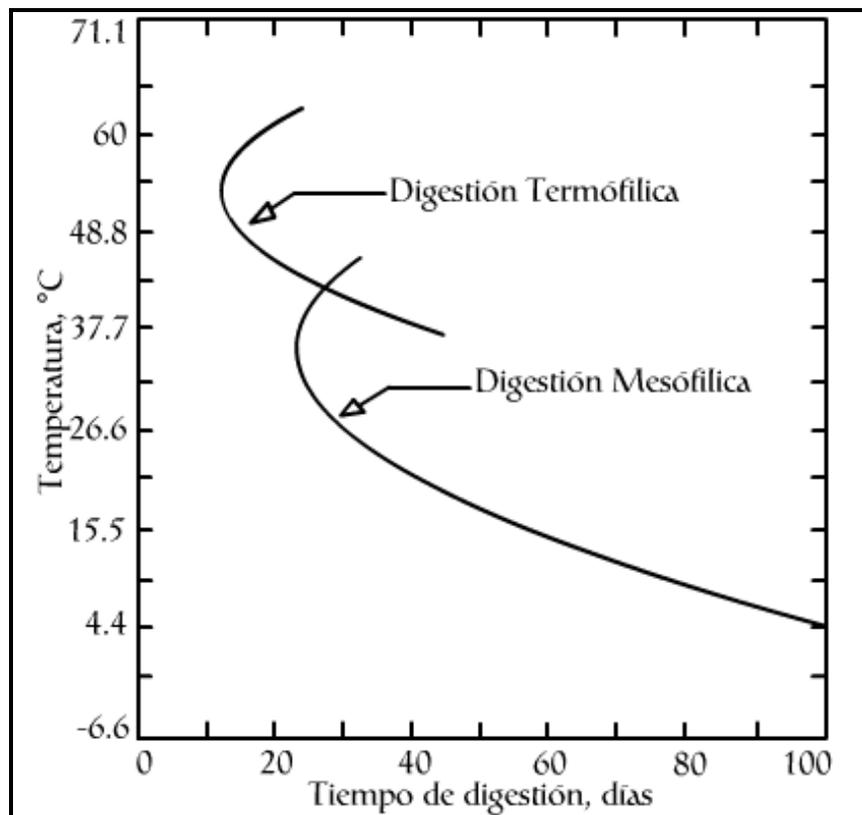


Figura 2.12 Tiempo de digestión con respecto a la temperatura en intervalos mesófilas y termófilos (Castro, 2011b)

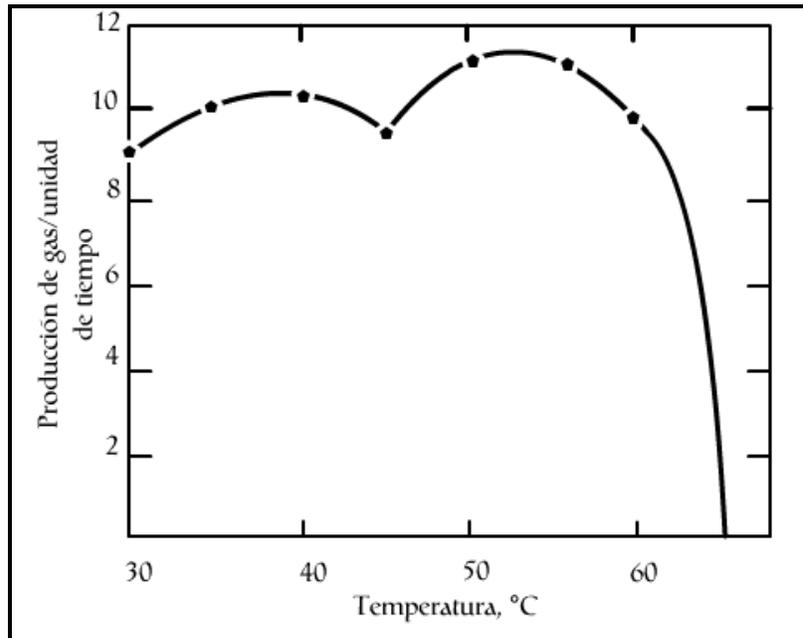


Figura 2.13 Producción de gas por unidad de tiempo con respecto a la temperatura de operación (Castro, 2011b)

Tabla 2.7 Beneficios de las cepas mesófila y termófila (Castro, 2011b)

MESÓFILA (20 A 40 °C)	TERMÓFILA (45 A 65 °C)
Menos vapor de agua en el gas	Mayor actividad
Mayor población metanogena	Menor Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)
Menos CO ₂ en el agua	Menor formación de lodos
Balance energético más favorable	Destrucción de microorganismos patógenos
Mayor experiencia en su aplicación	Equilibrio microbiano frágil
Mayor actividad metanogena de la biomasa	

Esto da hincapié a que la temperatura tiene un papel muy importante para la producción de biogás, ya que las bacterias son muy sensibles a los cambios, por lo tanto el control de esta debe de ser muy minucioso.

2.5.2 pH

El pH fluctúa entre 6.5 y 7.5, siendo un parámetro prácticamente neutro. Este rango se mantiene sólo si el reactor anaerobio está operando correctamente. Si llega a bajar su escala por debajo de 6.5 se inhibirá la producción de metano debido a la presencia de grandes concentraciones de ácidos grasos volátiles. Por lo contrario sube su escala por arriba de 7.5, la concentración de H₂, H₂S y amoníaco en el biogás serán más elevadas. El equilibrio del pH está

asegurado principalmente por bicarbonatos disueltos y en su desequilibrio las bacterias formadoras de metano se inhiben aumentando la proporción de dióxido de carbono en el biogás (Brambila, 2008).

Algunas causas por la cuales puede descender o incrementar el pH son:

- Fluctuaciones de temperatura
- Velocidad de cargas del sustrato muy elevadas
- Presencia de elementos tóxicos como metales pesados y pesticidas

En la Figura 2.14 se muestra el comportamiento del pH con respecto a la degradación de ácidos grasos volátiles y demanda química de oxígeno. Los ácidos grasos volátiles (AGV) mostrados en la Figura 2.14 son producidos durante la digestión anaerobia y tienden a reducir el pH.

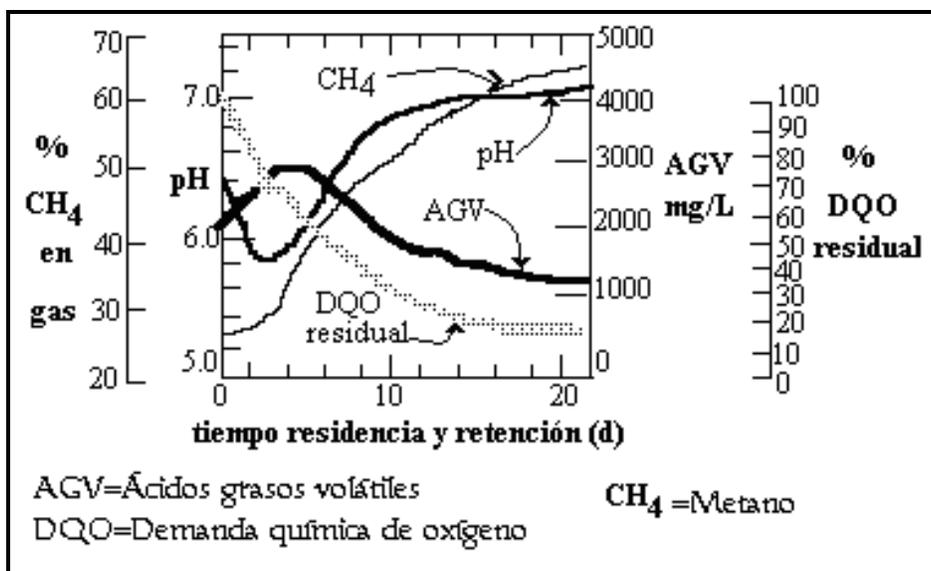


Figura 2.14 Comportamiento del pH en un reactor anaerobio, con respecto a su degradación (Castro, 2011b)

Esta reducción es debida normalmente a actividad de las bacterias metanogénicas, que también producen alcalinidad bajo la forma de dióxido de carbono, amoníaco y bicarbonato. El pH es controlado por la concentración del CO₂ en la fase gaseosa y un bicarbonatos derivados del ácido carbónico (HCO₃) alcalino de la fase líquida. Si la concentración del CO₂ en la fase gaseosa sigue siendo constante, la adición posible de HCO₃ alcalino puede aumentar el pH en el reactor anaerobio. Una capacidad de 70 mg/l de carbonato de calcio (CaCO₃) o una relación

molar de por lo menos del 1.4:1 de bicarbonato/AGV se debe mantener para tener un proceso de digestión estable y un proceso de amortiguamiento de la digestión (Valdés, 2010).

2.5.3 Mezclado

La agitación interna del reactor anaerobio debe de ser constante y controlada, debido a que los microorganismos y la materia prima o sustrato deben estar en contacto uniformemente. La operación del reactor anaerobio a mesofilia, la agitación requerida es más que suficiente la que provoca la carga diaria al entrar al reactor anaerobio. La operación del reactor anaerobio a termofilia, la agitación requerida debe ser continua para establecer una mejor distribución homogénea entre bacterias y sustrato, proporcionando una temperatura interna uniforme.

En la superficie de la mezcla se tiende a formar una “nata” debido al material fibroso no digerible, la cual se debe romper por medios mecánicos para que el biogás salga brevemente del seno de la mezcla (Burgos, 2010).

Las principales ventajas del mezclado en los tanques de digestión, más que para la eliminación de natas son (Castro, 2011a):

- Eliminación de estratificación térmica y mantenimiento de una temperatura uniforme por todo el tanque manteniendo la uniformidad química y física de la digestión del lodo
- Mantenimiento del contacto íntimo entre la biomasa activa y el lodo alimentado mezclando el lodo crudo y el lodo digerido
- Una rápida dispersión de los productos finales de metabolización producidos en la digestión y de cualquier material tóxico que haya penetrado al sistema en la alimentación del lodo, para minimizar los efectos inhibitorios y tóxicos en la actividad microbiana
- Prevención de la formación de espumas en la superficie y la deposición de arenas, piedras y otros materiales inertes pesados en la parte inferior del tanque

Los métodos de mezclado pueden darse por medio de:

- Hidráulica: Una bomba para la recirculación del sustrato
- Mecánica: Aspas o hélices dentro del reactor anaerobio

- Gaseosa: Tubería para la recirculación del mismo gas.

2.5.4 Nutrimientos y relación Carbono:Nitrógeno)

La relación C:N es un indicador muy útil a la hora de determinar si la relación entre el carbono y el nitrógeno presente en la materia prima que hayamos elegido, es la correcta. Toda la materia orgánica es capaz de producir biogás, esta producción dependerá de la composición del desecho utilizado. El carbono y el nitrógeno son las fuentes principales de alimentación de las bacterias formadoras de metano; el carbono es la fuente de energía y el nitrógeno contribuye a la formación de nuevas células (Burgos, 2010). Las bacterias anaerobias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos elementos en la materia prima es de 30. Si no existe suficiente nitrógeno para permitir que las bacterias se multipliquen, la velocidad de producción de gas se verá limitado; al estar presente nitrógeno en exceso, se produce amoníaco, el cual en grandes cantidades es tóxico e inhibe el proceso. (Brambila, 2008)

En la Tabla 2.8, se muestra cuanto biogás se puede producir así como estimar cuanto puede haber de cada uno de los gases que estarán presentes en la digestión, la relación C:N será óptima cuando oscile entre 20:1 a 30:1.

Tabla 2.8 Producción de gases dependiendo de la relación C:N (Castro, 2011b)

Relación C:N	Presencia en el biogás			
	CH ₄	CO ₂	H ₂	N ₂
baja:<20:1	poco	mucho	poco	mucho
media	mucho	poco	poco	poco
alta:> 30:1	poco	mucho	mucho	poco

Entre las materias primas más utilizadas en la generación de biogás, destacan los desechos animales, cuya relación C:N siempre es menor que la óptima, debido a que tienen un contenido importante de nitrógeno. Otro material muy usado son los residuos agrícolas, los que generalmente tienen relaciones C:N muy altas, ya que contienen muy poco nitrógeno, por lo que casi siempre se mezclan con desechos animales o se les agrega un compuesto nitrogenado, como puede ser urea, para acercarse a un balance adecuado de C:N. En la Tabla 2.9, se incluye una lista de las relaciones C:N de las materias comúnmente utilizadas, para tener una idea de las posibles combinaciones de C:N para una operación anaerobia adecuada.

*Tabla 2.9 Relación C:N de diversos desechos vegetales disponibles en el medio rural
(Burgos, 2010)*

Material	% N (base seca)	% C (base seca)	C:N
Desechos Vegetales			
Paja de trigo	0.53	46.0	87:1
Paja de arroz	0.63	42.0	57:1
Rastrojo de maíz	0.75	40.0	53:1
Hojas secas	1.00	41.0	41:1
Desechos Animales			
Bovinos	1.7	30.6	18:1
Equinos	2.3	57.6	25:1
Ovinos	3.8	83.6	22:1
Porcinos	3.8	76.0	20:1
Aves	6.3	50.0	9:1
Excretas humanas	0.85	2.5	3:1

2.5.5 Demanda química de oxígeno (DQO)

La DQO es un parámetro que mide la cantidad de materia orgánica susceptible de ser oxidada por medios químicos que hay en una muestra líquida. Se utiliza para medir el grado de contaminación, aunque este método pretenda medir principalmente la concentración de materia orgánica. Los oligoelementos requeridos por la biomasa anaerobia en función de la concentración de DQO en el agua, se presentan en la Tabla 2.10.

*Tabla 2.10 Concentración de oligoelementos con respecto a la carga orgánica de entrada al digestor
(Castro, 2011b)*

Elemento	Concentración del metal (mg/L)	
	10g DQO/L	50g DQO/L
Fe	0.5 a 20	3 a 100
Ni	0.05 a 3	0.3 a 15
Co	0.05 a 2	0.3 a 10
Mo	0.01 a 0.05	0.05 a 0.2

2.5.6 Alcalinidad

Cuando el pH es bajo, puede corregirse con adiciones de sustancias alcalinas como agua con cal (hidróxido de calcio). En la Figura 2.15 se muestra, concentración de CO₂ vs. alcalinidad, donde se fijan los valores límites de la digestión.

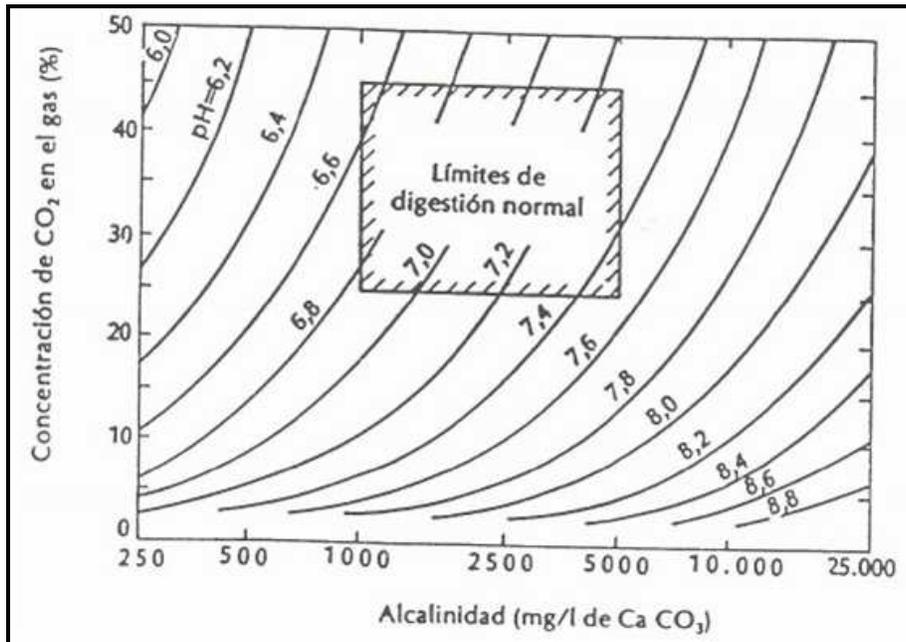


Figura 2.15 Concentración de CO₂ vs. Alcalinidad en la operación de un reactor anaerobio (Castro, 2011b)

Desde que se inicia la operación hasta que se considera que se ha alcanzado la estabilidad del proceso, lo más importante es la retención de biomasa viable dentro del reactor anaerobio. Para que un reactor anaerobio sea estable es necesario que exista un ambiente que permita la mejor actividad de la biomasa y que el tiempo de retención de sólidos sea adecuado. Por otro lado, una sobrecarga orgánica causada por el aumento en la concentración o en el caudal, variaciones en la temperatura y la entrada de compuestos tóxicos al reactor, son causas que rompen la estabilidad (Pacheco y Magaña, 2003).

2.6 Parámetros de diseño de reactores anaerobios

Se debe de tener información de la región donde se desea implementara el reactor anaerobio, por ejemplo el clima, la hidrología, la cantidad de desechos orgánicos que serán transformados a biogás. Con esto es suficiente para tener una idea clara del tamaño y forma del reactor anaerobio que se requiere implementar. El diseño abarca una serie de actividades que deben ser consideradas, cómo son; el tiempo de residencia hidráulica (TRH), el porcentaje de sólidos y una descripción general del sistema.

2.6.1 Tiempo de residencia hidráulica (TRH)

Las bacterias requieren de un determinado tiempo para llevar a cabo la degradación de la materia orgánica. Así que la velocidad de degradación dependerá de la temperatura, a mayor temperatura, el tiempo de retención requerida para obtener biogas será menor. Para un reactor anaerobio que opera a carga discontinua o intermitente, el tiempo de retención es el que transcurre entre la carga y descarga del sistema. Si el sistema es de carga continua, el tiempo de retención va a determinar el volumen diario de la carga que será requerida para el reactor anaerobio.

$$TRH = \frac{V}{Q} \left[\frac{m^3}{m^3 / \text{día}} \right] \dots\dots\dots(2-1)$$

Donde: (Castro, 2011b)

TRH = Tiempo de residencia hidráulica (días)

V = Volumen del reactor (m³)

Q = Gasto (m³/día)

Nota: Para un tiempo de retención de X días, cada día se cargará 1/X del volumen total del reactor anaerobio, haciendo que la materia orgánica permanezca por un promedio de X días dentro. En la Tabla 2.11 (Castro, 2011a), se muestran los parámetros y observaciones para obtener la carga orgánica másica y carga orgánica volumétrica.

Tabla 2.11 Parámetros y observaciones para un correcto arranque de un reactor anaerobio (Castro, 20011a)

Parámetros	Observaciones
Concentración de inóculo	12 a 15 (kgSSV/m ³) reactor inóculo concentrado
	6 (kgSSV/m ³) inóculo diluido
Temperatura	35 °C a 40 °C
TRH	24 h los primeros 20 días de operación
Bx carga orgánica másica	0.05 a 0.1 (kgDQO/kg SSV día)
Bv carga orgánica volumétrica	0.5 (gDQO/m ³ día)
Sustrato: carbohidrato, proteínas (a baja concentración)	Arranque: muy rápido (1 meses)
Derivados: leche, proteínas	Rápido (2 meses)
Aguas acidificadas	Lento (4 meses)
Plantas químicas, almidón	Muy lento (6 meses)

Para calcular la carga orgánica másica:

$$B_x = \frac{(Q)(S_o)}{(X_f)(V)} \dots\dots\dots(2-2)$$

Donde:

V = Volumen del reactor (m³)

Q = Gasto (m³/día)

S_o = Concentración de sustrato (kgDQO/m³)

B_x = Carga orgánica másica (kgDQO/kgSSV día)

X_f = Concentración de la biomasa dentro del reactor (kgSSV/ m³)

Para calcular la carga orgánica volumétrica:

$$B_v = \frac{(Q)(S_o)}{V} \dots\dots\dots(2-3)$$

Sustituyendo:

$$V = (TRH)(Q) \dots\dots\dots(2-4)$$

Se tiene:

$$B_v = \frac{S_o}{TRH} \dots\dots\dots(2-5)$$

Donde:

B_v = Carga orgánica volumetrica (kgDQO/m³ día)

V = Volumen del reactor (m³)

Q = Gasto (m³/día)

S_o = Concentración de sustrato (kgDQO/m³)

TRH = Tiempo de residencia hidráulica (días)

V = Volumen del reactor (m³)

2.6.2 Porcentaje de sólidos

El porcentaje de sólidos totales contenidos en un sustrato con que se carga el reactor anaerobio, es un factor importante para asegurar el proceso adecuadamente. Experimentalmente se ha comprobado que una carga que contenga entre 7 y 9% de sólidos es óptima para la digestión reactor anaerobio. De estos sólidos, normalmente entre 70 y 90% son materia orgánica biodegradable y se denomina sólidos volátiles (Alcalde, 2009).

2.6.3 Descripción general del sistema

La descripción general del sistema debe contener cómo mínimo lo siguiente para formar una idea de lo que se requiere para el diseño:

- Almacenamiento de biomasa
- Otros sustratos
- Pretratamiento: Mecánico y térmico
- Digestor
- Almacenamiento de lodos digeridos
- Almacenamiento de biogás
- Motor de gas que funciona como una unidad CHP (ciclo combinado para producción de calor y electricidad) que usará el biogás para producir electricidad y calor
- Medidas: Escala laboratorio, granja e industrial

2.6.4 Condiciones de proceso

En las condiciones del proceso se deben considerar los siguientes aspectos:

- Las condiciones anaerobias
- Las condiciones de humedad (menor al 50%)
- La temperatura dependiendo del sistema
 - Para un sistema psicrófilo (P) menor a 20 °C
 - Para un sistema mesófilo (M) de 20 °C a 40 °C
 - Para un sistema termófilo (T) de 45 °C a 65 °C
- El tiempo de retención de acuerdo al sistema:
 - (P) 40 a 100 días
 - (M) 24 a 40 días
 - (T) 15 a 25 días
- El pH debe oscilar entre 6.5 a 7.5

- El tipo de sustancias restrictivas: Desinfectantes, antibióticos, ácidos, etc
- La homogenización de la materia orgánica, respecto a la temperatura, mezclado de sustrato viejo con nuevo y mezcla de sustrato-microorganismo
- El contenido de nitrógeno, mantener una relación de C:N mínimo de 20:1 y máximo 40:1 respectivamente.

2.6.5 Composición del biogás

Una vez obtenido el biogás se espera que la composición de éste sea de:

- Metano 50-80%
- CO₂ 50-20%
- Nitrógeno menor de 1%
- Hidrógeno menor de 1%
- Amoniaco menor de 1%
- Ácido sulfhídrico menor de 1%

2.6.6 Modelado

Se debe crear un dibujo de los componentes del sistema, para considerar donde quedarán distribuidos los elementos a ocupar, los cuales pueden ser:

- Tanque digestor
- Bomba y líneas de conducción
- Aparatos de mezclado
- Almacenamiento de sustrato
- Almacenamiento de biogás
- Motor de biogás
- Limpieza de biogás
- Mediciones y equipos automatizados de control

2.6.7 Tanque reactor anaerobio

Se deben cumplir los siguientes requerimientos del reactor según sea el caso:

- Sistema de calentamiento y tener una temperatura constante
- Material de aislamiento para prevenir la transferencia de calor
- Sellado y sin entradas de oxígeno ni de aire

- Concreto reforzado o acero inoxidable para retardar la corrosión

Contar con bombas y líneas de conducción para variados usos.

- Bombas centrífugas
- Bombas de desplazamiento
- Líneas presurizadas
- Líneas sin presurizar
- De acero inoxidable u otros plásticos

De preferencia utilizar aparatos de mezclado. La mayoría de los tanques digestores utilizan aspas o hélices (Figura 2.16) para mantener homogéneo el sustrato y temperatura dentro del reactor anaerobio; y por otro lado no dejar que se sedimente el sustrato.



Figura 2.16 Aparatos de mezclado (Castro, 2011a)

2.6.8 Manejo del biogás

Se debe contar con un correcto almacenamiento de biogás para evitar fugas. Un almacenamiento interno o externo debe ser de materiales adecuados, puesto que su volumen es determinado por la cantidad de producción y la presión de almacenamiento:

- Atmosférica (0.05 y 0.5 MPa) (materiales flexibles)
- Intermedia (5-20 MPa)
- Alta (200-300 MPa) (acero inoxidable)

El biogás se puede usar en una unidad CHP, la cual quemará el biogás y lo convertirá en energía térmica y eléctrica. En condiciones óptimas el rendimiento de una unidad CHP es de un 35 % en electricidad y 65 % en calor. En la Figura 2.17 se muestra una unidad CHP.



Figura 2.17 Fotografía de una unidad CHP (Castro, 2011a)

2.6.9 Limpieza del biogás

Tiene por objeto eliminar o disminuir el contenido de ácido sulfhídrico y de agua, para proteger de la corrosión a los equipos de quema de biogás y para lograr una correcta combustión respectivamente.

Trampa de ácido sulfhídrico

Para remover o disminuir el ácido sulfhídrico comúnmente se usan recipientes rellenos con material de hierro finamente dividido formando un lecho poroso a través del cual debe circular el biogás para que reaccione el ácido con el metal y éste, vaya disminuyendo (Brambila, 2008). La condición de porosidad se alcanza utilizando como relleno virutas de hierro, esponjillas de cocina de marca comercial o limadura de hierro. Estos materiales tienen la ventaja de ser de bajo costo y de oponer poca resistencia al flujo de biogás lo cual es un aspecto importante en razón de las bajas presiones que se manejan en este tipo de sistemas. La trampa de ácido sulfhídrico actúa también como trampa de llama no sólo por la presencia del relleno sino por el mayor diámetro del recipiente con relación a la línea de conducción. El único requisito es el que sea completamente hermético para evitar fugas de gas. Así, es posible encontrar en plantas en operación, trampas como las siguientes (Brambila, 2008):

- Rectangulares de hierro o acero, pintadas para protegerlas de la corrosión con pintura anticorrosiva.

- Cilíndricas de acero que se construyen a partir de secciones de tubería estándar de 2" o más. Al igual que las anteriores, requieren de pintura para protegerlas de la corrosión.
- Cilíndricas de PVC que se construyen a partir de tubería estándar o se arman utilizando accesorios en "Y" de PVC disponibles en el mercado. No requieren pintura protectora pero se debe evitar la exposición a los rayos del sol.

Trampas para vapor de agua

El agua arrastrada por el gas se separa cuando el flujo de éste, se encuentra en su trayectoria una expansión brusca y una contracción posterior (Figura 2.18). Para lograr este propósito será suficiente instalar sobre la línea un accesorio idéntico a las trampas de ácido sulfhídrico, con la diferencia de que no se necesitará el relleno de material de hierro. Las trampas están provistas de un grifo de purga por donde se debe evacuar periódicamente el agua depositada en el fondo (Brambila, 2008).

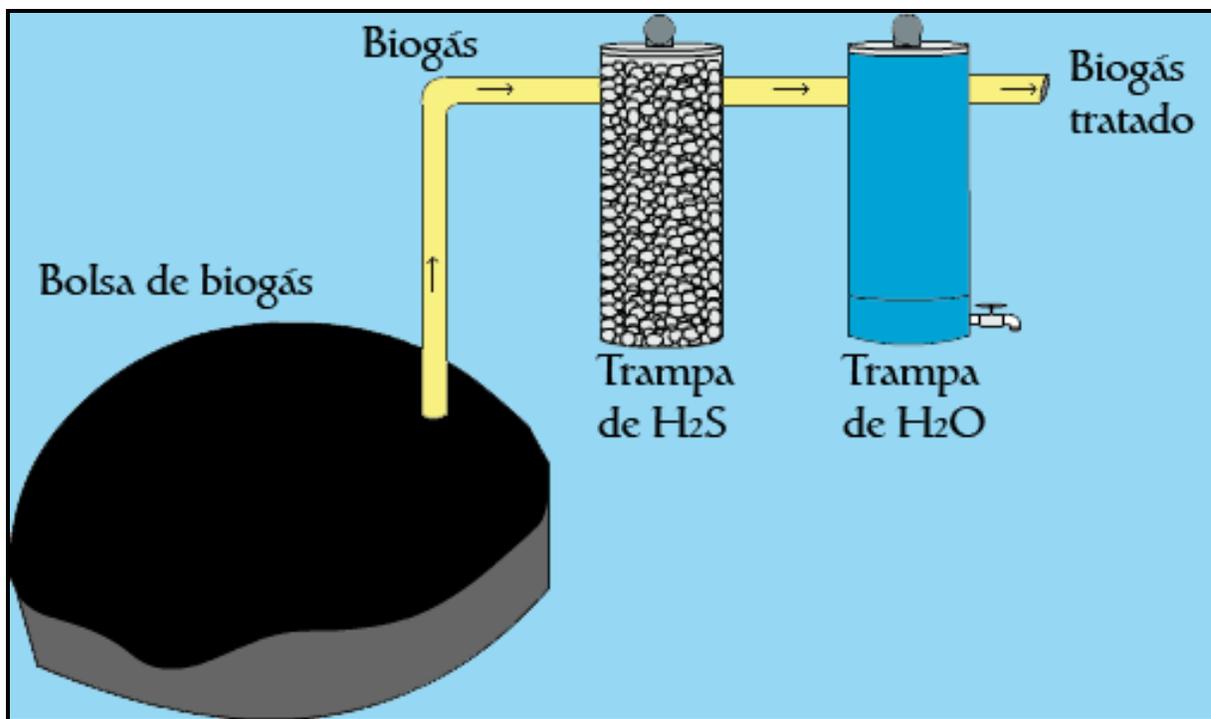


Figura 2.18 Instrumentos para la limpieza del biogás (Brambila, 2008)

2.6.10 Equipo de control y análisis de sustratos

Se recomienda tener un tablero con la instrumentación requerida para la toma de datos y así un correcto diagnostico del reactor anaerobio. El tablero puede contener:

- Medidores de pH
- Medidores de temperatura

- Indicadores de nivel
- Medidores de gas
- Composición del biogás
- Contenido de materia

En el análisis de sustratos se debe cumplir con los valores promedio (Tabla 2.12 y Tabla 2.13) para tener una producción eficiente de biogás.

Tabla 2.12 Valores promedio en sustratos provenientes de desechos pecuarios (Castro, 2011a)

Tipo de efluente	Materia seca (%)	Materia orgánica (%)	Producción de biogás (m ³ /tonelada MOS)	Producción de biogás (m ³ /tonelada húmeda)	Producción media de biogás (m ³ /tonelada húmeda)
Efluentes de ganado vacuno	7-15	65-85	200-400	9-51	25
Efluentes de ganado porcino	3-13	65-85	350-550	7-61	27
Efluentes de avicultura	10-20	70-80	350-550	24-88	51

Tabla 2.13 Valores promedio en sustratos no provenientes de los desechos pecuarios (Castro, 2011a)

Tipo de sustrato	Materia seca MS (%)	Materia orgánica (%de MO)	Producción de biogás (m ³ /tonelada MOS)	Producción de biogás (m ³ /tonelada húmeda)	Producción media de biogás (m ³ /tonelada húmeda)
Residuos vegetales	10-20	65-85	400-700	25-120	75
Remolacha azucarera	10-20	80-95	800-1200	65-230	145
Almacenamiento de cereal	15-40	75-95	500-900	55-340	200
Almacenamiento de avena	30-50	80-90	500-700	120-315	220

También es necesario saber las propiedades de sustratos, sus aspectos químicos, impurezas físicas y los patógenos que contienen, analizar las propiedades y calidad del abono vs abono sin tratar. Se cumple que:

- El nitrógeno se incrementa
- Poco olor
- Homogéneo
- No patógenos

2.6.11 Principios de digestión

Se considera si se quiere un reactor anaerobio horizontal o vertical y así tener un diseño adecuado dependiendo de los parámetros de ubicación, costos y eficiencia. En la Figura 2.19 se puede ver un ejemplo de un reactor horizontal y en la Figura 2.20 un ejemplo de un reactor vertical.

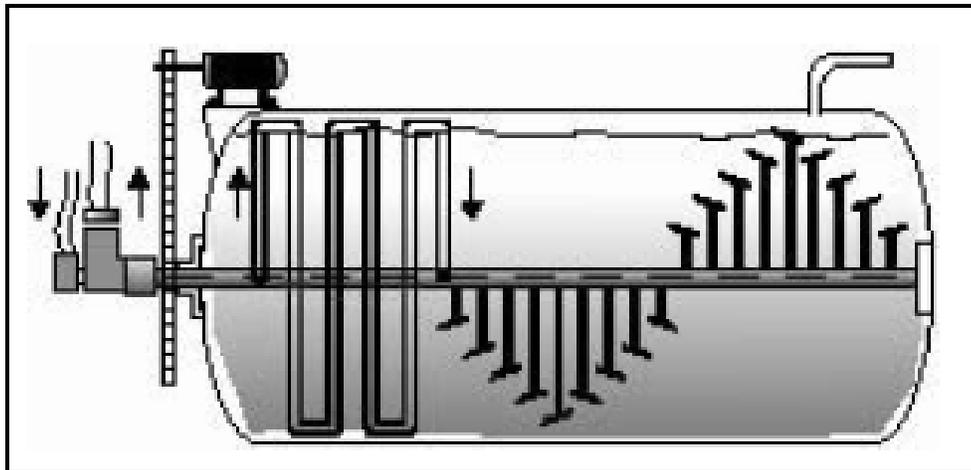


Figura 2.19 Reactor horizontal tipo salchicha (Castro, 2011a)



Figura 2.20 Reactor vertical tipo indio (PAKS, 2011)

2.6.12 Cálculos de diseño

A continuación se muestran las ecuaciones necesarias para el desarrollo de un reactor anaerobio.

Dimensiones del tanque (reactor anaerobio)

Para el sustrato total o entrante, se debe considerar una relación 1:1.5 (materia orgánica: agua).

$$V_{RA} (m^3) = \left\{ \left[D (m^3 / año) + CS (m^3 / año) \right] * \left[\frac{TRH (días)}{365} \right] \right\} \dots\dots\dots(2-6)$$

(Castro, 2011a)

Donde:

V_{RA} = Volumen del reactor anaerobio (m^3)

D = Desechos ($m^3/año$). Ejemplo: excretas de ganado

CS = Co-sustrato ($m^3/año$). Ejemplo: desechos de agricultura

TRH = Tiempo de residencia hidráulica (días)

Producción de biogás

$$PB = \left[(M) * (DM_M) * \left(\frac{OM_M}{DM_M} \right) * \left(\left(\frac{m^3 \text{ biogàs}}{kgOM_M} \right) * (1000) \right) \right] + \dots$$

$$\dots + \left[(CS) * (DM_{CS}) * \left(\frac{OM_{CS}}{DM_{CS}} \right) * \left(\left(\frac{m^3 \text{ biogàs}}{kgOM_{CS}} \right) * (1000) \right) \right] \dots\dots\dots(2-7)$$

(Castro, 2011a)

Donde:

PB = Producción de biogás ($m^3/año$)

M = Desecho de animales (ton/año)

DM = Contenido de materia seca.

OM/DM = Fracción orgánica de materia seca

OM = Producción de biogás / kg de desecho

CS = Otros sustratos

Dimensiones del tanque de almacenamiento de biogás

$$V_{PB} (m^3) = PB \cdot (20\%) \left[\frac{m^3}{dia} \right] \dots\dots\dots(2-8)$$

(Castro, 2011a)

Donde:

V_{PB} = Volumen de almacenamiento de biogás (m^3)

PB = Producción diaria de biogás (m^3 /día)

Demanda de calor del reactor anaerobio

$$DC = MS \cdot CE \cdot DFF \cdot 1.30 \dots\dots\dots(2-9)$$

(Castro, 2011a)

Donde:

DC= Demanda de calor (MJ/año)

MS= Masa del sustrato (Ton/año)

CE= Calor específico del sustrato (KJ/kg K)

DFF= Temperatura del reactor anaerobio - Temperatura del sustrato

En general el valor de CE es igual al del agua (4.2 kJ/kg K). La temperatura del reactor anaerobio es el valor al que se diseñó y la temperatura promedio del sustrato fresco es 15 °C.

Calor residual

Es el calor sobrante aún del producido por la unidad CHP. Este calor puede ser aprovechado para calentamiento de los establos o casas privadas.

Se tiene:

$$PC = ST \cdot HO \dots\dots\dots(2-10)$$

(Castro, 2011a)

Donde:

PC = Producción de calor del CHP (GJ)
 ST = Salida térmica de la unidad CHP (kW_{th})
 HO= Horas de operación de CHP

$$CR = PC - DC \dots\dots\dots(2-11)$$

(Castro, 2011a)

Donde:

CR = Calor residual (GJ)
 PC = Producción de calor del CHP (GJ)
 DC = Demanda de calor del reactor anaerobio (GJ)

Medidas de la líneas de conducción de calor

- En la mayoría de las ocasiones las líneas se diseñan con base de la producción de calor total de la unidad CHP
- Para granjas suelen utilizarse diámetros de 33.7[mm] y un grosor de 2.6[mm]

$$CRL = STU \dots\dots\dots(2-12)$$

(Castro, 2011a)

Donde:

CRL = Capacidad requerida de las líneas (kW_{th})
 STU = Salida térmica de la unidad de CHP

Considerando la Tabla 2.14 para las dimensiones requeridas de los tubos de calefacción para distintas capacidades.

Tabla 2.14 Capacidad máxima de kW_{th} en tubos de calefacción (Castro, 2011a)

Capacidad máxima (Kw _{Th})	Diámetro (mm)
18	13.5
30	17.2
45	21.3
70	26.9
110	33.7

Mezclador

El tipo y medida del mezclador depende principalmente del contenido de materia seca en el reactor anaerobio, el tipo y las dimensiones del mismo.

Tamaño de moto generador

$$E = PB \cdot PC \dots\dots\dots(2-13)$$

(Castro, 2011a)

Donde:

E = Energía (Kcal/hora)

B = Producción de biogás (m³biogas/hora)

C = Poder calorífico (5,400 Kcal/m³ biogás)

Si 860 Kcal = 1KWh

$$E_{total} = E \left[\frac{Kcal}{hora} \right] \cdot \frac{1}{860} \left[\frac{kWh}{kcal} \right] \dots\dots\dots(2-14)$$

(Castro, 2011a)

Donde

E_{total}= Energía Total (kWh)

E = Energía (Kcal/hora)

Para obtener kW_e, se considera un rendimiento del 35%

$$EE (kWe) = ET (kWh) * (0.35) \dots\dots\dots(2-15)$$

(Castro, 2011a)

Donde

EE = Energía Eléctrica (kW/e)

ET = Energía total(kWh)

Se considera el 5% menos de autogeneración (kW_e). Para el Estado de México a 2,600 metros sobre el nivel del mar corresponde de 13 a 15 % menor.

2.7 Disposición de los productos de sistemas anaerobios

2.7.1 Biogás

Una vez almacenado el biogás puede tener gran cantidad de usos y los principales son: a) Su aprovechamiento directo para iluminación y uso directo para la cocción de alimentos; b) Su uso para la quema directa, mediante convenios con empresas dedicadas a la comercialización de los denominados “bonos de carbono”, mediante el desarrollo de proyectos bajo el MDL a partir del estiércol; c) Su aprovechamiento para la generación de energía eléctrica y calórica en unidades productivas, tales como granjas porcinas, establos lecheros y rastros. En estos lugares principalmente la energía obtenida se usa: c.1) En el equipo de laboratorio y conservación de semen; c.2) En los sistemas de bombeo y en la limpieza de instalaciones; c.3) Para dar calor a los lechones; c.4) En la líneas de alimentación.

2.7.2 Uso de lodo digerido

Una vez que la materia orgánica ha cumplido el tiempo de residencia dentro del reactor y ha generado su cantidad máxima de metano (CH_4), debe ser removida para dar cabida a desechos o materia orgánica fresca o sin digerir y así continuar la producción de biogás. Por lo que la materia orgánica después de su degradación por la acción de bacterias anaerobias recibe el nombre de lodo digerido (Burgos, 2010). El cual aún tiene una proporción de materia orgánica de entre 40 a 50%, con la cual no fue posible obtener biogás (Burgos, 2010). El lodo digerido aunque constituye un amplio recurso potencial, se ve limitado en su aprovechamiento por las altas cantidades de contaminantes químicos y biológicos que contiene, aunque además de ser empleado como inóculo dentro del mismo proceso del que se obtuvo, puede tener distintas aplicaciones.

El compostaje es una alternativa viable en el manejo de estos lodos, ya que es un proceso biológico que estabiliza sus componentes orgánicos bajo condiciones aerobias controladas para su disposición final. Aunque en este caso existen dos parámetros de riesgo que deben ser controlados: La cantidad de metales pesados y los microorganismos patógenos. Dichos parámetros son controlados de la siguiente manera (EPA, 2003):

- La temperatura en la composta, debe ser de 40°C por cinco días consecutivos o temperaturas mayores de 55°C por cuatro horas. Aunque en términos estrictos se

recomiendan 55°C por quince días en pilas aireadas por volteo aplicando cinco volteos, uno cada tres días

- Se debe agregar material adicional además del lodo digerido a la composta

Éste debe ser fuente de carbono para los microorganismos degradadores de la materia orgánica, se debe incrementar la porosidad y el área de contacto del lodo expuesto al oxígeno atmosférico durante el compostaje, además de reducir la humedad de la composta por secado ó ventilación. Los materiales que se emplean son: Cortezas de madera, olotes o rastrojos de maíz, hojarasca, papel, cartón, cascarilla de cacahuate, desechos de madera, etc. Los lodos digeridos se caracterizan por tener importantes cantidades de nitrógeno y fósforo como se muestra en la Tabla 2.15.

Tabla 2.15 Características de lodos digeridos (Carranza, 2008)

Sólidos sedimentados (SS)	Lodos primarios	Lodos secundarios	Lodos digeridos (mezcla)
Sólidos sedimentados (SS) (%)	30-36	18-29	31-40
Contenido de agua (%)	92-96	97-98	94-97
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)(%)	70-80	80-90	55-65
Grasa (%SS)	12-16	3-5	4-12
Proteínas (%SS)	4-14	20-30	10-20
Carbohidratos (%SS)	8-10	06-ago	5-8
pH	5.5-6.5	6.5-7.5	6.8-7.6
Fósforo (P) (%SS)	0.5-1.5	1.5-2.5	0.5-1.5
Nitrógeno (N) (%SS)	2-5	1-6	3-7
Bacterias patógenas (Nº / 100mL)	10 ³ -10 ⁵	100-100	10-100
Organismos parásitos (Nº / 100mL)	8-12	1-30	1-3
Metales pesados (%SS) (Zn, Pb, Cu)	0.2-2	0.2-2	0.2-2

Debido a las características anteriores, los lodos digeridos se utilizan como fertilizantes, abono, mejoradores de suelo o como complemento en la fertilización. El valor fertilizante de los lodos está dado en función de su capacidad de mineralización, un lodo que se mineraliza lentamente, será mejor que uno que lo hace rápidamente.

Debido a que este último libera sus elementos nutritivos sin formar costra o capa la cual sirve para mantener el equilibrio mineral en el suelo. La presencia de fósforo permite dar altos rendimientos en los cultivos, está considerado como un elemento nutritivo mayor y su disponibilidad depende de las condiciones del suelo. Por lo que al estar ausente, debe ser suministrado en los fertilizantes ya que interviene en la formación de raíces y floración de los vegetales (López, 2000).

2.8 Producción de biogás de desechos pecuarios

En la obtención de biogás por el medio de la degradación anaerobia, se debe estimar cuanta cantidad se obtendrá por una cierta cantidad de residuos orgánicos, con el objeto de tener la suficiente capacidad de almacenamiento o estimar el ahorro energético inherente a su producción.

La producción teórica de obtención de biogás se ilustra en la siguiente ecuación:

$$PB_t = (t) * (DM) * (OM) * (MBP) \dots\dots\dots(2-16)$$

(Castro, 2011d)

Donde:

PB_t = Producción de biogás

t = Toneladas de sustrato o materia prima (ton)

DM = Fracción de materia seca en el sustrato (%)

OM = Fracción de materia orgánica seca (%)

ODM = Partícula orgánica del sustrato

= DM x OM

MBP = m³ biogás/ Ton de ODM

La ecuación 2-16 se utiliza cuando el biogás se obtiene a partir de dos o más sustratos:

$$PB = PB_M + PB_{CS} + \dots \dots\dots(2-17)$$

(Castro, 2011d)

Donde:

PB = Producción de biogás total (m³/año)

PB_M = Producción de biogás (m³/año), para un solo sustrato (M)

PB_{CS} = Producción de biogás (m³/año), para otro sustrato diferente (CS)

Para un sustrato:

$$PB_M = \left[M \cdot DM_M \cdot \frac{OM_M}{DM_M} \cdot 1000 \right] \left[\frac{m^3 \text{ biogás}}{kg OM_M} \right] \dots\dots\dots(2-18)$$

(Castro, 2011a)

Donde:

PB = Producción de biogás (m³/año)

M = Desecho (ton/año). Ejemplo: excretas de ganado

DM = Contenido de materia seca

OM/DM = Fracción orgánica de materia seca

OM = Producción de biogás / kg de desecho

Productividad de metano

Es uno de los parámetros que permite evaluar la eficiencia en la generación de gas metano. Se define como la cantidad de metano generado durante el tiempo de residencia, es decir, el tiempo en que la materia a degradar permanece dentro del reactor (Burgos, 2010)

$$P_{CH_4} = \frac{V_{CH_4}}{V_{RA} \cdot TRH} \dots\dots\dots(2-19)$$

(Burgos, 2010)

Donde:

P_{CH₄} = Productividad de metano

V_{CH₄} = Volumen de metano generado

V_{RA} = Volumen de materia a degradar dispuesta en el Reactor Anaerobio

TRH = Tiempo de Residencia Hidráulica

La producción de metano, tiene un límite y este depende fundamentalmente de la naturaleza de la materia dispuesta en el reactor anaerobio (Burgos, 2010). La ecuación utilizada para obtener la cantidad de metano, es:

$$M_{\max} = \frac{V_{CH_4}}{\text{Sustrato}_{total}} \dots\dots\dots(2-20)$$

(Burgos, 2010)

Donde:

M_{\max} = Cantidad máxima de metano obtenible

V_{CH_4} = Volumen de metano generado

Sustrato total = Cantidad de materia orgánica total utilizada en el proceso

2.9 Necesidades energéticas en granjas de México

Actualmente en México, el sector ganadero y de la agricultura van creciendo con una tendencia de crecimiento de consumo de energía. Esto tiene sus efectos negativos sobre la competitividad (costos) de los productos y sobre el medio ambiente (emisiones). La agricultura y la ganadería deben incorporar en su desarrollo y gestión, la eficiencia energética como un criterio básico para su viabilidad. Estos criterios permitirán reducir la emisión de contaminantes y la dependencia externa de la energía, para dar como consecuencia una mayor competitividad de sus productos al reducir costos. Para saber cuales son las necesidades energéticas en una granja, se deben considerar una serie de factores directamente implicados (AEE, 2005):

- Las condiciones climáticas de la región
- Las particularidades locales de la zona
- Las necesidades de ambiente en el interior de los corrales según especie, edad y estado fisiológico del ganado
- La relación costo-eficacia de los elementos y máquinas que conforman la instalación ganadera

Después de analizar detalladamente los puntos anteriores y haciendo una investigación particular, se tiene que las necesidades energéticas más comunes o en su caso las más

importantes en una granja son; ahorrar en el consumo de energía eléctrica y la máxima eficiencia en el aprovechamiento de la energía calorífica. A continuación se mencionan algunas actividades para mejorar la eficiencia y el ahorro energético en una granja:

- Aislamiento
 - Atender a las normas de aislamiento determinadas para cada tipo de especie ganadera.
 - No escatimar en la dotación de un buen nivel de aislamiento general.
 - Cuidar sobre todo, el aislamiento de la cubierta

- Iluminación
 - Sustituir lámparas incandescentes por fluorescentes.
 - Utilizar pinturas blancas o en tonos claros así como mantener limpia la superficie.
 - Revisar periódicamente la instalación, sin olvidar la limpieza de lámparas y luminarias (AEE, 2005).

- Estanqueidad
 - Cuidar las entradas de aire parásitas, pues aumenta el consumo en calefacción y afectan a la ventilación, creando zonas mal ventiladas.

- Revisión y mantenimiento de los equipos

Programar la revisión y mantenimiento de los equipos como un trabajo más, integrado en la planificación en el manejo general de los animales (AEE, 2005).

Capítulo 3. Estudio de caso

3.1 Centros de Enseñanza, Investigación y Extensión en Producción Animal en la UNAM

Los Centros de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia (FMVZ) de la UNAM, son espacios destinados a contribuir a la enseñanza, investigación y difusión de la producción animal a través del proveimiento de los modelos prácticos de ésta. La FMVZ cuenta con ocho Centros de Enseñanza Investigación y Extensión (CEIEP), atendiendo las especies de mayor interés pecuario en México: Bovinos lecheros, bovinos de carne, bovinos de doble propósito, ovinos, caprinos, cerdos, pollos de engorda, gallinas de postura, conejos, peces y abejas; e inclusive algunas especies exóticas de interés pecuario, tales como los ciervos y avestruces.

Las funciones de los centros son las siguientes:

- Apoyar a los departamentos académicos de la facultad en la enseñanza, investigación y difusión de los aspectos técnico, científicos y financieros de la producción animal.
- Desarrollar y difundir tecnología eficiente y adecuada de producción animal que coadyuve a la satisfacción de necesidades técnicas, económicas y ecológicas de sus áreas de influencia y del país.
- Informar a los departamentos relacionados con la producción animal sobre sus programas productivos para la coordinación con la ejecución de prácticas escolares.
- Atender a los estudiantes en prácticas escolares sobre tópicos en la producción animal.
- Elaborar un programa de producción, presupuesto y académico aprobados; por la Secretaría de Producción Animal.
- Conducir y/o asistir en la ejecución de proyectos de investigación aplicada a la resolución de problemas de la producción animal de interés nacional.

3.2 Centro de Enseñanza, Investigación y Extensión en Producción Agro-Silvo Pastoril (CEIEPASP)

El Centro de Enseñanza, Investigación y Extensión en Producción Agro-Silvo Pastoril (CEIEPASP) se encuentra dirigido desde el 2006 por el M. en C. MVZ Francisco Espinosa

Aviña, quien participa como responsable y asesor en el trabajo profesional y en el servicio social en el centro (FMVZ, 2011a). Las áreas de interés del centro son la gestión de sistemas sostenibles agropecuarios, forestales y de fauna silvestre y la ciencia del suelo. Este Centro se localiza sobre la carretera Atizapán – Jilotepec en el 68.5km, en pueblo llamado Chapa de Mota, que es la cabecera del municipio del mismo nombre, en el Estado de México. Dicho municipio se encuentra ubicado al norte del estado y colinda con los siguientes municipios: hacia el Norte con Jilotepec, al Sur con Morelos, al Este con Villa del Carbón y al Oeste con Timilpan y Morelos. Se ubica en la carta topográfica TEPEJI DEL RÍO E14A18, escala: 1:50 000 de INEGI. Para llegar al centro, se recomienda la ruta que va del D.F. pasando por Jilotepec (Ruta 1), aunque también se puede llegar por la ruta que pasa por Villa del Carbón (Ruta 2) (Figura 3.1). La vista panorámica de todo el terreno del CEIEPASP se ve en la Figura 3.2.

Ruta 1

Tomar en la Central de Autobuses del Norte, un autobús a Jilotepec, Edo. de México; esta central de autobuses está ubicada afuera de la estación llamada “*Central del Norte*” de la línea 5 (color amarillo) del metro. La línea de autobuses se llama “Viajero”, y está ubicada en el extremo norte de dicha central. Bajarse en la central de autobuses de Jilotepec, y ahí mismo, tomar un camión con destino a Chapa de Mota o a la estación “*Politécnico*” del metro. El CEIEPASP está ubicado al pasar la gasolinera y el panteón de Chapa de Mota, exactamente en la cuchilla que forman el libramiento y el bulevar del pueblo.

Ruta 2

Tomar un camión con dirección a Jilotepec, afuera de la estación “*Politécnico*” de la línea 5 (amarilla) del metro. Este camión pasa por Nicolás Romero, Villa del Carbón, y Chapa de Mota.

Ruta 3

Tomar un camión con dirección a “Chapa de Mota” afuera del andén “P” del metro “Cuatro Caminos” de la línea 2 (azul) del metro. Este camión pasa por Nicolás Romero, Villa del Carbón y llega a la base en Chapa de Mota. El centro está a 100 metros de la base, exactamente en la cuchilla que forman el libramiento y el bulevar del pueblo.

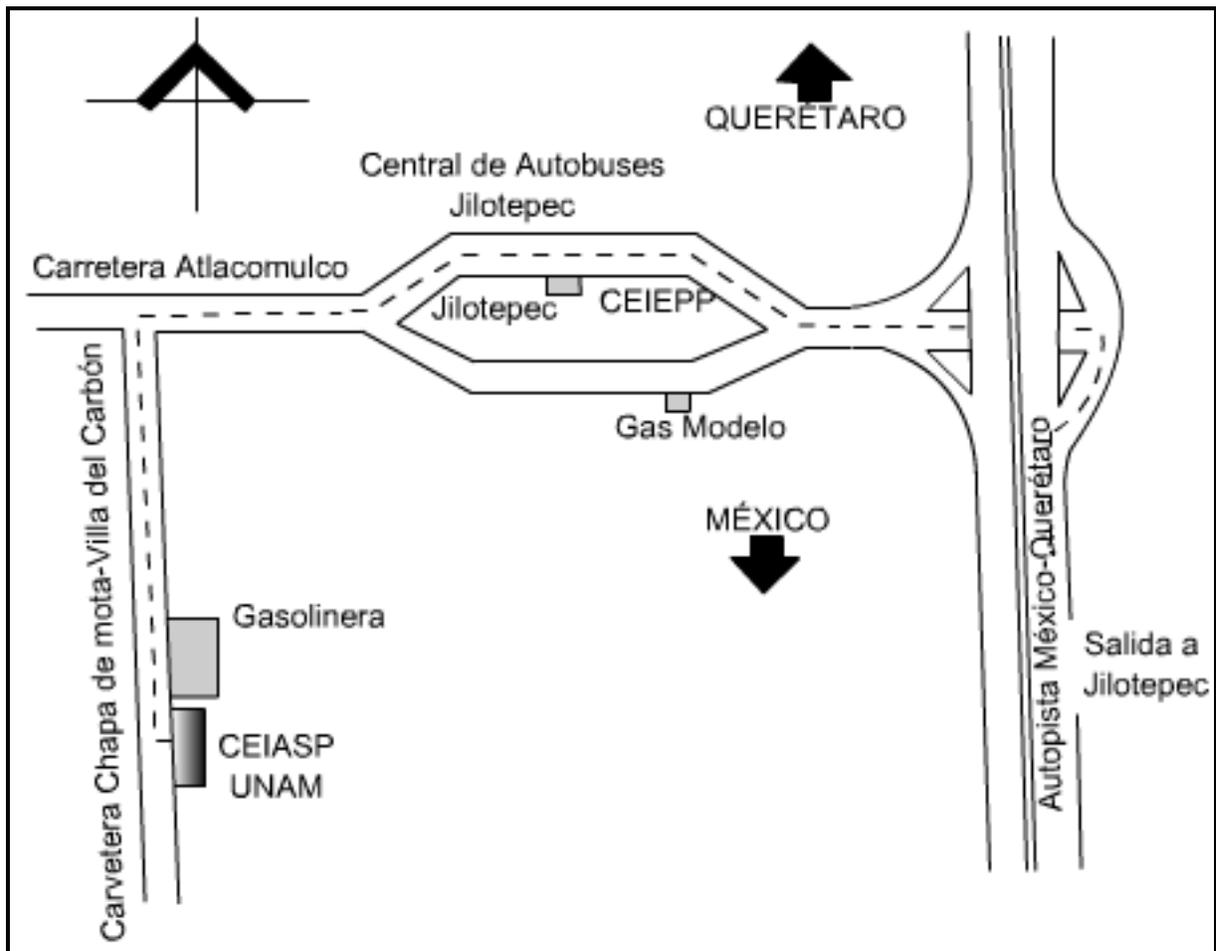


Figura 3.1 Croquis para llegar al CEIEPASP (FMVZ, 2011a)

El centro cuenta con 253 hectáreas, de las cuales 184.7 son de bosque de encino. Dicha superficie se encuentra bajo tratamiento de aprovechamiento forestal persistente de nivel intermedio trabajado con el método de ordenamiento de bosques irregulares (MMOBI). Permiso No. 207EI0000/029/2009-NI con fecha del 25 de junio de 2009.

Como compromiso del CEIEPASP, desde 1997, se reforesta anualmente con árboles de pino y encino (de 3,000 a 9,000 árboles por año), además se ha realizado la apertura de más de 5 km de brechas cortafuego, a las cuales cada año se les da mantenimiento. El bosque es vigilado continuamente para evitar la tala y la cacería furtivas. Se realizan prácticas para reducir la erosión en zonas de cárcavas. El Centro cuenta con 6 hectáreas de praderas inducidas (Rye grass, Festuca, Trébol blando y Trébol rojo), para pastoreo y henificación. Además, se tienen 15 hectáreas para cultivos de temporal, la mayoría dedicada a la producción de avena-ebo y una mínima parte a la siembra de maíz ya sea para ensilar o henificar (FMVZ, 2011a). En la Figura 3.3 se muestra una parte del terreno que usa el CEIEPASP para cultivos.



Figura 3.2 Vista panorámica del CEIEPASP (GMAPS, 2011)



Figura 3.3 Vista del terreno que se usa para cultivo temporal (FMVZ, 2011a)

3.3 Planos del lugar

Los planos del lugar se hicieron con base en las medidas realizadas en campo. Tienen la mayor exactitud posible que la vista y un flexómetro pueden brindar. En la Figura 3.4 están las medidas de cada uno de los corrales de estudio. A cada corral pertenece una especie: 1 porcinos, 2 ovinos, 3 ovinos, 4 ovinos, 5 equinos, 6 caprinos, 7 bovinos, 8 bovinos, 9 caprino y 10 equinos, los numeros 1.1 al 10.10 son corrales externos. Las medidas están expresadas en metros.

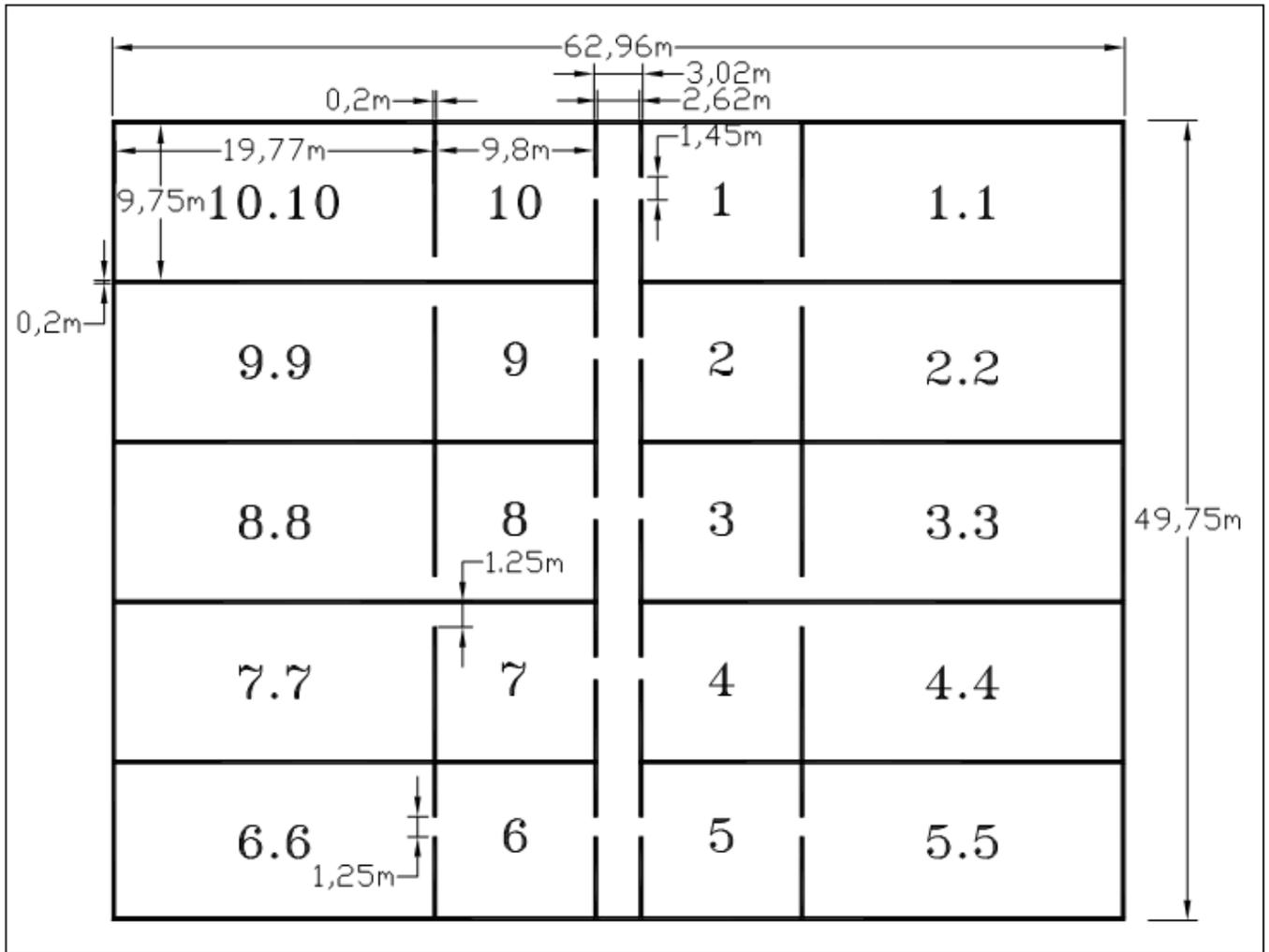


Figura 3.4 Planos de la nave en donde se tienen a los animales de estudio

En la Figura 3.5 se tienen las vistas aérea, horizontal, vertical y perpendicular de los corrales del CEIEPASP en 3D.

En la Figura 3.6 están los planos de los drenajes, que en este caso son tres los que rodean a la nave. El drenaje #1 proviene de la zona habitacional del mismo centro, el drenaje #3 atraviesa toda la nave ya que este forma parte del desagüe de las canaletas y el drenaje #2 es la unión del drenaje #1 y #3 y a la vez a la tubería principal del drenaje.

En la Figura 3.7 se muestran los cortes (A-B) y (C-B) y las mediciones que se hicieron al destapar los drenajes para encontrar a que profundidad están los registros respectivos. Estas medidas son de gran importancia ya que para el diseño del reactor anaerobio se debe considerar la profundidad del drenaje #2 y no estar por debajo de éste, para que en caso de que el lodo digerido no sea utilizado, pueda fluir por el drenaje fácilmente.

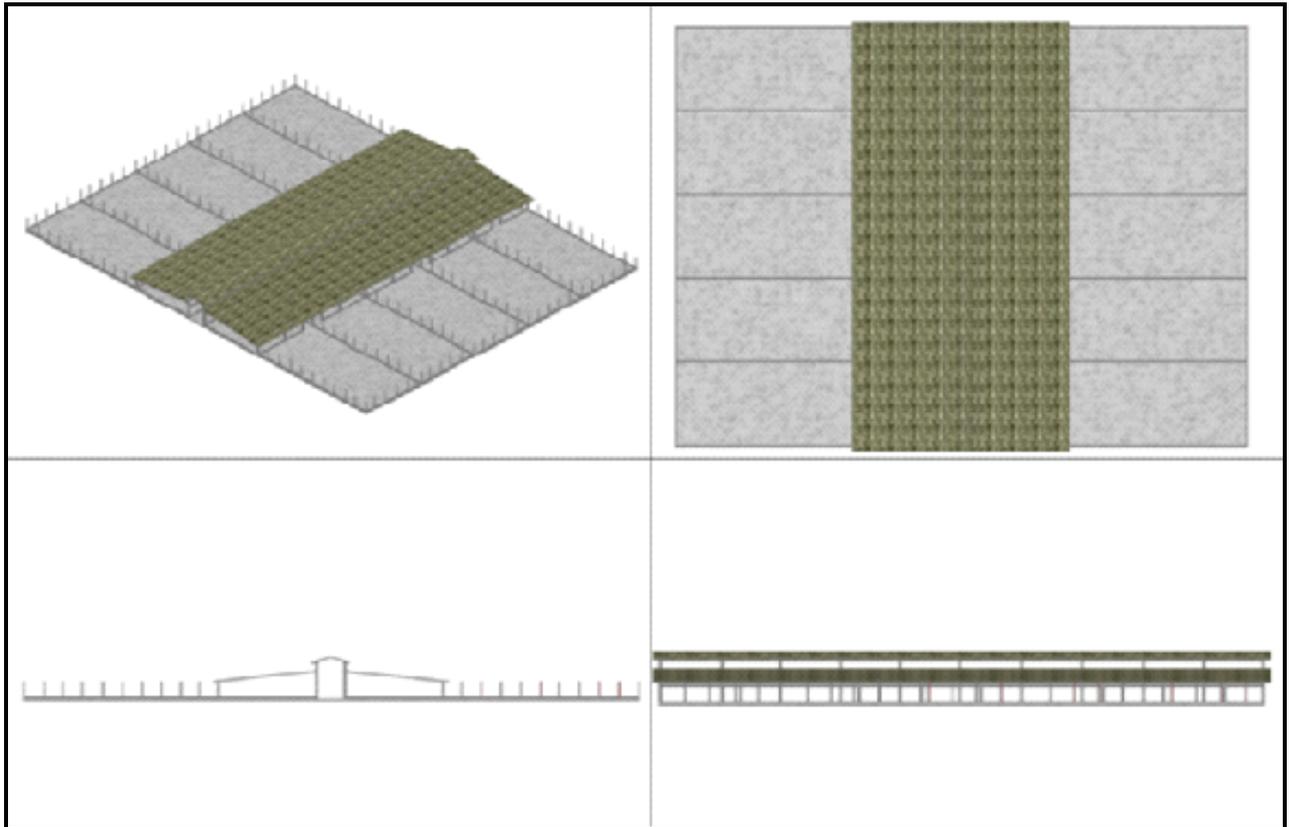


Figura 3.5 Modelado en 3D de la nave en donde se tienen a los animales de estudio

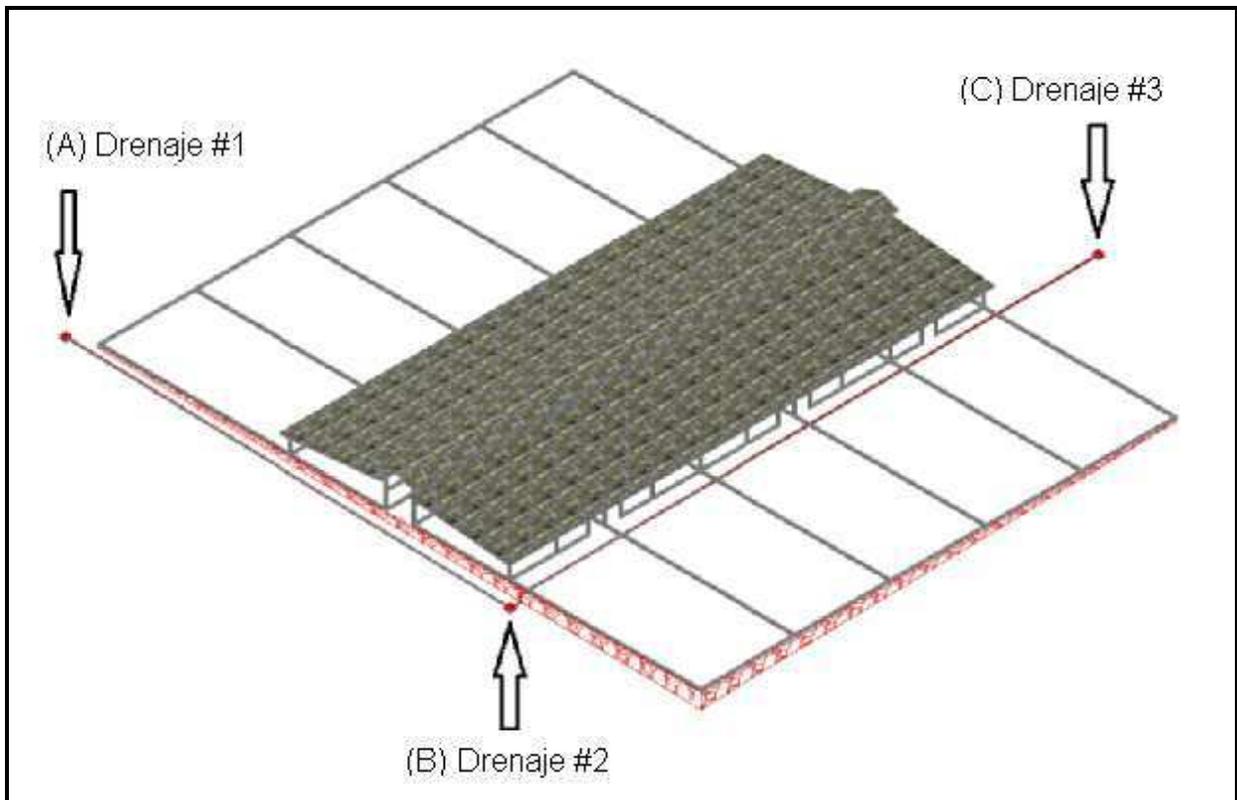


Figura 3.6 Planos en 3D de los drenajes de los corrales donde se tienen a los animales de estudio

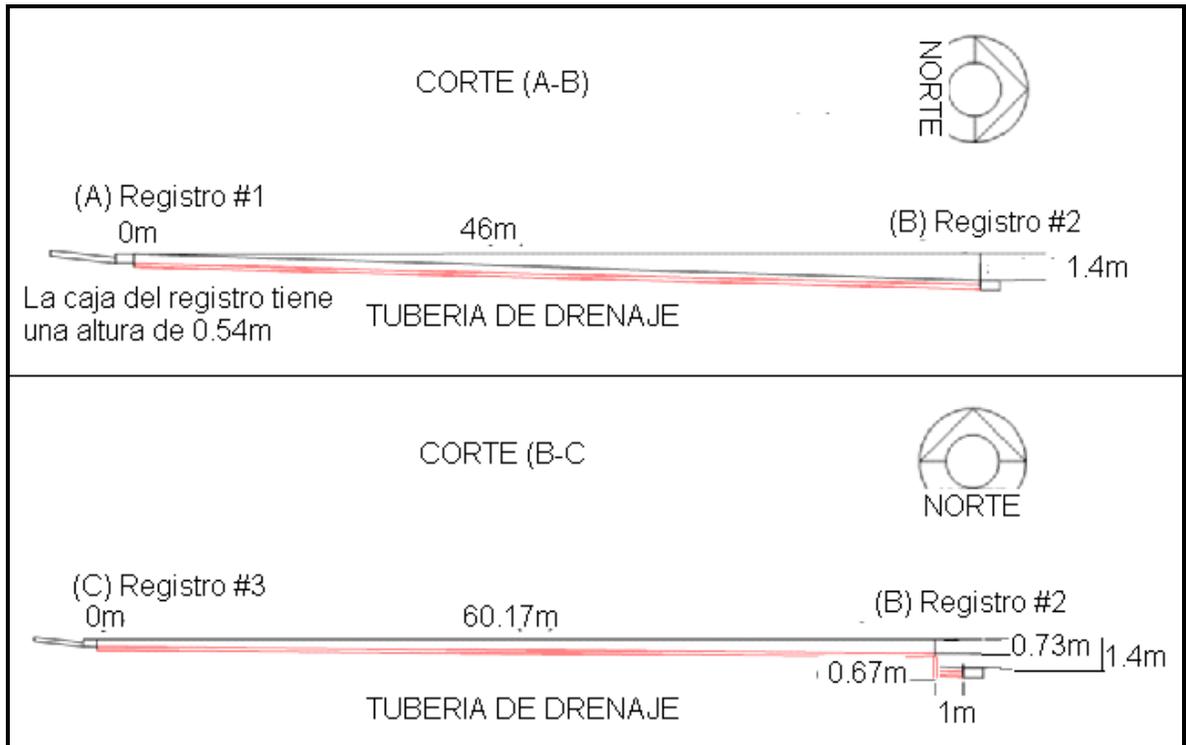


Figura 3.7 Planos de nivel de drenajes de los corrales donde están los animales de estudio

3.4 Estadísticas de población animal

Durante el año 2010:

En la Tabla 3.1 se muestra la población total de ganado ovino, en la Tabla 3.2 de ganado caprino, en la Tabla 3.3 de ganado bovino, en la Tabla 3.4 de ganado porcino, en la Tabla 3.5 la información del ganado equino y en la Tabla 3.6 del ganado avícola. En la Tabla 3.7 se observan los datos estadísticos de la población animal durante el año 2010. En la Figura 3.8 se muestra la grafica con la población total de animales durante el 2010.

Durante el año 2011:

En la Tabla 3.8 se muestra la población total de ganado ovino, en la tabla 3.9 de ganado caprino, en la Tabla 3.10 de ganado bovino, en la Tabla 3.11 de ganado porcino, en la Tabla 3.12 la información del ganado equino y en la Tabla 3.13 del ganado avícola. En la Tabla 3.14 se observan los datos estadísticos de la población animal durante el año 2011. En la Figura 3.9 se muestra la grafica con la población total de animales durante el 2011.

La cantidad total de animales en el CEIEPASP en los años 2010 y 2011 se muestra en la Figura 3.10.

Tabla 3.1 Población total de ganado ovino en el 2010

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA CENTRO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN EN PRODUCCIÓN AGROSILVOPASTORIL INFORME INVENTARIO 2010 OVINOS													
ESPECIE	TIPO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
O V I N O S	SEMENTALES	2	2	2	2	6	5	5	7	7	8	7	6
	VIENTRES	109	105	101	99	98	82	82	100	100	100	97	97
	MACHOS LACTANCIA	2	4	20	28	1	0	0	0	0	0	0	0
	HEMBRAS LACTANCIA	0	4	19	26	3	3	3	3	0	0	0	0
	MACHOS DESTETE	4	4	3	7	30	0	0	0	0	0	0	0
	HEMBRAS DESTETE	4	4	0	5	27	0	0	0	3	0	0	0
	TOTAL		121	123	145	167	165	90	90	110	110	108	104

62

Tabla 3.2 Población total de ganado caprino en el 2010

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA CENTRO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN EN PRODUCCIÓN AGROSILVOPASTORIL INFORME INVENTARIO 2010 CAPRINOS													
ESPECIE	TIPO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
C A P R I N O S	SEMENTALES	4	4	4	4	3	3	3	3	4	4	4	4
	VIENTRES	32	31	31	29	28	28	28	28	32	32	32	32
	CRÍAS MACHOS	7	7	16	18	18	4	3	0	0	0	0	0
	CRÍAS HEMBRAS	3	5	11	16	16	2	1	0	0	0	0	0
	MACHOS DESTETE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	HEMBRAS DESTETE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TOTAL		46	47	62	67	65	37	35	31	36	36	36

Tabla 3.3 Población total de ganado bovino en el 2010

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA CENTRO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN EN PRODUCCIÓN AGROSILVOPASTORIL INFORME INVENTARIO 2010 BOVINOS													
ESPECIE	TIPO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
B O V I N O S	VACAS	17	17	17	17	16	17	17	17	17	17	17	17
	MACHOS LACTANCIA	1	2	2	2	4	8	8	8	4	0	0	0
	HEMBRAS LACTANCIA	2	2	2	2	2	4	4	4	2	2	2	2
	SEMENTALES	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	MACHOS DESTETE	1	1	1	1	1	1	1	1	5	9	9	8
	HEMBRAS DESTETE	4	4	4	4	4	3	3	4	6	7	7	7
	TOTAL		26	27	27	27	28	34	34	35	35	36	36

63

Tabla 3.4 Población total de ganado porcino en el 2010

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA CENTRO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN EN PRODUCCIÓN AGROSILVOPASTORIL INFORME INVENTARIO 2010 PORCINOS													
ESPECIE	TIPO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
P O R C I N O S	SEMENTALES	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	VIENTRES	14	13	13	13	13	13	13	12	12	12	11	11
	LECHONES	0	28	75	5	30	20	15	36	34	25	7	18
	DESTETES	31	0	0	0	3	6	6	6	0	0	0	0
	DESARROLLO Y F.	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	4	4
TOTAL		46	42	89	19	47	40	35	55	53	44	23	34

Tabla 3.5 Población total de ganado equino en el 2010

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA CENTRO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN EN PRODUCCIÓN AGROSILVOPASTORIL INFORME INVENTARIO 2010 EQUINOS													
ESPECIE	TIPO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
E Q U I N O S	CABALLOS	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	POTRANCAS	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	YEGUAS	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2
	TOTAL	7	7	7	7	7	6	6	6	6	6	6	6

64

Tabla 3.6 Población total de ganado avícola en el 2010

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA CENTRO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN EN PRODUCCIÓN AGROSILVOPASTORIL INFORME INVENTARIO 2010 AVES													
ESPECIE	TIPO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
A V E S	POLLOS	12	0	0	105	80	0	0	0	0	0	0	0
	PAVOS	0	0	0	0	0	0	0	96	90	86	17	3
	TOTAL	12	0	0	105	80	0	0	96	90	86	17	3

Tabla 3.7 Población total de ganado en el CEIEPASP en el 2010

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA CENTRO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN EN PRODUCCIÓN AGROSILVOPASTORIL INFORME INVENTARIO 2010 TOTAL ANIMALES													
TIPO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	
TOTAL DE ANIMALES	258	246	330	392	392	207	200	333	330	316	222	217	

Tabla 3.8 Población total de ganado ovino en el 2011

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA CENTRO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN EN PRODUCCIÓN AGROSILVOPASTORIL INFORME INVENTARIO 2011 OVINOS													
ESPECIE	TIPO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
O V I N O S	SEMENTALES	6	5	5	5	5	5	5	5	5	ND	ND	ND
	VIENTRES	96	93	93	93	93	93	93	93	90	ND	ND	ND
	MACHOS LACTANCIA	0	0	13	27	30	29	0	0	0	ND	ND	ND
	HEMBRAS LACTANCIA	0	0	22	30	30	31	1	0	0	ND	ND	ND
	MACHOS DESTETE	0	0	0	0	0	0	26	19	18	ND	ND	ND
	HEMBRAS DESTETE	0	0	0	0	0	0	30	22	22	ND	ND	ND
	TOTAL	102	98	133	155	158	158	155	139	135	ND	ND	ND

Tabla 3.9 Población total de ganado caprino en el 2011

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA CENTRO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN EN PRODUCCIÓN AGROSILVOPASTORIL INFORME INVENTARIO 2011 CAPRINOS													
ESPECIE	TIPO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
CAPRINOS	SEMENTALES	4	3	3	3	3	3	3	3	3	ND	ND	ND
	VIENTRES	32	31	30	28	28	28	27	27	27	ND	ND	ND
	CRÍAS MACHOS	1	1	8	15	16	14	11	0	0	ND	ND	ND
	CRÍAS HEMBRAS	2	2	12	17	19	17	13	0	0	ND	ND	ND
	MACHOS DESTETE	0	0	0	0	0	0	0	11	11	ND	ND	ND
	HEMBRAS DESTETE	0	0	0	0	0	0	0	13	13	ND	ND	ND
	TOTAL		39	37	53	63	66	62	54	54	54	ND	ND

66

Tabla 3.10 Población total de ganado bovino en el 2011

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA CENTRO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN EN PRODUCCIÓN AGROSILVOPASTORIL INFORME INVENTARIO 2011 BOVINOS													
ESPECIE	TIPO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
BOVINOS	VACAS	17	7	0	0	0	10	10	10	10	ND	ND	ND
	MACHOS LACTANCIA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ND	ND	ND
	HEMBRAS LACTANCIA	3	3	0	0	0	0	0	2	2	ND	ND	ND
	SEMENTALES	1	0	0	0	0	0	0	0	1	ND	ND	ND
	MACHOS DESTETE	8	2	0	0	0	0	0	0	0	ND	ND	ND
	HEMBRAS DESTETE	7	5	0	0	0	10	10	10	10	ND	ND	ND
	TOTAL		36	17	0	0	0	20	20	22	23	ND	ND

Tabla 3.11 Población total de ganado porcino en el 2011

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA CENTRO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN EN PRODUCCIÓN AGROSILVOPASTORIL INFORME INVENTARIO 2011 PORCINOS													
ESPECIE	TIPO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
P O R C I N O S	SEMENTALES	1	1	1	1	1	1	1	2	2	ND	ND	ND
	VIENTRES	11	12	12	12	12	12	12	12	18	ND	ND	ND
	LECHONES	46	34	20	14	15	28	16	12	17	ND	ND	ND
	DESTETES	0	8	0	10	10	10	24	16	4	ND	ND	ND
	DESARROLLO Y F.	2	1	8	8	8	8	10	17	9	ND	ND	ND
	TOTAL		60	56	41	45	46	59	63	59	50	ND	ND

Tabla 3.12 Población total de ganado equino en el 2011

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA CENTRO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN EN PRODUCCIÓN AGROSILVOPASTORIL INFORME INVENTARIO 2011 EQUINOS													
ESPECIE	TIPO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
E Q U I N O S	CABALLOS	2	2	2	2	2	2	2	2	2	ND	ND	ND
	POTRANCAS	2	2	2	2	1	1	1	1	1	ND	ND	ND
	YEGUAS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	ND	ND	ND
	TOTAL		5	5	5	5	4	4	4	4	4	ND	ND

Tabla 3.13 Población total de ganado avícola en el 2011

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA CENTRO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN EN PRODUCCIÓN AGROSILVOPASTORIL INFORME INVENTARIO 2011 AVES													
ESPECIE	TIPO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
A V E S	POLLOS	0	150	86	61	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	PAVOS	3	0	0	0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	TOTAL	3	150	86	61	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Tabla 3.14 Población total de ganado dentro del CEIEPASP en el 2011

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA CENTRO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN EN PRODUCCIÓN AGROSILVOPASTORIL INFORME INVENTARIO 2011 TOTAL ANIMALES													
TIPO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	
TOTAL DE ANIMALES	245	363	318	329	274	303	296	278	266	ND	ND	ND	

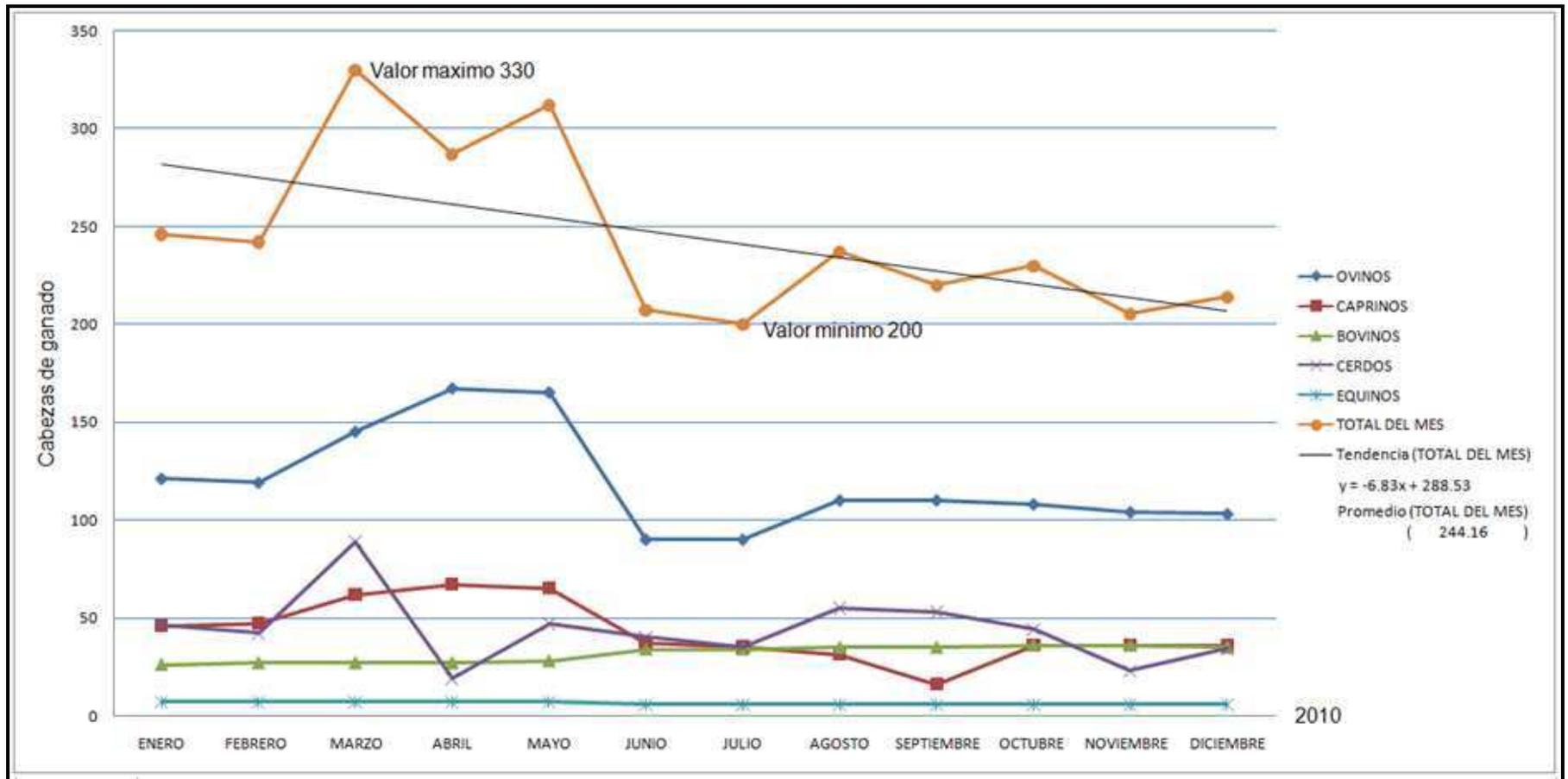


Figura 3.8 Población de animales en el 2010

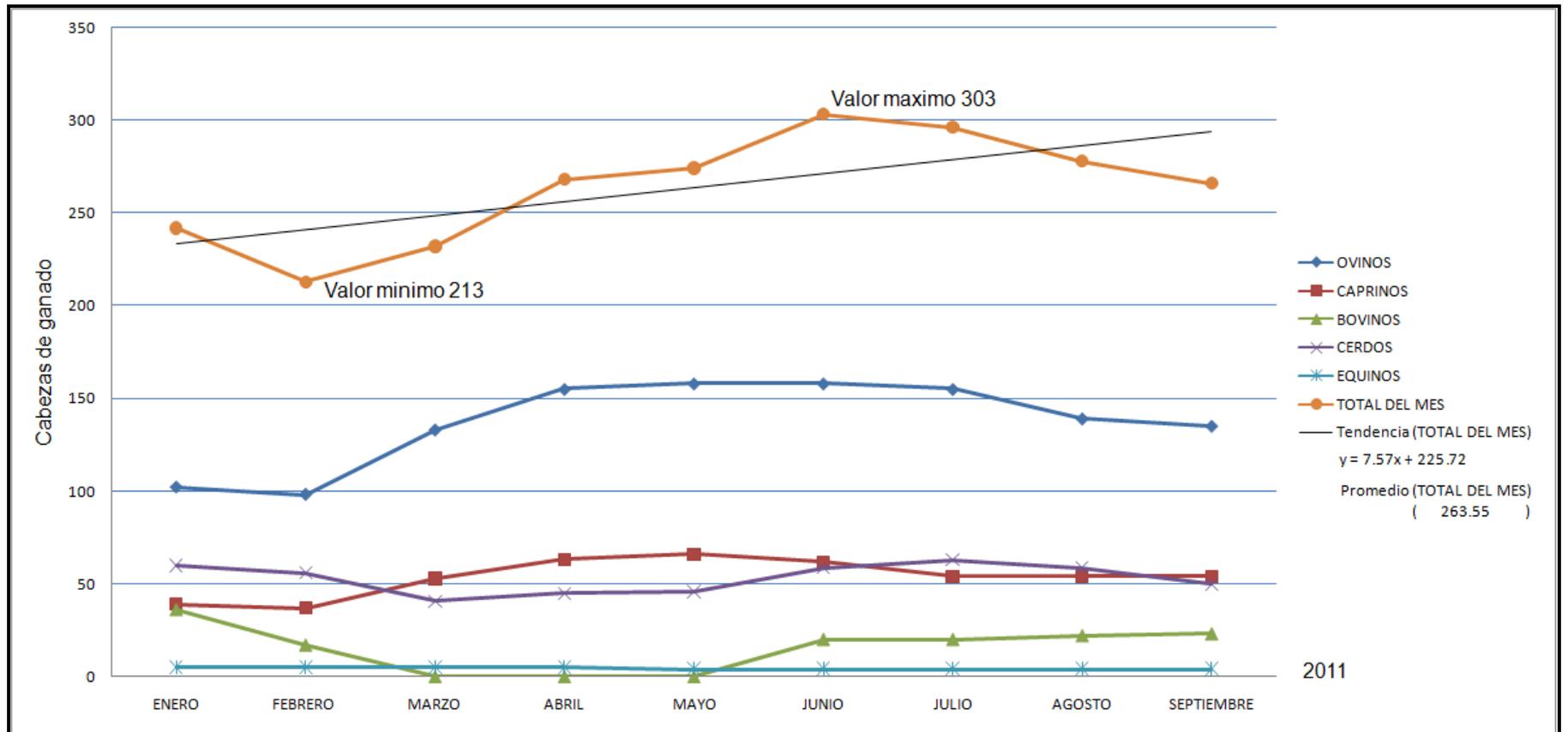


Figura 3.9 Población de animales en el 2011

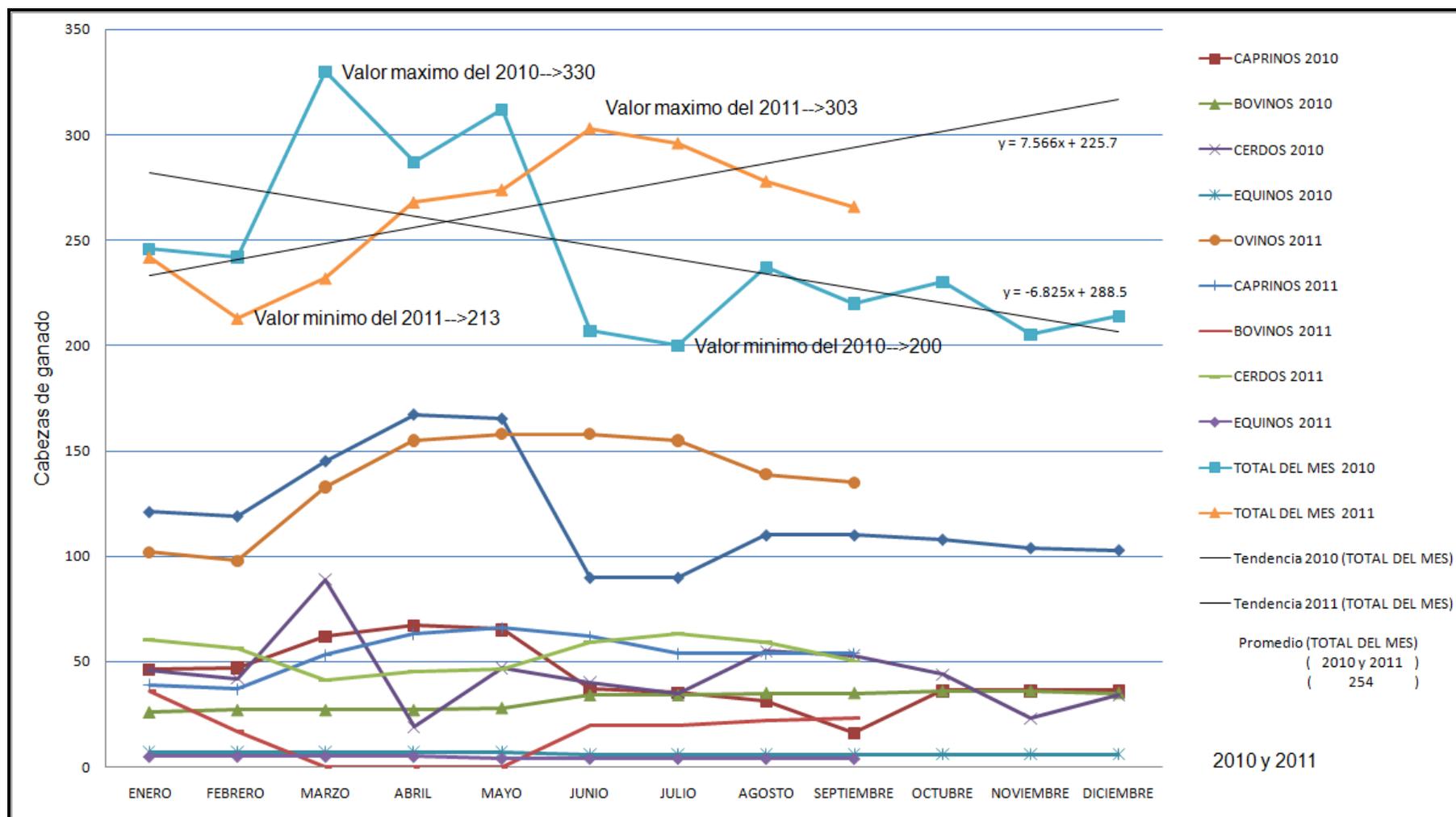


Figura 3.10 Población total de animales durante los años 2010 y 2011

3.5. Clima e hidrología

El clima de la región está definido como templado subhúmedo (Figura 3.11) y presenta temperaturas extremas en invierno y principios de primavera (temperaturas mínimas de hasta -14°C y máximas de hasta 40°C). Tiene un régimen pluvial de primavera-verano con promedios de 1,100 mm anuales-. Las heladas comienzan en octubre y finalizan en la primera quincena de abril.



Figura 3.11 Clima del estado de México (INEGI, 2011)

3.6. Problemática del caso de estudio

La problemática actual del CEIEPASP radica principalmente desde el manejo de excremento hasta el pago de la factura del consumo de energía eléctrica y de gas LP. Los excrementos de los animales actualmente son utilizados para estercolar la tierra y para la elaboración de composta, el excremento diariamente se recoge y se almacena para su posterior uso. Por otro lado, los pagos de los consumos de energía eléctrica y gas LP en promedio son “normales” pero la problemática es, reducir el costo del producto utilizado en las instalaciones que tiene el CEIEPASP para un beneficio del mismo (FMVZ, 2011b).

Capítulo 4. Metodología

4.1 Manejo actual de excrementos en el CEIEPASP

Las actividades de limpieza en el CEIEPASP comienzan a las 8:00am. Los trabajadores del mismo se encargan de barrer diariamente todas las instalaciones, incluyendo la nave en donde se albergan casi todos los animales (se excluye el sector maternal, la población enferma y de pie de cría) en diferentes corrales por especie. En la Figura 4.1 se muestra la nave (corrales) donde se alojan los animales durante la noche y es donde recolectan las heces fecales por la mañana siguiente cuando retiran a los animales a pastorear.



Figura 4.1 Vista de la nave en donde se resguardan los animales

Las tareas que se realizan para el manejo actual de los excrementos en ésta nave son regulares y de forma constante y son las siguientes:

La hora de inicio de actividades en el CEIEPASP es aproximadamente a las 8:00am. Como primer paso para iniciar la tarea de limpieza, es retirar los animales de los corrales para llevarlos a pastorear. Después de la actividad anterior, los corrales ya están desocupados para poder comenzar la remoción del excremento, se empieza a barrer y acumular éste, aproximadamente a las 9:30am.

Una vez acumulado el excremento en cada uno de los corrales, se recoge con palas de albañilería para ser depositado en una carretilla de 0.1416 m³.

En la Figura 4.2 se visualiza la forma de recoger los excrementos de los animales, para su posterior acumulación en el corral externo 5.5 que se observa en la Figura 4.3.



Figura 4.2 Forma de recolección del excremento

La función de la carretilla es trasladar el excremento de cada corral, al corral #5 en su parte externa, donde se deposita con el fin de manejarlo más cómodamente para su posterior uso, el cual es, abonar la tierra a donde se llevan los animales a pastorear. En todo el proceso de recolección se trasladan en total, de 6 a 8 carretillas por todos los animales (aproximadamente de 0.8495 m³ a 1.1327 m³) al día.

La Figura 4.3 es el corral externo 5.5 donde se acumulan todas las heces fecales de los animales de la nave para su posterior uso del centro CEIEPASP.



Figura 4.3 Parte exterior del corral #5

Todo el proceso de recolección y limpieza de los corrales tiene una duración aproximada de 5 horas. Para las 3:00pm, los corrales ya se encuentran limpios y preparados para la llegada del ganado, donde éste permanecerá hasta las 8:00am del día siguiente.

4.2 Propuesta de manejo de excrementos en el CEIEPASP

La propuesta de manejo de excrementos en el CEIEPASP modifica la última parte del proceso actual de su manejo. Para llevar a cabo la correcta alimentación del reactor anaerobio ya no será necesario almacenar los excrementos en el exterior del corral #5 a la intemperie; sino en un contenedor cercano a la pared junto a la puerta de éste, con un volumen de 3 m³ donde se almacenará la mezcla de excremento y agua. Éste se llenará con ayuda de una rampa para descargar las carretillas en él.

4.3 Pruebas de laboratorio

Para realizar las pruebas de laboratorio se recolectó una muestra de excremento de cada especie de ganado en el CEIEPASP, las cuales fueron de tipo ovino, caprino, bovino, porcino y equino, ocupando un recipiente de vidrio transparente de un volumen aproximado de un litro cada uno para almacenarlas y así hacer su estudio correspondiente en el laboratorio como pH, densidad, sólidos totales (ST), sólidos fijos (SF) y sólidos volátiles (SV) (Figura 4.4 y 4.5).



Figura 4.4 Recipientes para las tomas de muestras

Esto se realizó después de que se retiraron los animales de los corrales (~8:00am) y antes que se empezara a barrer (~9:30am), para así tener las muestras intactas.

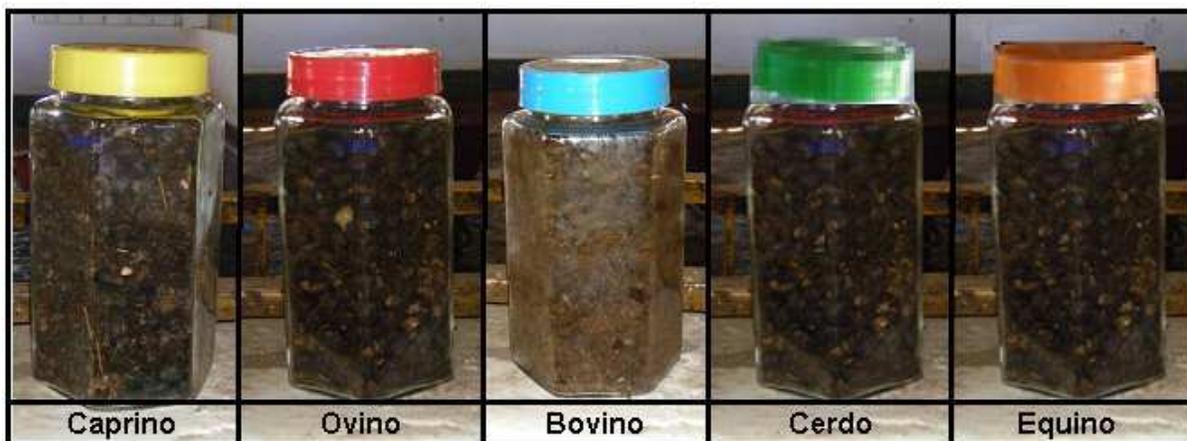


Figura 4.5 Frascos con muestras de excrementos de cada tipo de animal.

Para determinar la cantidad y el porcentaje de sólidos totales, fijos y volátiles se uso el protocolo APHA y la NOM-AA-34-1981. En las Tablas 4.1 y 4.2 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 4.1 Resultados obtenidos en el laboratorio

Especie	pH	Densidad (g/ml)	Muestra (g)	Volumen (ml)	ST (g)	STF (g)	STV (g)
Ovino	7	0.44	3.88	8.89	1.27	0.51	0.76
Caprino	8	0.25	2.00	8.15	0.50	0.11	0.39
Bovino	7	0.87	8.17	9.41	1.32	0.26	1.06
Porcino	7	0.22	3.09	14.06	2.01	1.00	1.01
Equino	7	0.35	2.53	7.20	0.70	0.11	0.59

Tabla 4.2 Porcentaje de cada especie en STF y STV

Especie	%ST	%STF	%STV	%STF
Ovino	32.77	40.08	59.92	32.00
Caprino	24.88	21.59	78.41	32.00
Bovino	16.15	19.99	80.01	20.00
Porcino	64.89	49.80	50.20	18.00
Equino	27.59	16.00	84.00	25.00
(Brambila,2008)				

Por otro lado, para obtener el porcentaje total de materia orgánica seca (%ST) se divide la cantidad total de las muestras entre el valor de la suma de todos los sólidos totales.

Tabla 4.3 Porcentaje de ST en la muestra

Muestra (g)	Materia Orgánica Seca (ST) (g)	% ST en la muestra
19.67	5.79	29.45

En la Tabla 4.4 se muestra la producción de biogás del excremento de cada especie de ganado.

Tabla 4.4 Cantidad de biogás producida por especie de ganado

Especie	Biogás (m ³ /kg)	Biogás (m ³ /kg)	Biogás (m ³ /kg)
Ovino	0.05	0.05	-
Caprino	0.06	0.05	-
Bovino	0.06	0.04	0.04
Porcino	0.04	0.06	0.06
Equino	0.06	0.04	0.04
Promedio total	0.05	0.048	0.046
Referencia	Laboratorio	(Martínez, 2011)	(Alcalde, 2009)

4.4 Diagrama de metodología propuesta

Una vez obtenidos los desechos, se analizarán en el laboratorio para obtener la producción de biogás generado por animal y, compararla con la cantidad esperada de generación de biogás, previamente calculada con base en producciones teóricas, producidas por desechos de animales. Esta comparación tiene la finalidad de saber la producción de biogás y, diseñar el

reactor anaerobio. Después del diseño del reactor se calculará la energía eléctrica y calorífica que se producirá por el biogás generado, la factibilidad ambiental y la factibilidad económica. En la Figura 4.6 se muestra el diagrama resumiendo lo anterior.

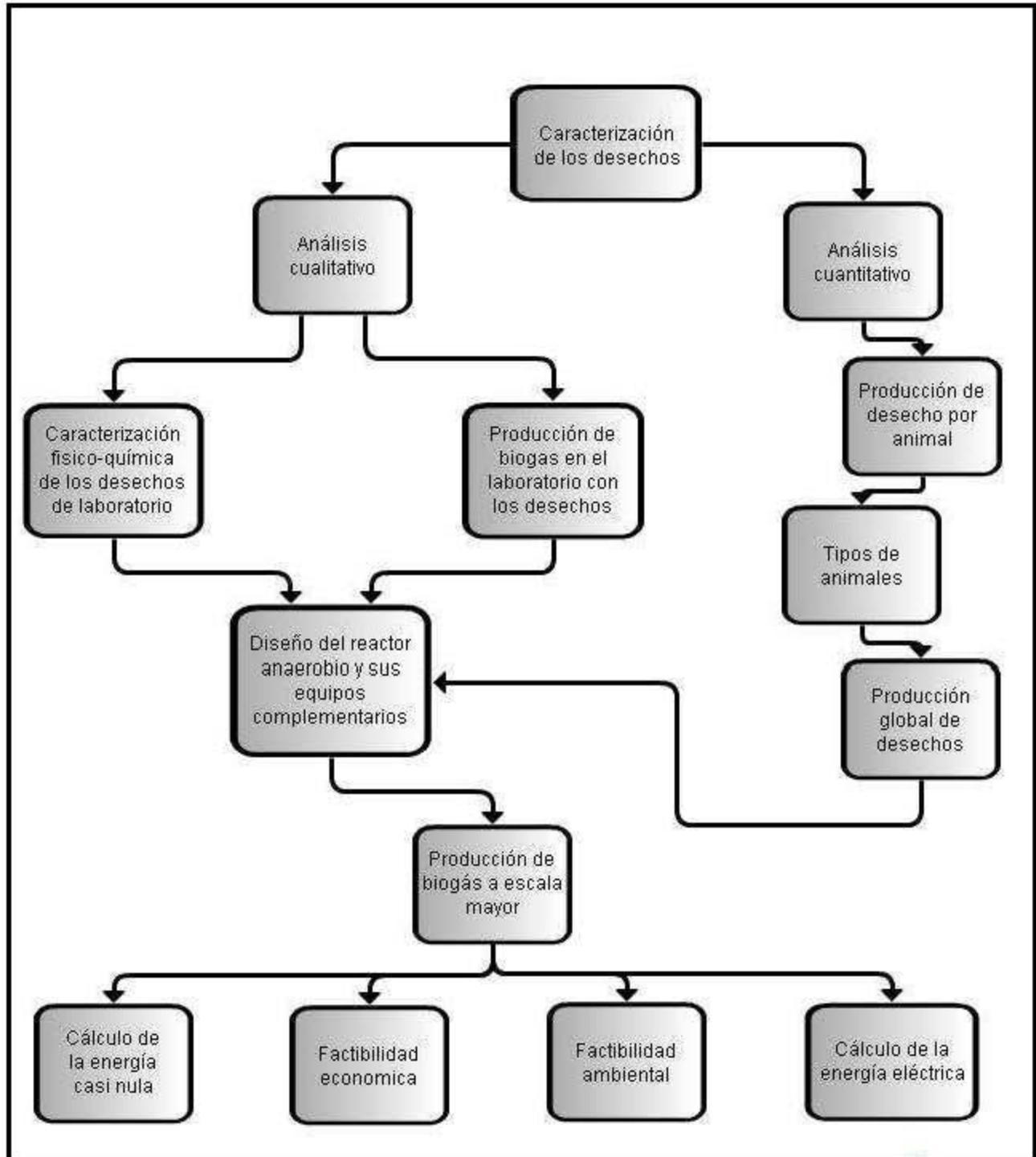


Figura 4.6 Diagrama de metodología propuesta.

Capítulo 5. Resultados

5.1 Determinación cuantitativa de desechos pecuarios en el CEIEPASP

Es necesario saber la cantidad exacta de los desechos pecuarios que se generan en el CEIEPASP. Se sacaron resultados parciales y, en combinación con algunas constantes de datos estadísticos proporcionados por el centro, se obtuvieron resultados finales. Estos resultados, fueron utilizados para llevar a cabo el diseño de todas las unidades que conforman la planta de biogás.

Sin las cantidades de desecho, sería poco confiable el diseño del reactor anaerobio, puesto que se tendría un escenario a base de estimados y aseveraciones dando lugar a problemas en cualquier momento. La Figura 5.1 muestra como se efectúa la recolecta del excremento de los animales para su posterior uso.



Figura 5.1 Carretilla usada para el transporte del excremento en el CEIEPASP

a) Población total del año 2010

La Tabla 5.1, se toman solamente aquellos animales que son de gran relevancia para el CEIEPASP y que pueden contribuir de gran manera en el reactor anaerobio. Se excluyó el ganado avícola por ser pequeño y no estar dentro de los corrales de estudio. Por otro lado, aunque los animales enfermos y en lactancia se tienen en otra nave ajena a la de estudio, no se toman en cuenta pues su aparición durante el año y la cantidad de éstos son cantidades mínimas, casi despreciables.

a.1) Estimación mensual

La Tabla 5.2 muestra los resultados de recolecta de excrementos en un día normal en el CEIEPASP, se hizo una aproximación de la cantidad de excrementos arrojada en un mes.

La Figura 5.2, muestra una gráfica con la tendencia que sigue la recolecta de excrementos.

a.2) Estimación por día

En la Tabla 5.3 se tiene un aproximado a la cantidad de excrementos que arroja diario la población de ganado. Oscila entre 605 a 759 Kg en total por toda la población de ganado de todas las especies. Se puede observar en la Figura 5.3 que los valores arrojados diariamente de excrementos corresponden a la misma tendencia que se sigue en cada mes. Solo varía la cantidad de días que éste tiene, más no la cantidad arrojada por los animales.

a.3) Porcentaje al día

En la Tabla 5.4, se obtuvo el porcentaje que arroja cada especie al día de excremento y analizando este dato, se observa el porcentaje mayoritario. Éste pertenece al ganado bovino, seguido del ovino, caprino, equino y porcino. La variación de las cantidades porcentuales depende del número de animales, tamaño y población.

a.4) Números de carretillas

Por otro lado en la Tabla 5.5 se muestra el número de carretillas al día y este dato, es la medida de volumen utilizada para aproximar la cantidad de excrementos arrojados por el ganado de nuestro estudio. Este número por día oscila entre 7 y 8 carretillas en total por todas las especies.

b) Población total de enero hasta septiembre del 2011

Al igual que en el año 2010, se toman solamente aquellos animales que son de gran relevancia para el CEIEPASP y que pueden contribuir de gran manera en el reactor anaerobio (se excluyó el ganado avícola por ser pequeño y no estar dentro de los corrales de estudio). Los animales enfermos y en lactancia se tienen en otra nave ajena a la de estudio y no se toman en cuenta pues su aparición durante el año y la cantidad de éstos son cantidades mínimas, casi despreciables.

No se tienen registros de octubre, noviembre y diciembre dado que hasta la fecha actual de nuestro caso de estudio, aún no transcurre ese periodo.

En la Tabla 5.6 se observa que el total de los animales con respecto al año pasado no hay gran diferencia haciendo factible el caso de estudio. ND representa que en los meses Octubre, Noviembre y Diciembre no se tenían los datos correspondientes.

b.1) Estimación mensual

La Tabla 5.7 muestra al igual que en el año anterior un día normal en el CEIEPASP de recolecta de excrementos, se hizo una aproximación de la cantidad de excrementos arrojada en un mes. El ganado bovino en los meses de marzo, abril y mayo, no presentan cantidad de excretas alguna dado que no se tenía población en el CEIEPASP de esos animales (Tabla 5.6).

En la Figura 5.4, se observa en la grafica claramente el decaimiento de las cantidades de excrementos arrojados por el ganado bovino al ausentarse parcialmente durante 3 meses.

b.2) Estimación por día

Al igual que en el año 2010, en la Tabla 5.8 se tiene un aproximado a la cantidad de excrementos que arroja diario la población de ganado. Oscila entre 162 Kg y 756 Kg. Tiene un rango más alto de variación con respecto al año anterior dado a la ausencia del ganado bovino.

Se puede observar en la Figura 5.5, los valores arrojados diariamente de excrementos corresponden a la misma tendencia que se sigue en cada mes, pues solo varia la cantidad de días que éste tiene más no la cantidad arrojada por los animales.

b.3) Porcentaje al día por especie, desde enero hasta septiembre del 2011.

La Tabla 5.9, se obtiene el porcentaje que arroja cada especie al día de excremento y analizando este dato, se observa el porcentaje mayoritario, éste pertenece al ganado bovino, seguido del ovino, caprino, equino y porcino. La variación de las cantidades porcentuales depende del número de animales, tamaño y población.

b.4) Números de carretillas diarias desde enero hasta septiembre del 2011.

Por otro lado, en la Tabla 5.10 se muestra el número de carretillas al día. En este año, el número por día oscila entre 4 y 8 carretillas en total por todas las especies. Mermó la ausencia de 3 meses del ganado bovino.

La cantidad total de excremento generado por los animales en el CEIEPASP en los años 2010 y 2011, se muestra en la Figura 5.6.

Tabla 5.1 Inventario de animales del CEIEPASP en el 2010

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA CENTRO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN EN PRODUCCIÓN AGROSILVOPASTORIL INFORME INVENTARIO 2010												
ESPECIE	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
OVINOS	121	119	145	167	165	90	90	110	110	108	104	103
CAPRINOS	46	47	62	67	65	37	35	31	16	36	36	36
BOVINOS	26	27	27	27	28	34	34	35	35	36	36	35
PORCINOS	46	42	89	19	47	40	35	55	53	44	23	34
EQUINOS	7	7	7	7	7	6	6	6	6	6	6	6
TOTAL DEL MES	246	242	330	287	312	207	200	237	220	230	205	214

Tabla 5.2 Cantidad promedio de excrementos por mes durante el 2010

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA CENTRO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN EN PRODUCCIÓN AGROSILVOPASTORIL CANTIDAD DE EXCREMENTOS POR MES DE (Kg) 2010												
ESPECIE Kg	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
OVINOS	3,492.64	3,102.50	4,185.40	4,664.92	4,762.69	2,514.03	2,597.83	3,175.13	3,072.70	3,117.40	2,905.10	2,973.07
CAPRINOS	1,782.50	1,645.00	2,402.50	2,512.50	2,518.75	1,387.50	1,356.25	1,201.25	600.00	1,395.00	1,350.00	1,395.00
BOVINOS	17,660.88	16,565.29	18,340.15	17,748.53	19,019.41	22,350.00	23,095.00	23,774.26	23,007.35	24,453.53	23,664.71	23,774.26
PORCINOS	63.66	52.50	123.17	25.45	65.04	53.57	48.44	76.12	70.98	60.89	30.80	47.05
EQUINOS	434.00	392.00	434.00	420.00	434.00	360.00	372.00	372.00	360.00	372.00	360.00	372.00
TOTAL DEL MES	23,433.68	21,757.29	25,485.21	25,371.40	26,799.90	26,665.10	27,469.52	28,598.76	27,111.04	29,398.82	28,310.61	28,561.39

Tabla 5.3 Cantidad de excremento promedio diario durante el 2010

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA CENTRO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN EN PRODUCCIÓN AGROSILVOPASTORIL CANTIDAD (Kg) DE EXCREMENTO POR DÍA EN EL MES DURANTE EL 2010												
ESPECIE Kg/día	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
OVINOS	112.67	110.80	135.01	155.50	153.64	83.80	83.80	102.42	102.42	100.56	96.84	95.91
CAPRINOS	57.50	58.75	77.50	83.75	81.25	46.25	43.75	38.75	20.00	45.00	45.00	45.00
BOVINOS	569.71	591.62	591.62	591.62	613.53	745.00	745.00	766.91	766.91	788.82	788.82	766.91
PORCINOS	2.05	1.88	3.97	0.85	2.10	1.79	1.56	2.46	2.37	1.96	1.03	1.52
EQUINOS	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
TOTAL DEL DIA	755.93	777.05	822.10	845.71	864.51	888.84	886.11	922.54	903.70	948.35	943.69	921.34

Tabla 5.4 Porcentaje de excrementos diarios por especie dentro del CEIEPASP en el 2010

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA CENTRO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN EN PRODUCCIÓN AGROSILVOPASTORIL PORCENTAJE DE EXCREMENTOS AL DÍA POR ESPECIE 2010												
ESPECIE (%)	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
OVINOS	14.90	14.26	16.42	18.39	17.77	9.43	9.46	11.10	11.33	10.60	10.26	10.41
CAPRINOS	7.61	7.56	9.43	9.90	9.40	5.20	4.94	4.20	2.21	4.75	4.77	4.88
BOVINOS	75.37	76.14	71.96	69.95	70.97	83.82	84.08	83.13	84.86	83.18	83.59	83.24
PORCINOS	0.27	0.24	0.48	0.10	0.24	0.20	0.18	0.27	0.26	0.21	0.11	0.16
EQUINOS	1.85	1.80	1.70	1.66	1.62	1.35	1.35	1.30	1.33	1.27	1.27	1.30
TOTAL DEL DIA	100.00											

Tabla 5.5 Cantidad de carretillas por especie al día en el 2010

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA CENTRO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN EN PRODUCCIÓN AGROSILVOPASTORIL CANTIDAD DE CARRETIILLAS POR ESPECIE AL DÍA EN 2010												
ESPECIE	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
OVINOS	1.85	1.82	2.22	2.56	2.53	1.38	1.38	1.68	1.68	1.65	1.59	1.58
CAPRINOS	1.24	1.27	1.68	1.81	1.76	1.00	0.95	0.84	0.43	0.97	0.97	0.97
BOVINOS	3.82	3.97	3.97	3.97	4.12	5.00	5.00	5.15	5.15	5.29	5.29	5.15
PORCINOS	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
EQUINOS	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
TOTAL DEL DIA	7.01	7.15	7.97	8.42	8.49	7.45	7.40	7.75	7.34	8.00	7.93	7.77

84

Tabla 5.6 Inventario de animales del CEIEPASP en el 2011

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA CENTRO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN EN PRODUCCIÓN AGROSILVOPASTORIL INFORME INVENTARIO 2011												
ESPECIE	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
OVINOS	102	98	133	155	158	158	155	139	135	ND	ND	ND
CAPRINOS	39	37	53	63	66	62	54	54	54	ND	ND	ND
BOVINOS	36	17	0	0	0	20	20	22	23	ND	ND	ND
PORCINOS	60	56	41	45	46	59	63	59	50	ND	ND	ND
EQUINOS	5	5	5	5	4	4	4	4	4	ND	ND	ND
TOTAL DEL MES	242	213	232	268	274	303	296	278	266	ND	ND	ND

Tabla 5.7 Cantidad promedio mensual de excrementos animales en el CEIEPASP durante el 2011

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA CENTRO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN EN PRODUCCIÓN AGROSILVOPASTORIL CANTIDAD DE EXCREMENTOS POR MES (Kg) EN 2011												
ESPECIE Kg	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
OVINOS	2,944.21	2,555.00	3,839.02	4,329.72	4,560.64	4,413.52	4,474.04	4,012.21	3,771.05	ND	ND	ND
CAPRINOS	1,511.25	1,295.00	2,053.75	2,362.50	2,557.50	2,325.00	2,092.50	2,092.50	2,025.00	ND	ND	ND
BOVINOS	24,453.53	10,430.00	0.00	0.00	0.00	13,147.06	13,585.29	14,943.82	15,119.12	ND	ND	ND
PORCINOS	83.04	70.00	56.74	60.27	63.66	79.02	87.19	81.65	66.96	ND	ND	ND
EQUINOS	310.00	280.00	310.00	300.00	248.00	240.00	248.00	248.00	240.00	ND	ND	ND
TOTAL DEL MES	29,302.02	14,630.00	6,259.51	7,052.49	7,429.80	20,204.60	20,487.02	21,378.18	21,222.13	ND	ND	ND

Tabla 5.8 Cantidad promedio diaria de excrementos animales dentro del CEIEPASP en el 2011

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA CENTRO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN EN PRODUCCIÓN AGROSILVOPASTORIL CANTIDAD (Kg) DE EXCREMENTOS POR DÍA EN EL MES DUANTE 2011												
ESPECIE Kg/dia	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
OVINOS	94.97	91.25	123.84	144.32	147.12	147.12	144.32	129.43	125.70	ND	ND	ND
CAPRINOS	48.75	46.25	66.25	78.75	82.50	77.50	67.50	67.50	67.50	ND	ND	ND
BOVINOS	788.82	372.50	0.00	0.00	0.00	438.24	438.24	482.06	503.97	ND	ND	ND
PORCINOS	2.68	2.50	1.83	2.01	2.05	2.63	2.81	2.63	2.23	ND	ND	ND
EQUINOS	10.00	10.00	10.00	10.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	ND	ND	ND
TOTAL DEL MES	945.23	522.50	201.92	235.08	239.67	673.49	660.87	689.62	707.40	ND	ND	ND

Tabla 5.9 Porcentaje de excrementos diarios por especie en el CEIEPASP durante el 2011

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA CENTRO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN EN PRODUCCIÓN AGROSILVOPASTORIL PORCENTAJE DE EXCREMENTOS AL DÍA POR ESPECIE 2011												
ESPECIE (%)	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
OVINOS	10.05	17.46	61.33	61.39	61.38	21.84	21.84	18.77	17.77	ND	ND	ND
CAPRINOS	5.16	8.85	32.81	33.50	34.42	11.51	10.21	9.79	9.54	ND	ND	ND
BOVINOS	83.45	71.29	0.00	0.00	0.00	65.07	66.31	69.90	71.24	ND	ND	ND
PORCINOS	0.28	0.48	0.91	0.85	0.86	0.39	0.43	0.38	0.32	ND	ND	ND
EQUINOS	1.06	1.91	4.95	4.25	3.34	1.19	1.21	1.16	1.13	ND	ND	ND
TOTAL DEL DIA	100.00	ND	ND	ND								

88

Tabla 5.10 Cantidad promedio de carretillas por especie al día en el CEIEPASP durante el 2011

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA CENTRO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN EN PRODUCCIÓN AGROSILVOPASTORIL CANTIDAD DE CARRETILLAS POR ESPECIE AL DÍA EN 2011												
ESPECIE	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
OVINOS	1.56	1.50	2.04	2.37	2.42	2.42	2.37	2.13	2.07	ND	ND	ND
CAPRINOS	1.05	1.00	1.43	1.70	1.78	1.68	1.46	1.46	1.46	ND	ND	ND
BOVINOS	5.29	2.50	0.00	0.00	0.00	2.94	2.94	3.24	3.38	ND	ND	ND
PORCINOS	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	ND	ND	ND
EQUINOS	0.06	0.06	0.06	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	ND	ND	ND
TOTAL DEL DIA	7.98	5.07	3.53	4.14	4.26	7.09	6.83	6.88	6.97	ND	ND	ND

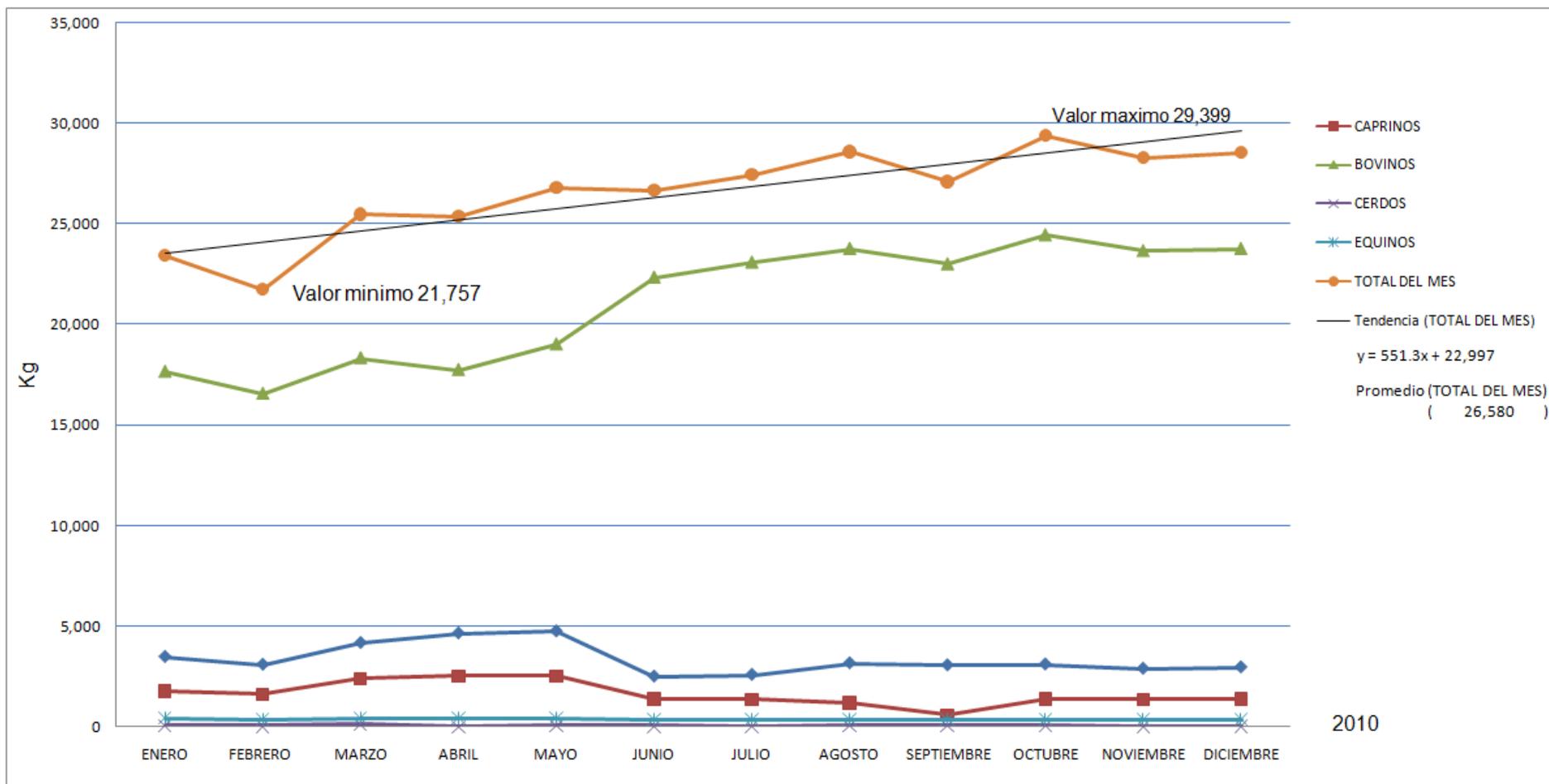


Figura 5.2 Generación de excremento de animales durante un año en el CEIEPASP en el 2010

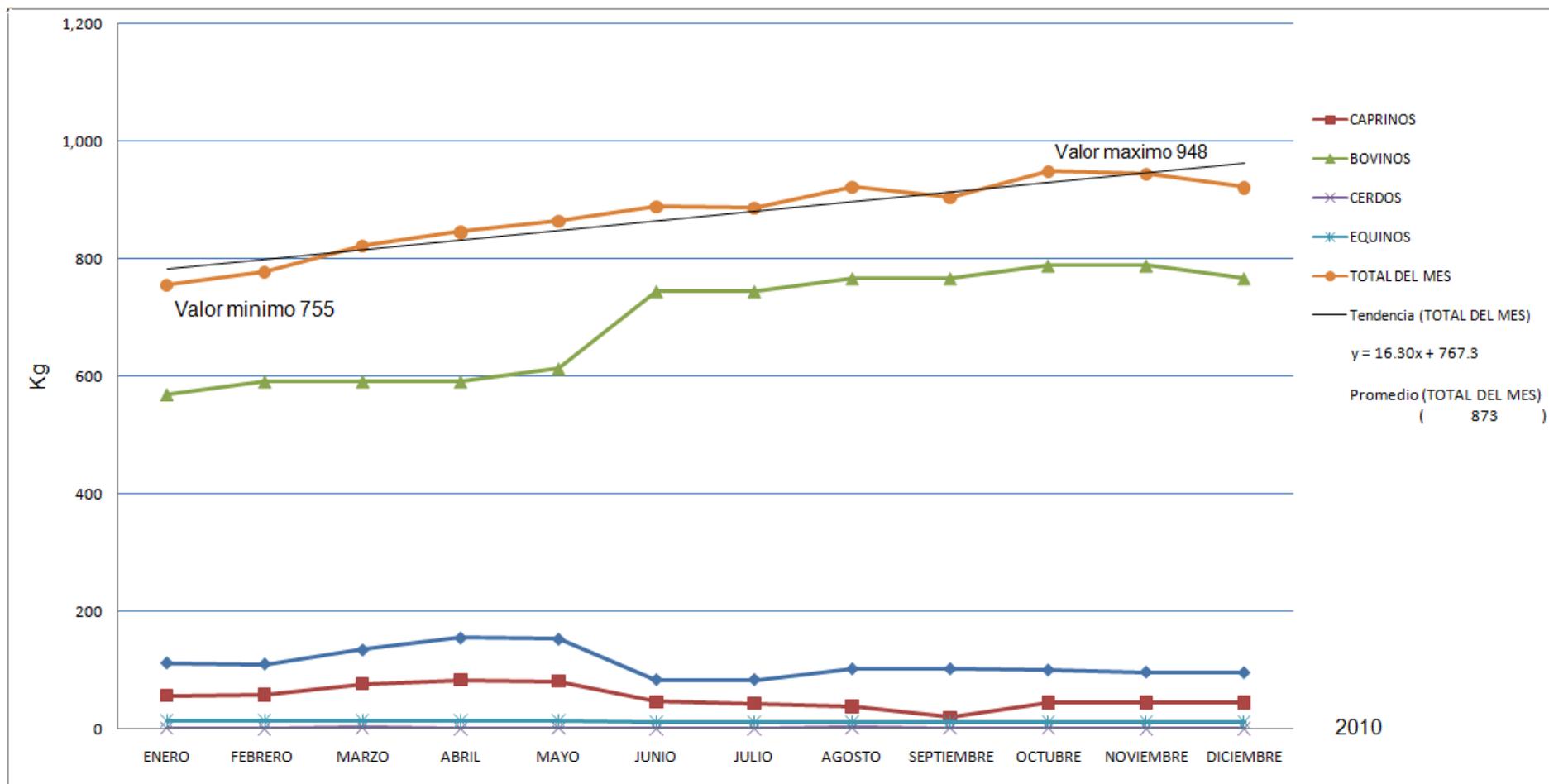


Figura 5.3 Generación de excremento de animales durante un año en el CEIEPASP en el 2010

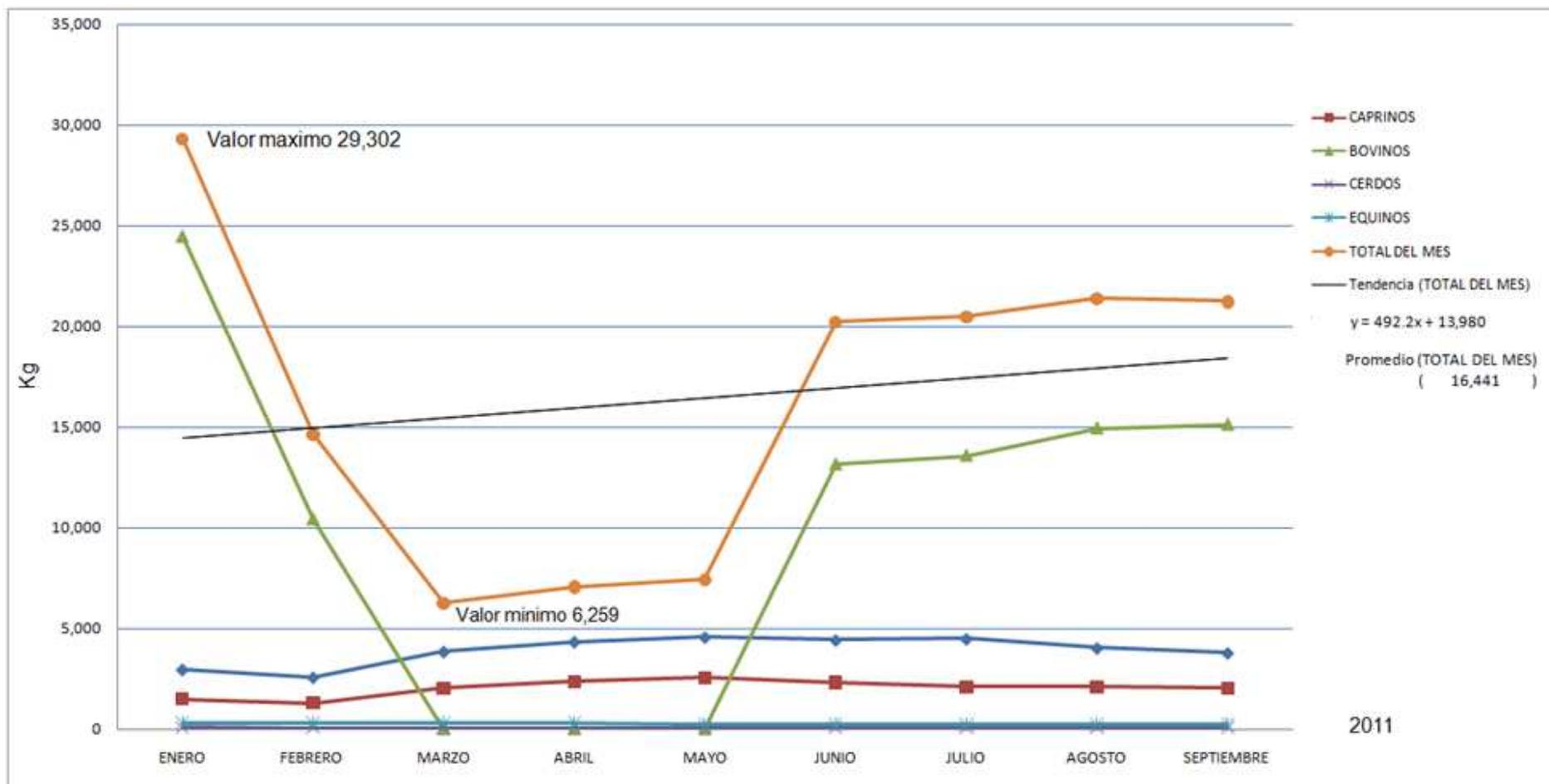


Figura 5.4 Generación de excremento de animales durante un año en el CEIEPASP en el 2011

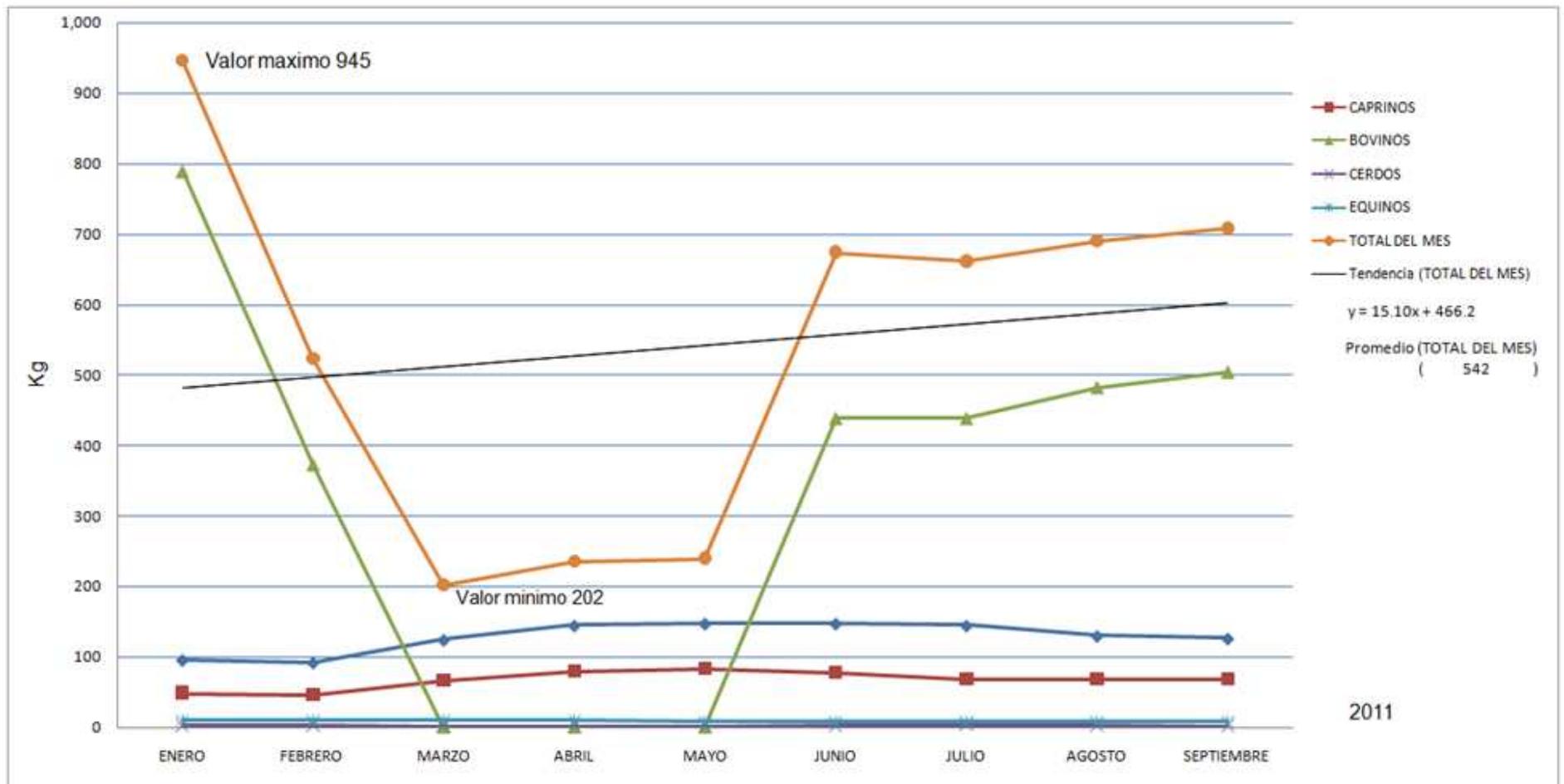


Figura 5.5 Generación de excremento de animales durante un año en el CEIEPASP en el 2011

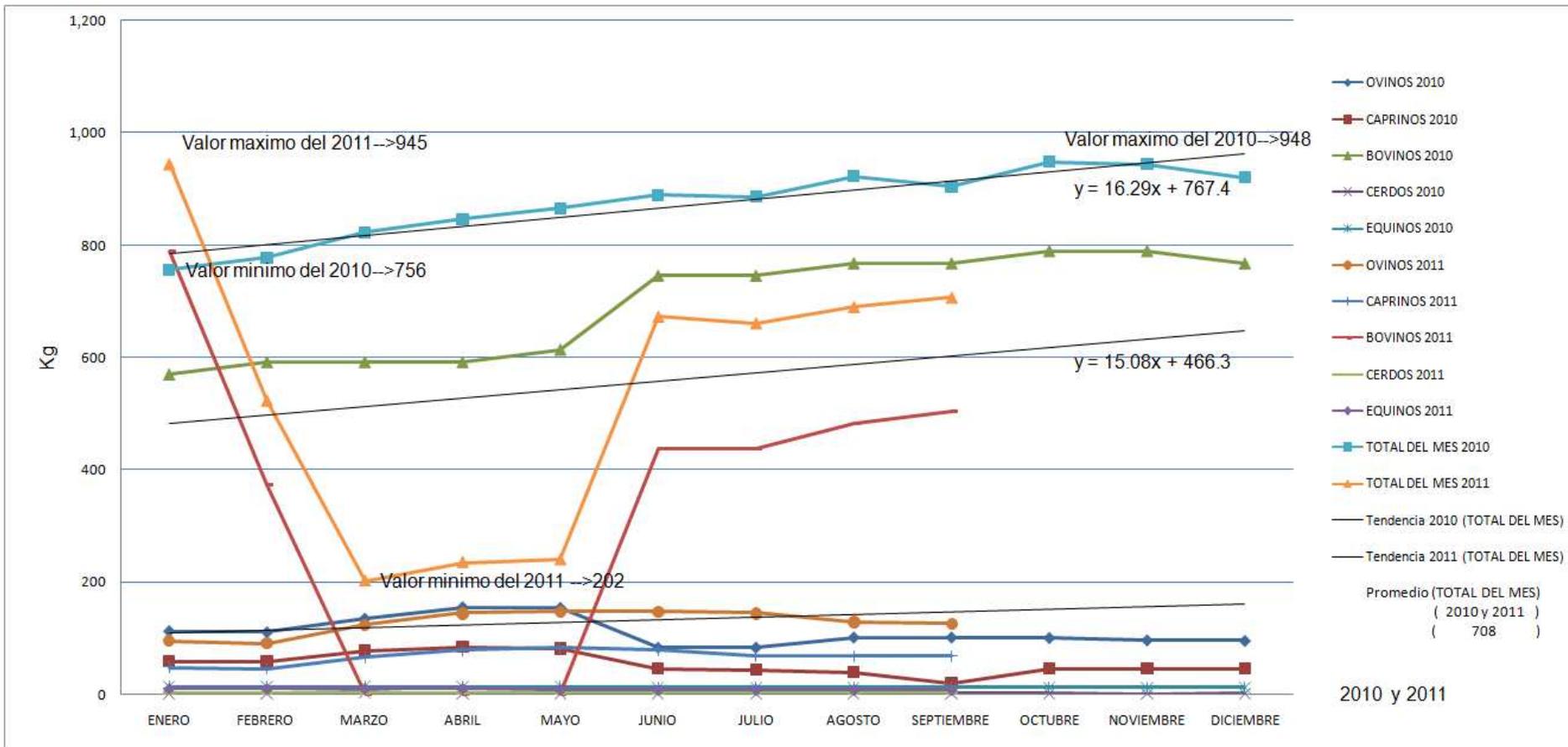


Figura 5.6 Cantidad total de excremento generado de animales del CEIEPASP en los años 2010 y 2011

5.2 Necesidades energéticas en el CEIEPASP

El CEIEPASP necesita reducir el consumo de gas LP y energía eléctrica. Mensualmente se tiene un consumo en promedio de 300L de gas LP y por ende un desembolso de \$1,831 pesos. Este gas, se usa en la cocina y regaderas que se tienen instaladas en la sección estudiantil del centro. En energía eléctrica se tiene un consumo promedio mensual de 1,800 kW/h y un desembolso de \$2,100 pesos. Los datos en las Tablas 5.11, 5.12 y 5.13, fueron proporcionados por el CEIEPASP.

Tabla 5.11 Consumo de gas LP en el CEIEPASP

Fecha	L. gas LP consumidos	L/día	Gasto en pesos
15-Ene-10	363.64	11.73	2,000
16-Mar-10	272.84	9.09	1,501
15-Abr-10	179.45	5.98	987
15-May-10	113.45	3.66	624
10-Jun-10	181.82	6.06	1,000
23-Jul-10	181.82	5.87	1,000
17-Sep-10	272.73	9.09	1,500
01-Oct-10	363.64	11.73	2,000
18-Nov-10	181.82	6.06	1,000
Total	2111.20		11,611.62

Tabla 5.12 Consumo de energía eléctrica en el CEIEPASP durante el 2010

Año	Mes	kW _e	Costo (\$ pesos)
2010	Febrero	1,612	2,740.40
	Marzo	1,342	2,281.40
	Abril	2,008	3,413.60
	Mayo	1,391	2,364.70
	Junio	1,580	2,686.00
	Julio	1,309	2,225.30
	Agosto	1,559	2,650.30
	Septiembre	1,853	3,150.10
	Octubre	2,475	4,207.50
	Noviembre	2,212	3,760.40
	Diciembre	2,657	4,516.90
	Total	19,998	33,996.60
Promedio	1,818	3,091	

Tabla 5.13 Consumo de energía eléctrica en el CEIEPASP a comienzos del 2011

2011	Enero	2,657	4,516.90
	Febrero	1,626	2,764.20
	Marzo	1,680	2,856.00
	Total	5,963	10137.1
	Promedio	1,987.60	3379.03

5.3 Pruebas de laboratorio

Para calcular la producción de biogás se usa la ecuación 2-18 y las Tablas 4.2, 4.3 y 4.4:

$$PB_M = \left[M \cdot DM_M \cdot \frac{OM_M}{DM_M} \cdot 1000 \right] \left[\frac{m^3 \text{ biogás}}{kg OM_M} \right] \dots (5-1)$$

Donde:

$$M = 318.76 \text{ (ton/año)}$$

$$DM = 29.45\%$$

$$OM/DM = 65.62\%$$

$$OM = 0.05 \text{ (m}^3 \text{ biogás/kg)}$$

$$PB = [318.76 \cdot 0.2945 \cdot 0.6562 \cdot 0.05 \cdot 1000] [m^3 \text{ biogás/año}]$$

La producción de biogás al año:

$$PB_{\text{año}} = 3080.03 [m^3 \text{ biogás/año}]$$

Se divide entre la cantidad de días al año y se obtiene la producción de biogás al día:

$$PB_{\text{día}} = \frac{3080.03}{365} [m^3 \text{ biogás/día}]$$

Por lo tanto, la producción de biogás diaria es de:

$$PB_{\text{día}} = 8.43 \left[m^3 \text{ biogás} / \text{día} \right]$$

5.4 Dimensionamiento del reactor anaerobio

El dimensionamiento de un reactor anaerobio es una de las etapas más cruciales del diseño del mismo. El volumen se ve afectado dependiendo del área de trabajo y en el caso del CEIEPASP se tiene un espacio de 10m por 20m para albergar un reactor anaerobio de gran tamaño. En esta etapa se toman las condiciones del espacio de trabajo y se dimensiona el reactor, que en ocasiones, se adapta cambiando de forma en el diseño.

Para obtener las dimensiones de nuestro reactor, se toma el volumen máximo que podrá llegar a tener una mezcla de agua con la acumulación de excremento animal en un día normal de trabajo, para después junto con el tiempo de retención llevar a cabo una correcta metanogénesis. Tomando en cuenta la Figura 2.11, se toma un tiempo de retención de 28 días y considerando que diariamente se recolecta un volumen máximo aproximado de 1.4125m³, se tiene un volumen sólo de excremento igual a 39.55m³. Sumado a la cantidad de volumen proporcional de agua potable (39.55m³) se obtiene finalmente un volumen máximo aproximado de la mezcla agua-excremento de 79.1m³. Como las dimensiones del lugar en donde será colocado fueron establecidas por el centro, se realizará un diseño que se ajuste a ese espacio y al mismo tiempo sea eficaz.

En el lugar donde se instalará el reactor anaerobio (Figura 3.4), la medidas máximas para colocarlo son de 19m x 8m x 2m y el volumen aproximado calculado de la mezcla con un TRH de 28 días fue de 80m³. El diseño del reactor anaerobio será de tipo laguna.

La ecuación 5.2 para calcular el volumen de una pirámide truncada es la siguiente:

$$V = \frac{h}{3} \left(A + A' + \sqrt{A \cdot A'} \right) \dots\dots\dots(5-2)$$

En la Figura 5.7 aparece una ilustración de cómo será el reactor anaerobio. La letra A es la superficie superior, la letra Á es la superficie inferior y h es la altura.

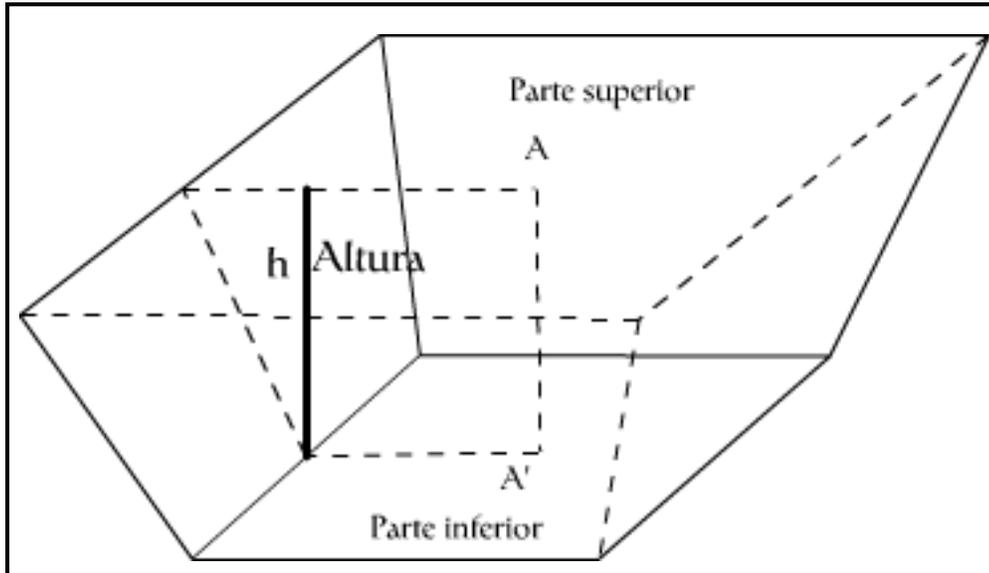


Figura 5.7 Pirámide truncada en la cual se basa el diseño del reactor anaerobio

Para aplicar la ecuación 5.2 se necesita saber la altura, el área inferior y superior. Para el área superior se consideraron medidas de 7m x 11m y para el área inferior de 5m x 9m. La altura será de 1.40m.

$$\begin{aligned} \text{Área superior} &= 11\text{m} \times 7\text{m} \\ &= 77\text{m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Área inferior} &= 9\text{m} \times 5\text{m} \\ &= 45\text{m}^2 \end{aligned}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 5.2:

$$V_{\text{reactor}} = \frac{1.4}{3} (77 + 45 + \sqrt{77 \cdot 45}) [m^3]$$

Finalmente el volumen total calculado es de:

$$V_{\text{reactor}} = 84.4\text{m}^3$$

Éste volumen, cumple con el requisito de almacenar 80m³ y tiene un excedente de 4m³ aproximadamente.

Para almacenar el biogás, se tomará un metro de altura para colocar la “tapa” y así formar la bolsa de geomembrana (Figura 5.8) sobre la parte superior del reactor anaerobio.

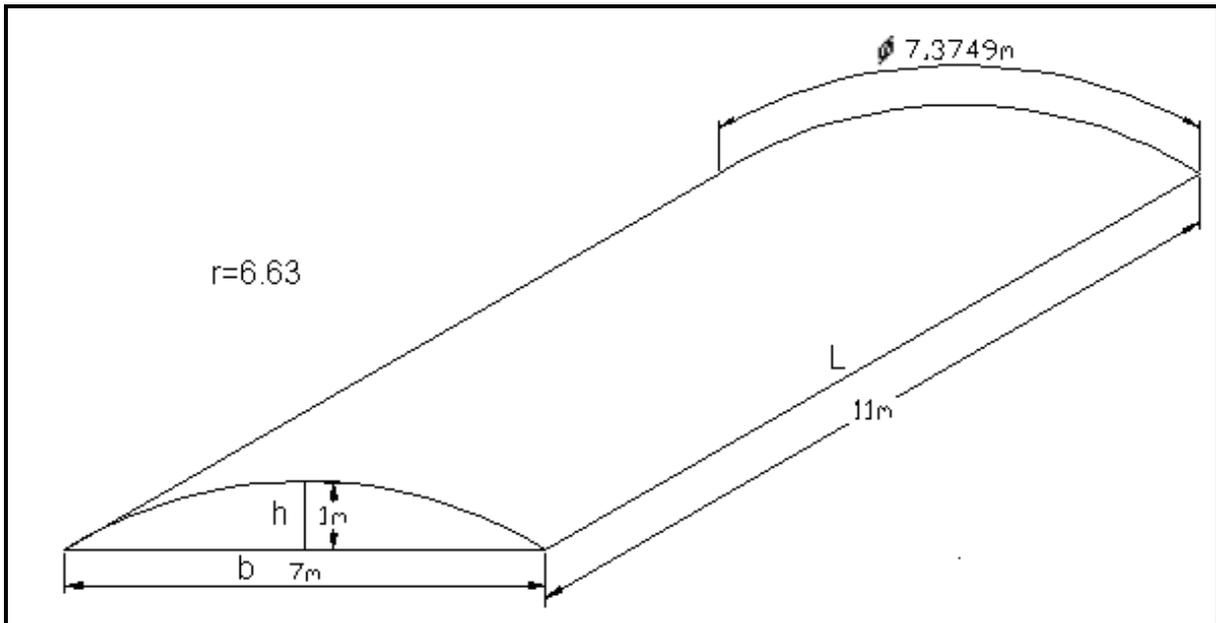


Figura 5.8 Bolsa de geomembrana del reactor anaerobio

Calculamos el volumen de la bolsa usando la ecuación 5-3:

$$V = \frac{r \cdot \phi - b(r - h)}{2} [L] \dots\dots\dots(5-3)$$

Donde:

- r = radio del arco
- φ = longitud del arco
- b = base
- h = altura
- L = largo

Sustituyendo los valores en la ecuación 5-3, se tiene que:

$$V_{bolsa} = \frac{(6.63 \cdot 7.37) - 7 \cdot (6.63 - 1)}{2} \cdot (11) [m^3]$$

$$V_{bolsa} = 52m^3$$

Como la cantidad generada al día de biogás es de 8.43 m³, el volumen de la bolsa puede almacenar la cantidad equivalente a 6 días de biogás no utilizado.

5.5 Planos de instalación del reactor anaerobio

Considerando lo anterior en el capítulo 5.4 para la determinación del volumen del reactor anaerobio, en la Figura 5.9, se ilustra cómo será el diseño ya instalado en el centro CEIEPASP.

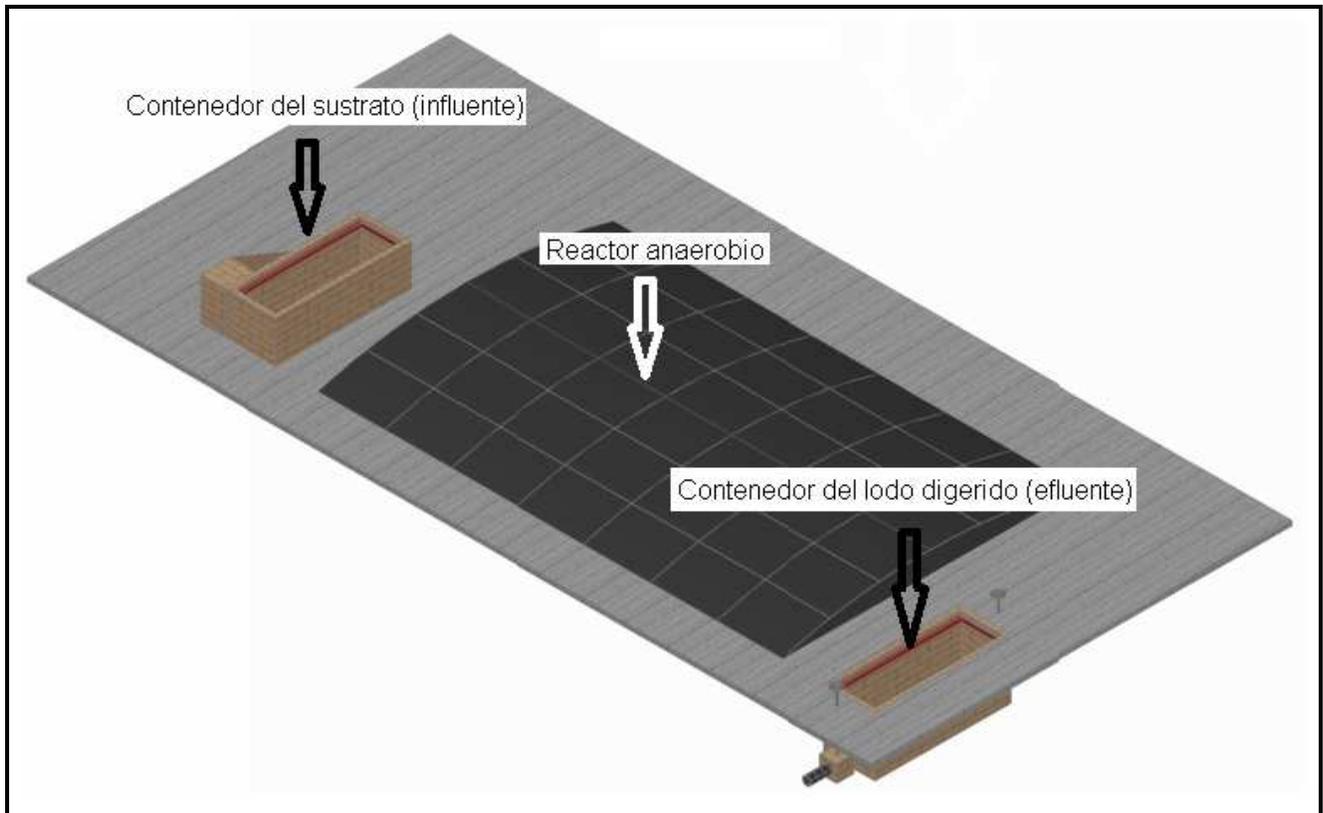


Figura 5.9 Reactor anaerobio tipo laguna que será instalado en el CEIEPASP

El lugar donde será instalado el reactor anaerobio se muestra en la Figura 5.9, sitio designado por el centro CEIEPASP. Este lugar es el más conveniente ya que ahí se almacena el excremento de todos los corrales y después lo usan como abono para las áreas verdes.

En la Figura 5.10 se ilustra el lugar en cuatro formas; 3D, aérea, vertical y horizontal, con el fin de mostrar la nave y donde será el lugar del reactor anaerobio.

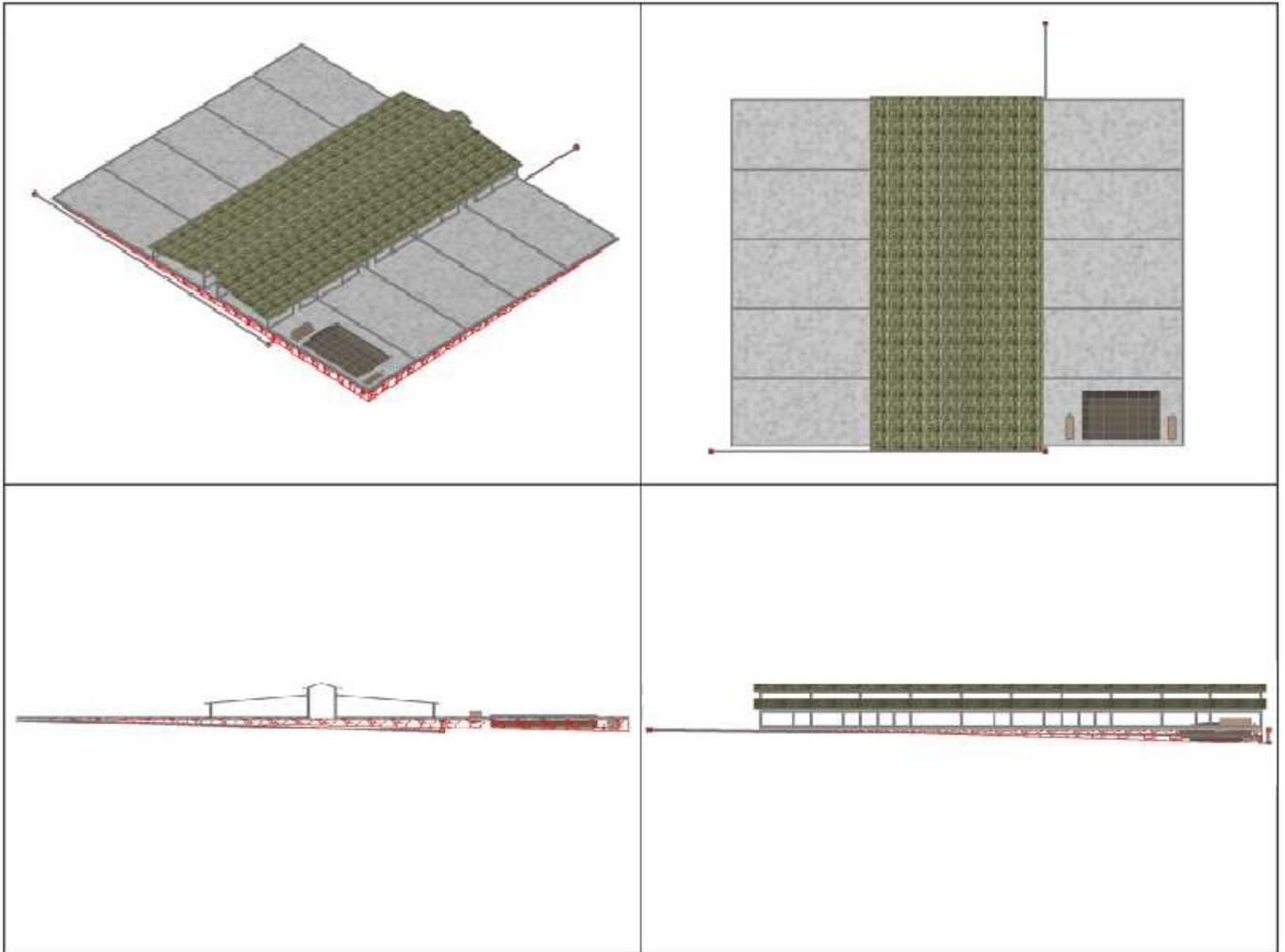


Figura 5.10 Vista general de la instalación del reactor anaerobio.

Para el armado del reactor anaerobio se considera lo siguiente:

- Contenedor de sustrato previo al reactor anaerobio, en este se depositarán las excretas de los animales de los corrales y el agua necesaria para hacer la mezcla.
- El almacenamiento interno del biogás.
- Reactor anaerobio, ubicado en el centro.
- Contenedor del lodo digerido.
- Tubería y llaves de paso, las cuales son el medio de intercambio del contenedor de sustrato al reactor anaerobio y de este al contenedor de lodo digerido.

En la Figura 5.11, aparecen las partes más importantes del reactor anaerobio. El recubrimiento de ladrillos que contiene es de forma ilustrativa, ya que el acabado será aplanado.

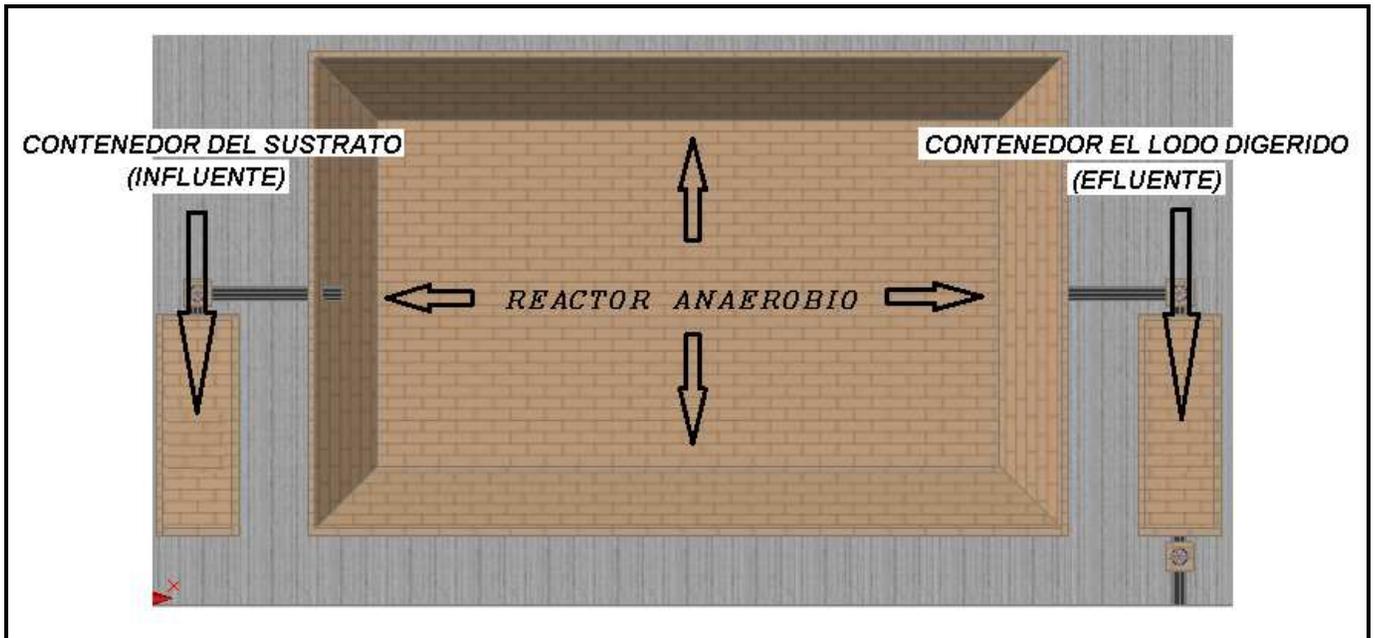


Figura 5.11 Partes del reactor anaerobio

Para tener una mejor idea más clara de la dimensión del reactor anaerobio en la Figura 5.12 y 5.13 se detallan las medidas de todas las partes del reactor anaerobio. Consta de una superficie de 200m^2 ($10 \times 20\text{m}$) donde será colocado y junto con sus accesorios como los ya mencionados anteriormente, la pared de cada contenedor tiene 10cm de grosor, las medidas reportadas son de extremo a extremo.

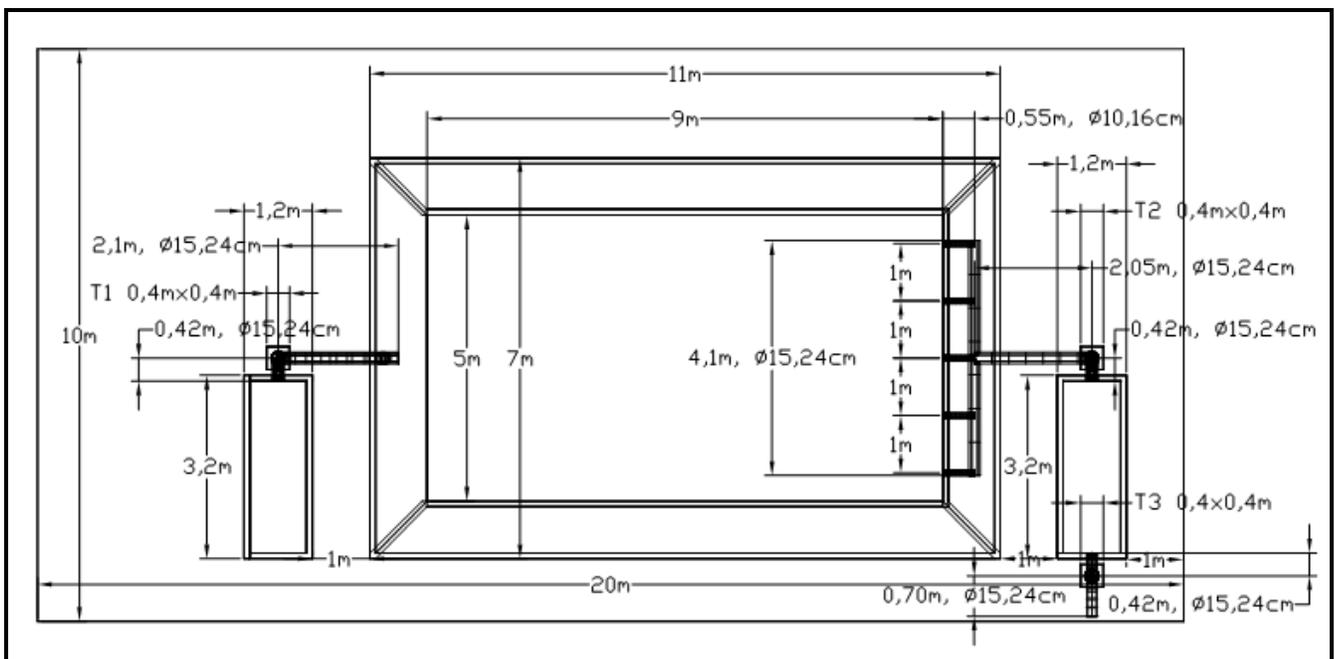


Figura 5.12 Dimensiones del reactor anaerobio (estructura alámbrica)

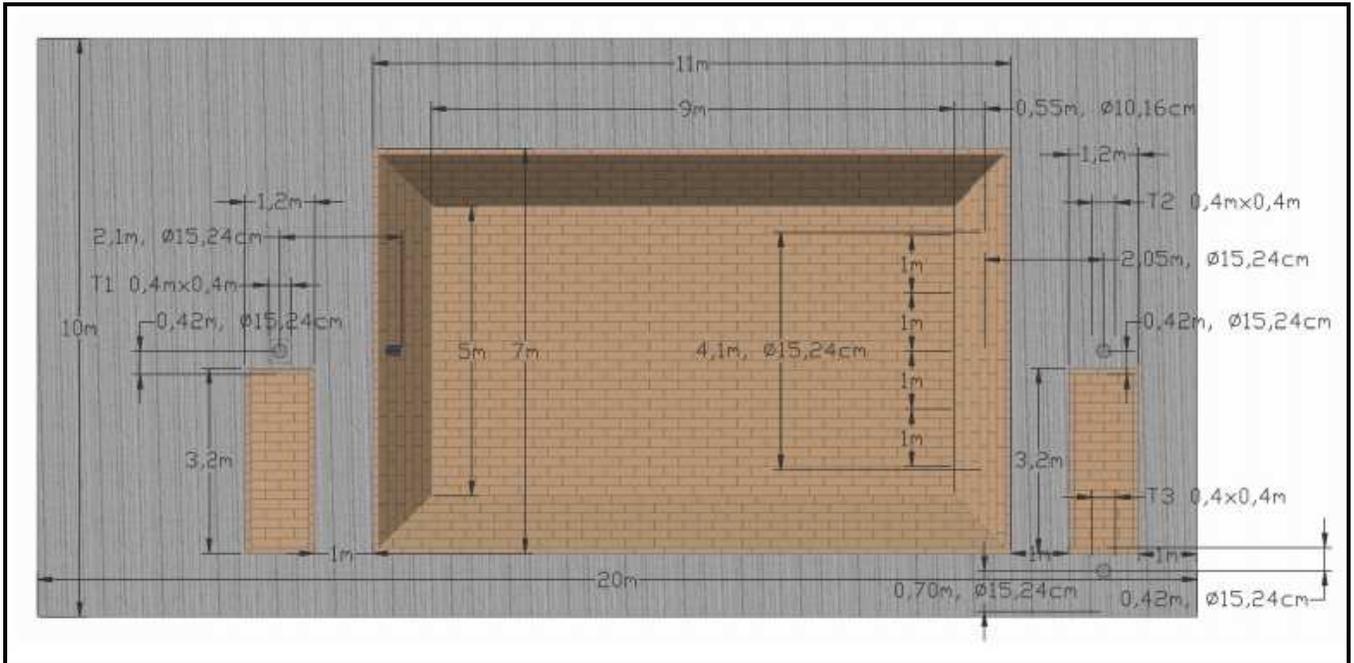


Figura 5.13 Dimensiones del reactor anaerobio (estilo visual realista)

Contenedor de sustrato previo al reactor

Tiene un volumen de 3m^3 , la pared tiene un grosor de 10cm, 3m de largo y 1m de ancho, con una inclinación en uno de sus costados de 4° para que fluya la mezcla de agua y excremento. Contiene dos ductos de PVC, el primero de 6 pulgadas con una longitud de 42cm, el cual se conecta al contenedor y a la caja de llave de paso en forma de T1. El segundo de 6 pulgadas, con un longitud de 2.10m la cual se conectará a la caja de llave de paso T1 y al reactor anaerobio. La caja de llave de paso T1 es de $40 \times 40 \times 40\text{cm}$ con un eje de longitud 70cm y un diámetro de entrada de 10cm y para un fácil manejo la manivela mide de diámetro 40cm. Todo lo anterior se muestra en las Figuras 5.13, 5.14, 5.15 y 5.16. El rectángulo gris que aparece en estas, es la referencia a nivel del piso.

En este contenedor, se considera una rampa para hacer más fácil la introducción del excremento al contenedor y en la Figura 5.25 se ve ésta a detalle. En la Figura 5.14 se muestra el contenedor previo al reactor anaerobio para tener una mejor visualización de las partes que lo componen.

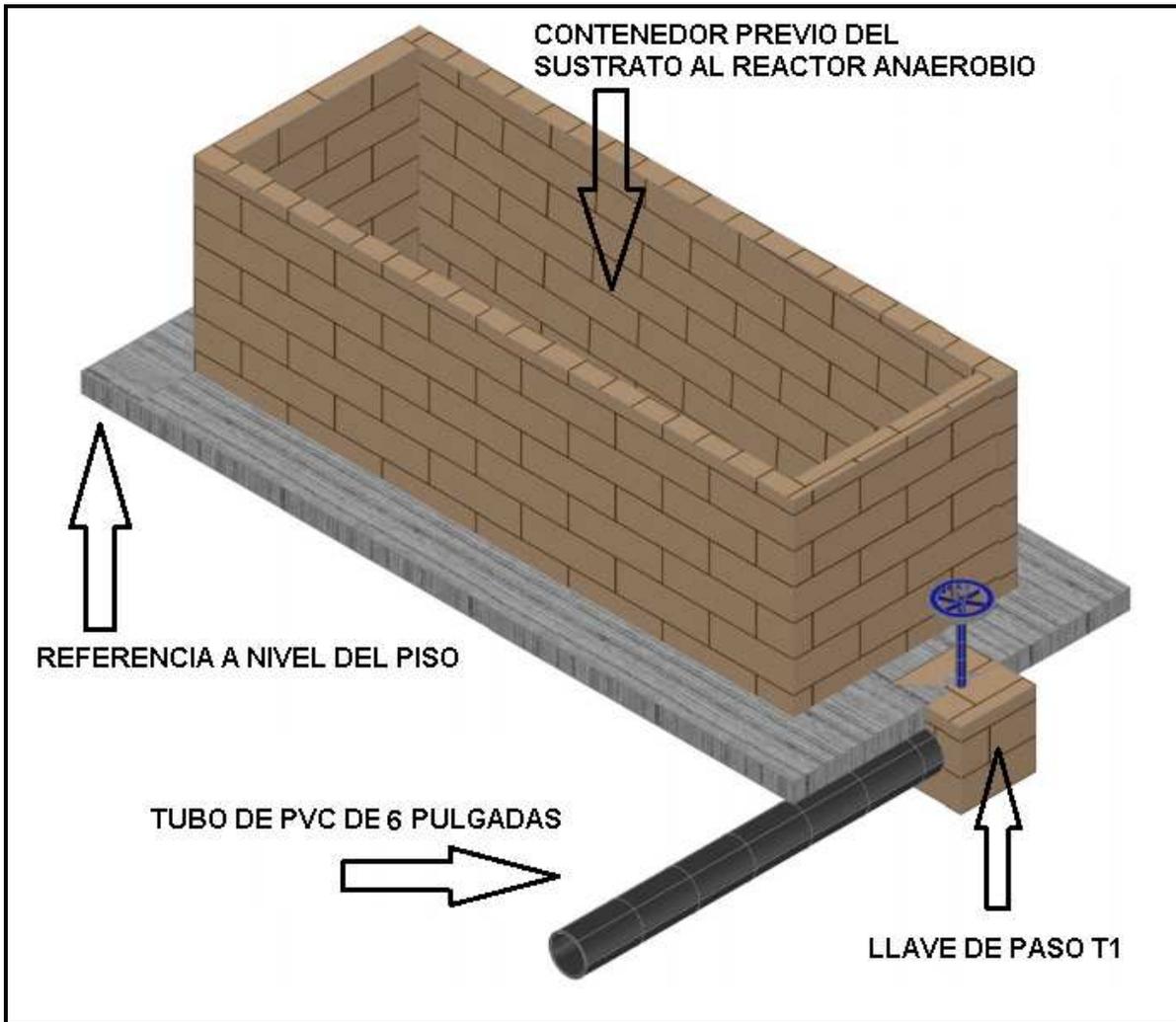


Figura 5.14 Vistas generales del contenedor del sustrato

La Figura 5.15 muestra las medidas del contenedor previo al reactor anaerobio considerando dimensiones en metros, la pared es de 10cm.

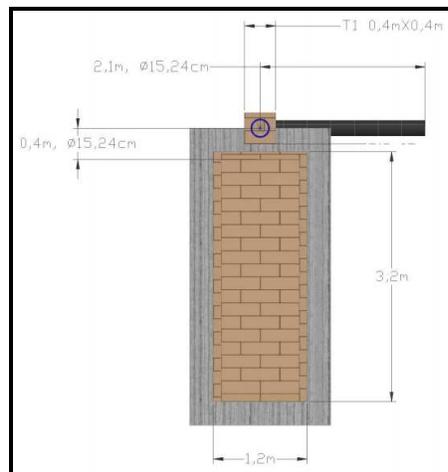


Figura 5.15 Vista aérea del contenedor del sustrato

La Figura 5.16 muestra lateralmente el contenedor previo al reactor anaerobio considerando dimensiones en metros, la pared es de 10cm y con un ángulo de inclinación de 4°. En la Figura 5.17 se visualiza una vista frontal del contenedor previo al reactor anaerobio considerando dimensiones en metros, la pared es de 10cm.

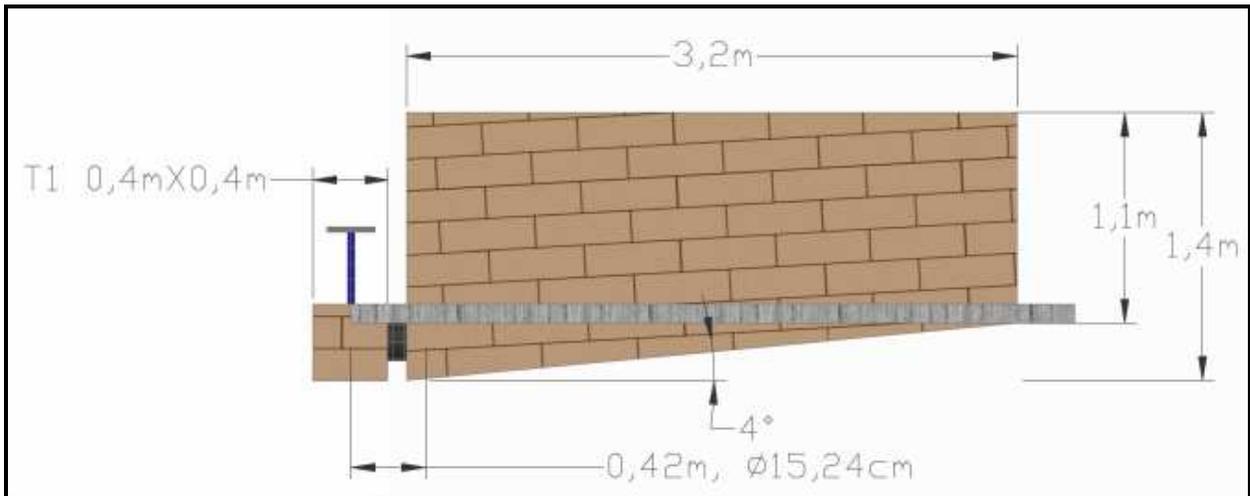


Figura 5.16 Vista lateral del contenedor del sustrato

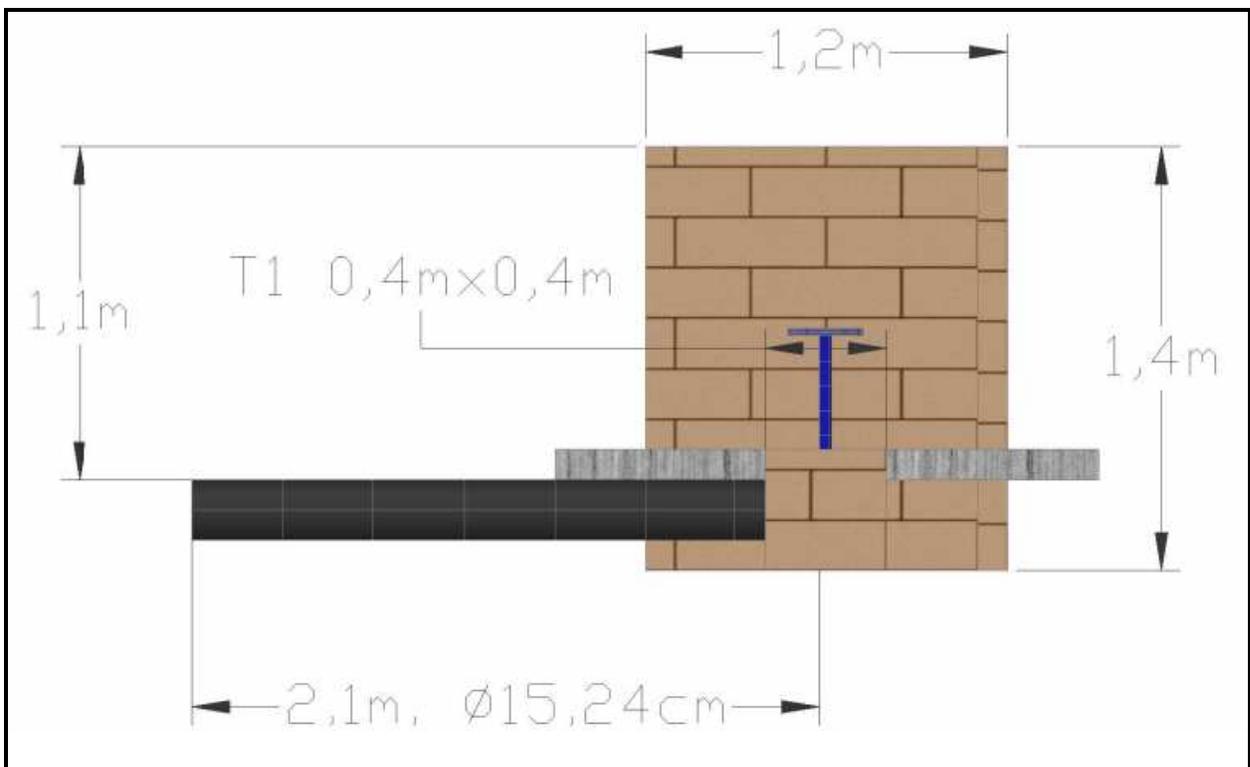


Figura 5.17 Vista frontal del contenedor del sustrato

Reactor anaerobio

Para este caso en especial se consideró un reactor anaerobio tipo laguna con un volumen calculado de 84m^3 . Como el lugar donde se instalará tiene una superficie de $20 \times 10\text{m}$, las medidas de diseño para la implementación en la cara superior son de $11 \times 7\text{m}$, la cara inferior es de $9 \times 5\text{m}$, tiene una profundidad de 1.40m y una inclinación de 2° . Las paredes de la parte interna del reactor anaerobio, serán recubiertas con geomembrana de 1.5mm , para evitar el filtrado de sustrato hacia las paredes del reactor anaerobio.

En la Figura 5.18 se visualiza la entrada de la tubería de 6 pulgadas del contenedor previo al reactor por donde será llenado de sustrato, mezcla de excremento y agua al reactor anaerobio.

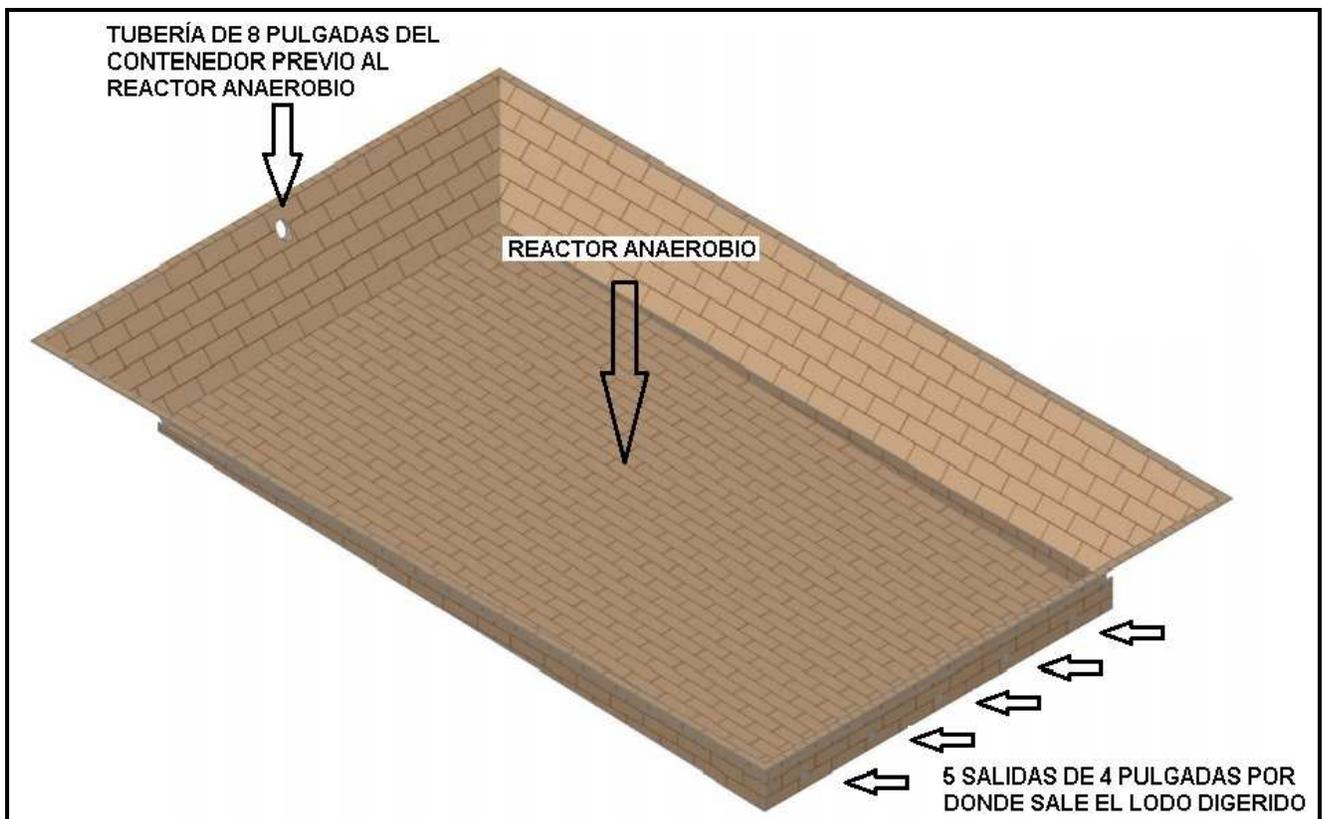


Figura 5.18 Vistas generales del reactor anaerobio

Por otro lado en la Figura 5.19, se visualiza una inclinación de 2° en total, además de que se tienen 5 ductos de 4 pulgadas por donde saldrá el lodo digerido que interseca con otra tubería que va a una llave de paso T2 para llenar el contenedor de lodo digerido.

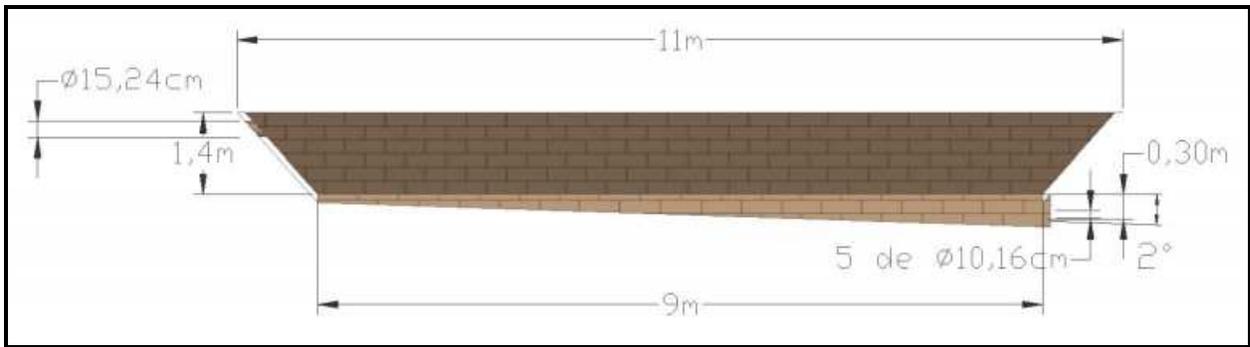


Figura 5.19 Vista lateral del reactor anaerobio con una inclinación de 2°.

En la Figura 5.20 se tiene el reactor anaerobio con sus dimensiones de 11x7m en la parte superior, la inferior de 9x5m y una profundidad de 1.40 m, para su llenado con una capacidad de 84m³ de sustrato.

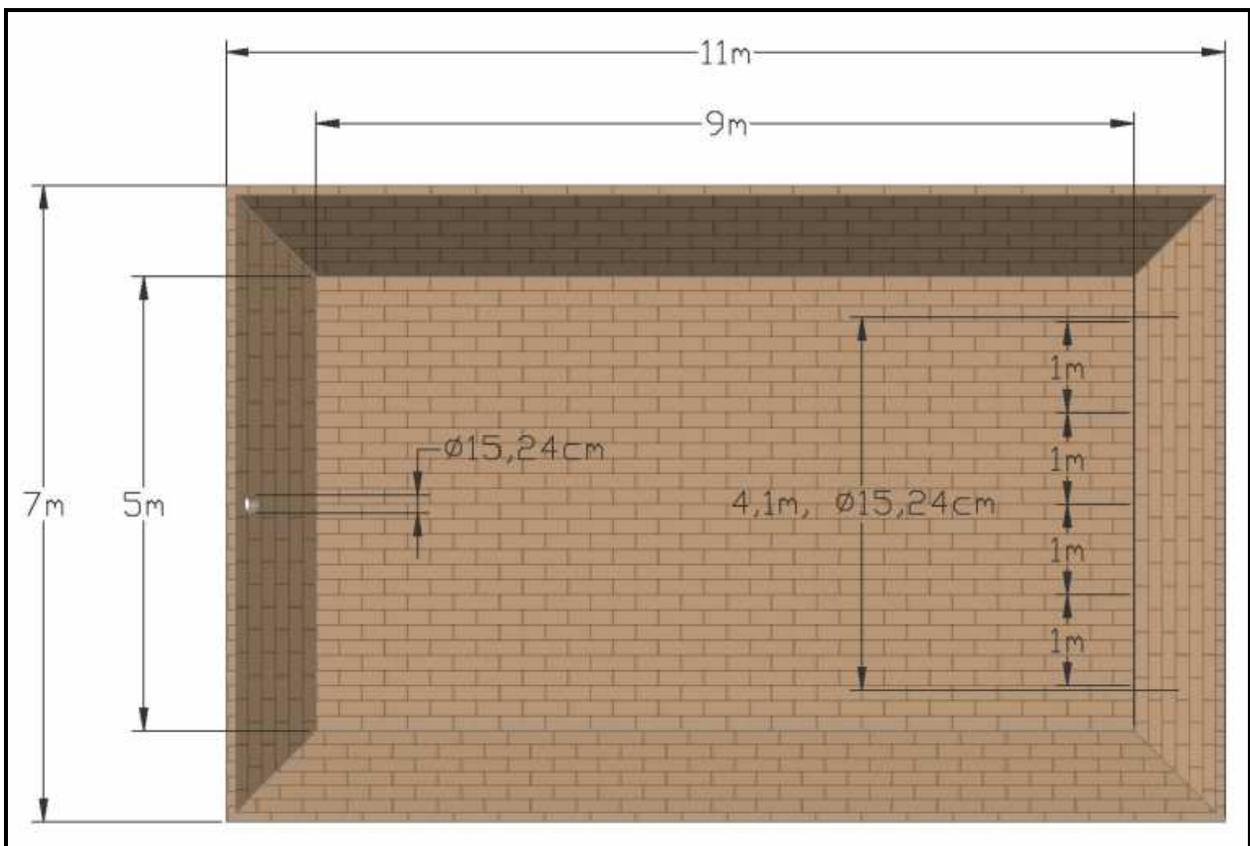


Figura 5.20 Vista aérea del reactor anaerobio con sus respectivas cotas de los ductos efluente e influente.

Contenedor de lodo digerido

Tiene un volumen de 3m^3 , la pared es de 10cm de grosor, tiene una longitud de 3m y anchura de 1m. Éste tiene 10 ductos de PVC, dos de ellos de 6 pulgadas con un longitud de 42cm, los cuales se conectan al contenedor de lodo digerido en ambos extremos a las cajas de llave de paso T2 y T3 de la Figura 5.21. El tercero de 6 pulgadas con un longitud de 70cm el cual se conectará a la caja de llave de paso T3, la cual se utilizará como salida del lodo digerido para su uso requerido por el centro CEIEPASP que aparece en la Figura 5.20. El cuarto tubo, que proviene de la llave de paso T2 de 6 pulgadas y de una longitud de 2.05m se une a otro ducto de 6 pulgadas con una longitud de 4.1m y estos forman una T que aparece en la Figura 5.22. Los 5 ductos restantes se conectan al cuarto tubo, cada uno de ellos es de 4 pulgadas y una longitud de 55cm. En la Figura 5.23 aparecen todas las conexiones.

Cuenta con dos cajas de llaves de paso T2 Y T3. La llave T2, es para abrir y cerrar el flujo del lodo digerido, que proviene del reactor anaerobio con el fin de llenar el contenedor y la llave T3, para drenar el lodo que se tenga almacenado en éste, para su posterior uso o almacenaje. La caja de llave de paso T2 y T3 son de 40x40x40cm con un eje de longitud de 1.6m, con una entrada de diámetro de 10cm y con una manivela con un diámetro de 40cm. El rectángulo gris de la Figura 5.21, 5.22 y 5.23 es la referencia a nivel del piso.

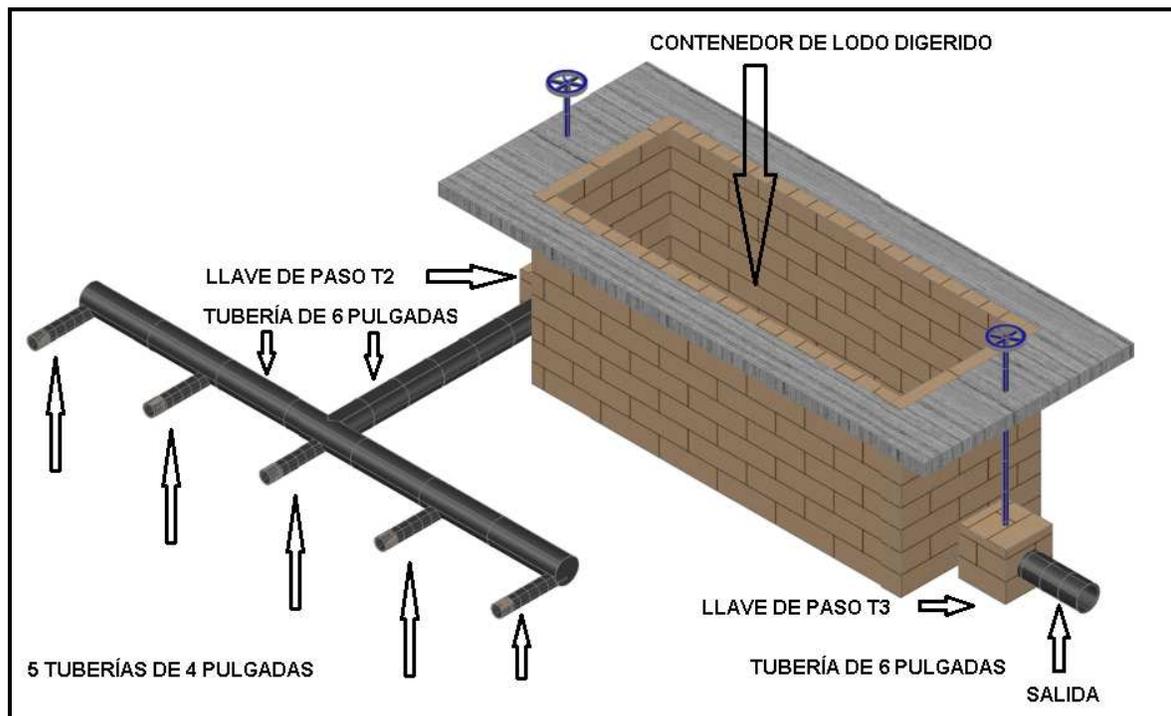


Figura 5.21 Vistas generales del contenedor de lodo digerido

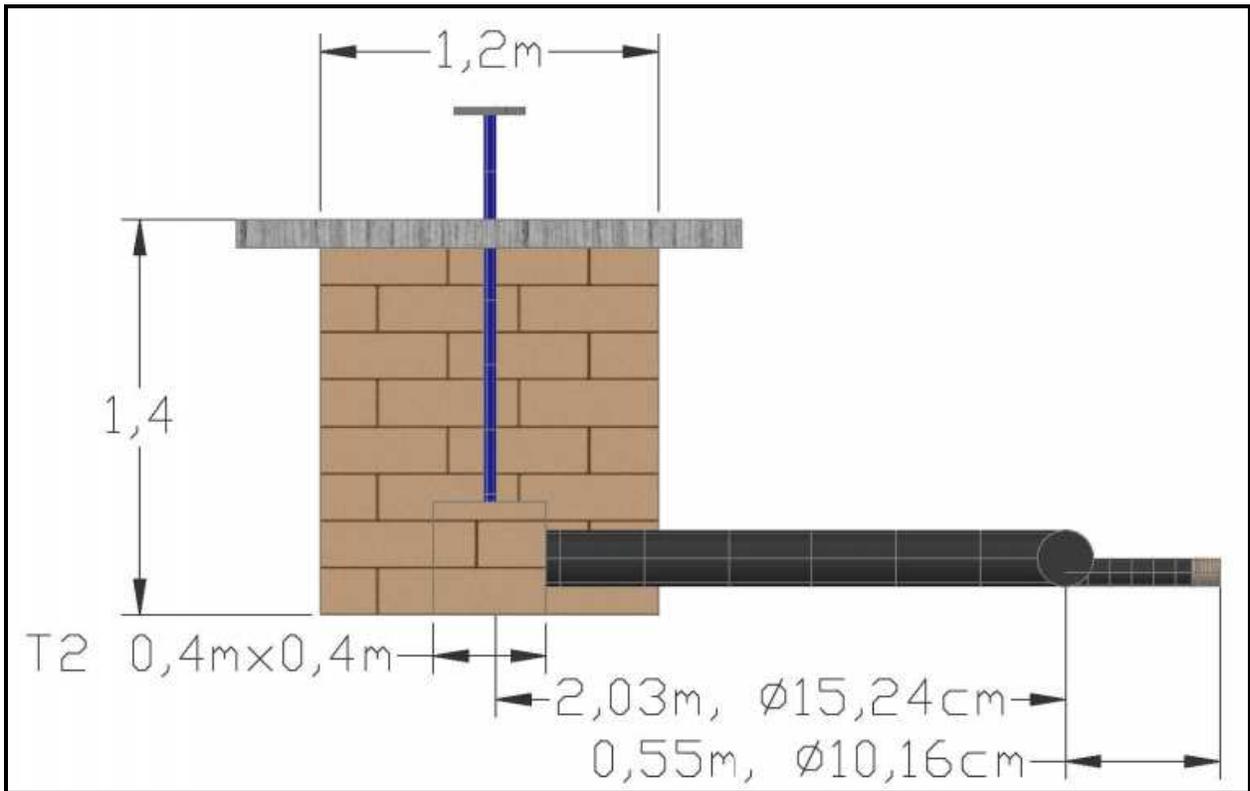


Figura 5.22 Vistas frontal del contenedor de lodo digerido

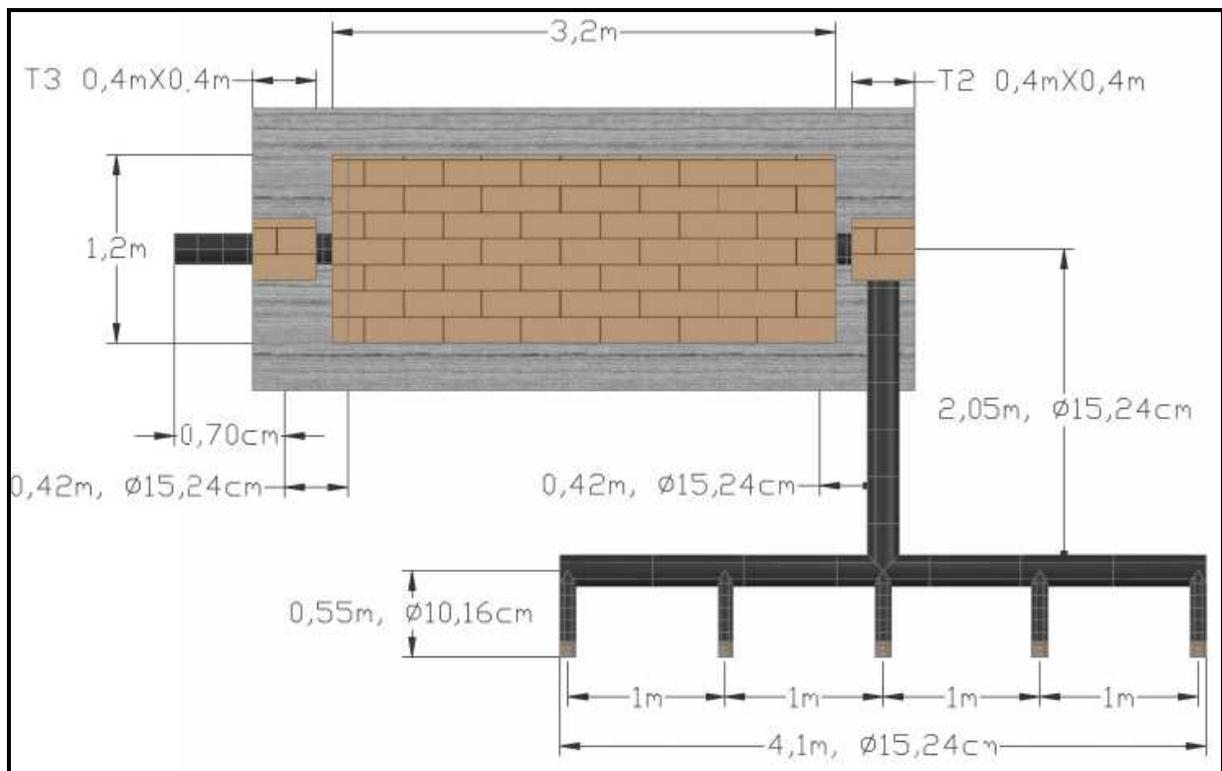


Figura 5.23 Vistas desde abajo del contenedor de lodo digerido

En la Figura 5.24 aparece la unión de todas las partes. La superficie gris es la referencia al nivel del piso, la cual para esta imagen se puso transparente para tener mejor visualización de los materiales que en dado caso no se ven cuando ya está terminada la instalación debido a que estos se encuentran por debajo del piso.

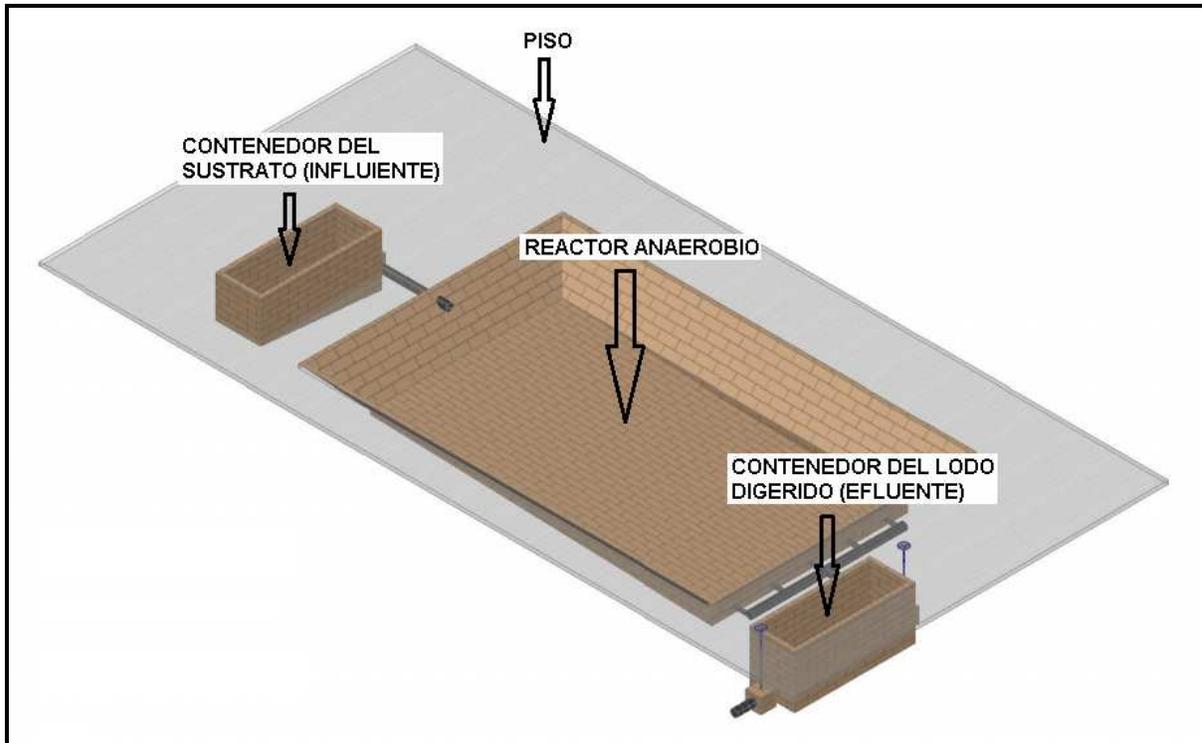


Figura 5.24 Vista aérea del reactor anaerobio

En la Figura 5.25 se visualiza una rampa que como ya se mencionó, será colocada en un costado del contenedor del sustrato para tener un manejo más fácil para el depósito de los excrementos, ya que estos son trasladados con carretillas debido a su peso. Las marcas rojas que aparecen dentro de los contenedores y del reactor, son de nivel para señalar la máxima capacidad de llenado de estos contenedores, cabe mencionar que las marcas de nivel de ambos contenedores están a 1.20 m de altura con un grosor e 10cm, las medidas de la rampa son 1m de altura, 3m de largo, 0.60m de ancho y la base de descanso es de 40x 60cm (Figura 5.25).

Después de que esté todo construido se coloca un recubrimiento de geomembrana en los costados y fondo del reactor para evitar filtraciones, se añade en el fondo tubería de PVC de 2 pulgadas para la recirculación del biogás, ver Figura 5.26

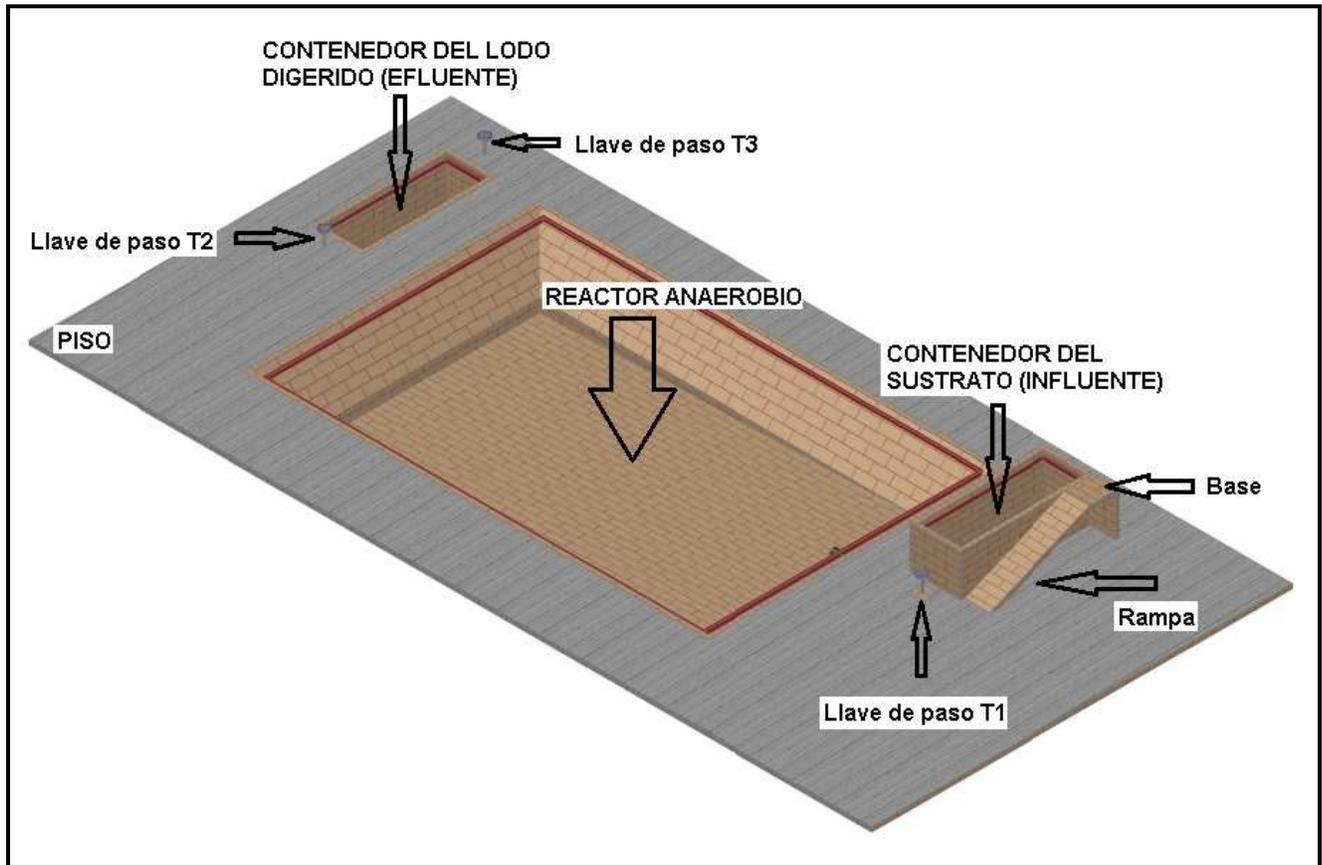


Figura 5.25 Vista del reactor anaerobio con marcas de nivel y la rampa

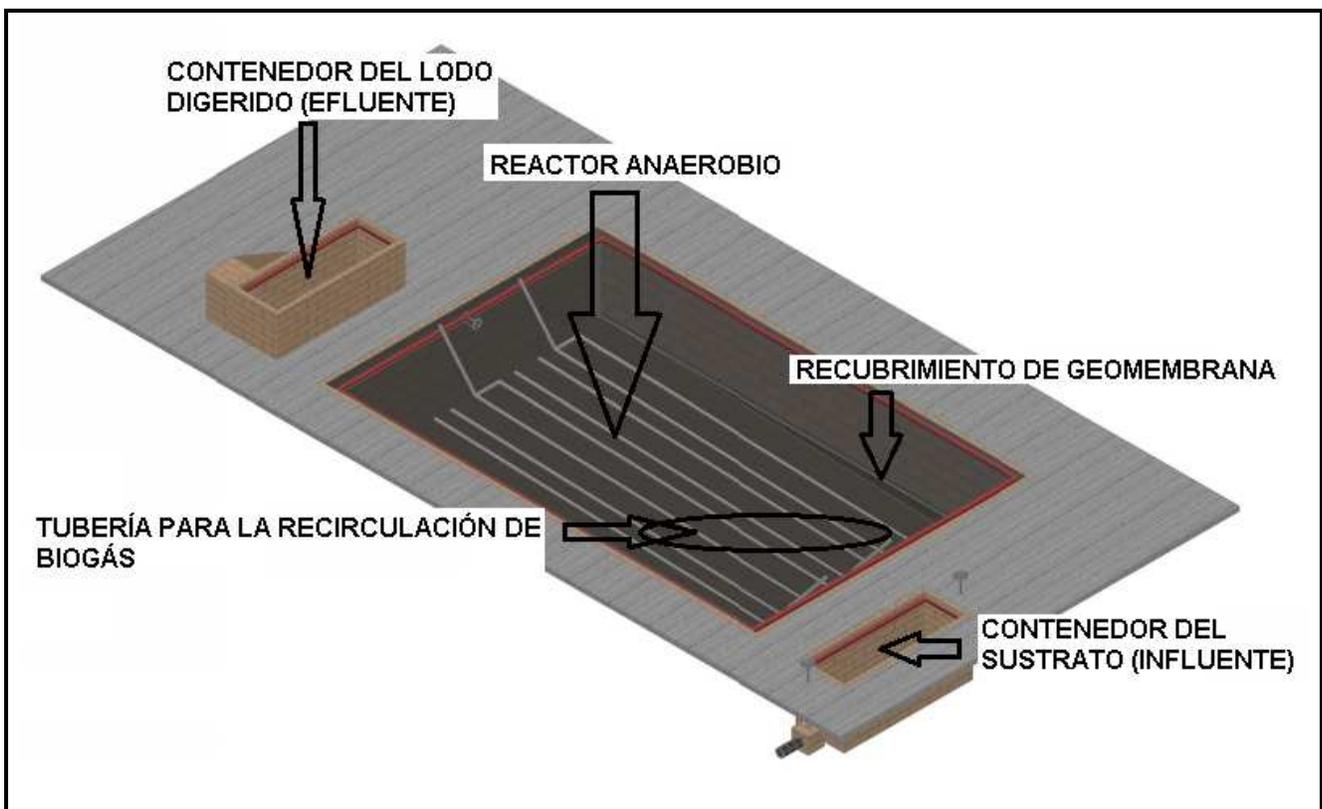


Figura 5.26 Vista del reactor anaerobio con tubería para la recirculación de biogás

Finalmente se coloca la bolsa de geomembrana que recubrirá al reactor anaerobio, ésta tiene un volumen de 52m³ y servirá como almacenador del biogás para su posterior uso en el centro CEIEPASP (Figura 5.27).

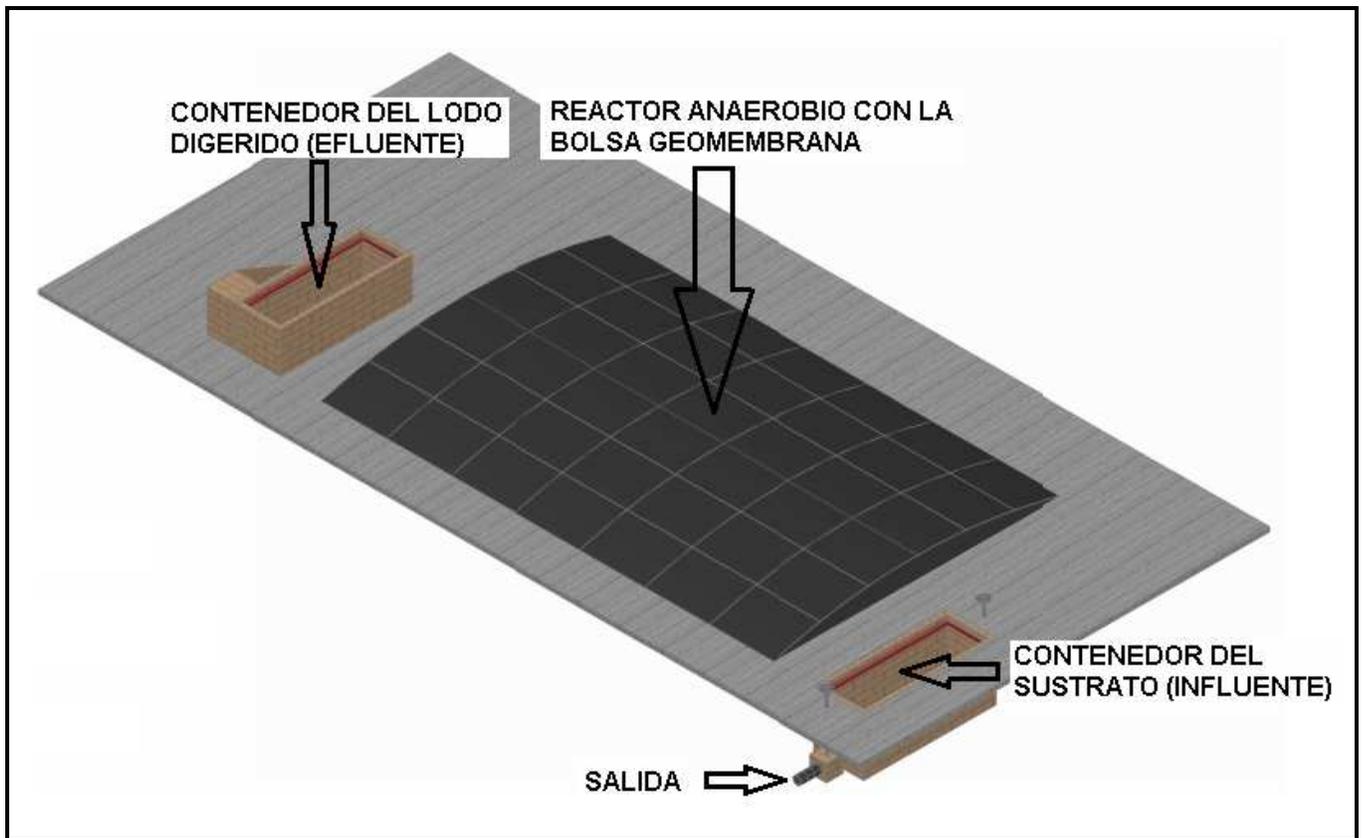


Figura 5.27 Vista completa del reactor anaerobio

5.6 Generación de energía a partir del biogás generado

5.6.1 Electricidad

Retomando la ecuación 2-13, para determinar la energía eléctrica posible generada se tiene:

$$E = PB * PC \dots\dots\dots(5-3)$$

Donde:

E = Energía (Kcal/hora)

B = 0.35 (m³biogás/hora)

C = Poder calorífico 4,500 a 5,600 (Kcal/m³ biogás)

$$E = 0.35[m^3_{biogás} / hora] \cdot 4,500[kcal / m^3_{biogás}]$$

Obteniendo:

$$E = 1,580.6[kcal / hora]$$

Si: 860 Kcal = 1kW

$$E_T = 1,580.6 \left(\frac{kcal}{hora} \right) \cdot \frac{1}{860} \left(\frac{kW}{kcal} \right)$$

Se obtiene energía eléctrica de:

$$E_T = 1.837 \left(\frac{kW}{hora} \right)$$

Convirtiéndola a corriente eléctrica el rendimiento de energía eléctrica es de 30% para pequeñas unidades y el 70% restante se transforma en calor (Malmquist, 2011).

$$EE(kWe) = 1.837 \left(\frac{kW_{th}}{hora} \right) \cdot (0.30)$$

Teniendo una capacidad de:

$$EE = 0.55(kWe)$$

Considerando menos 5% de autogeneración.

$$EE = 0.522(kWe)$$

Para este caso de estudio el Estado de México se encuentra a 2,644 metros sobre el nivel del mar siendo correspondiente de un 13% al 15% menor.

Ésta es la capacidad de generación eléctrica libre.

$$EE = 0.44(kWe)$$

5.6.2 Energía térmica

Considerando la producción de biogás de 8.43 m³/día y con una concentración de CH₄ de 5.47 m³/día, el biogás puede usarse como combustible. Si se desea para calentar agua, o haciendo un equivalente de CH₄ a gas LP para diferentes usos.

Para obtener los litros de Gas LP_{eq}:

Se usa el poder calorífico del biogás y se divide entre el del Gas LP para saber cuántas calorías son usadas por m³.

$$1m^3 \text{ Gas LP} = 22,400kcal \text{ y } 1m^3 \text{ Biogás} = 4,500kcal$$

Se obtiene a cuanto equivalen 4,500 kcal de biogás en gas LP por metro cúbico:

$$\frac{1m^3 \text{ Gas LP}}{1m^3 \text{ Biogás}} = \frac{22,400 \text{ kcal}}{4,500 \text{ kcal}}$$

Despejando:

$$1m^3 \text{ Gas LP} = \frac{22,400 \cdot (1)}{4,500}$$

Se tiene que:

$$1m^3 \text{ Gas LP equivalen a } 4.97m^3 \text{ Biogás}$$

Por otro lado, se convierte el m³ de gas LP a litros del mismo.

3.8 L de gas LP hacen 1m³ de gas LP (APIZ, 2011):

$$1m^3 \text{ Gas LP} = 3.8 \text{ L Gas LP}$$

Sustituyendo el valor equivalente de biogás en L_{gasLP}:

$$1m^3 \text{ Gas LP} = 3.8 \text{ L Gas LP} = 4.97m^3 \text{ Biogás}$$

Entonces, se obtiene el valor equivalente entre m³ de biogás y litros de gas LP:

$$1m^3 \text{ Biogás} = \frac{(1) \cdot 3.8}{4.97}$$

Entonces se obtiene la equivalencia entre el biogás y el gas LP:

$$1m^3 \text{ Biogás} = 0.76304 \text{ L Gas LP}$$

De lo anterior, se obtiene una equivalencia entre litros de gas LP y la cantidad diaria de biogás producida por el reactor anaerobio. Se tiene una producción de 8.33m³ de biogás al día, entonces:

$$L \text{ Biogás } eq_{LP} = 8.43 \left(\frac{m^3 \text{ Biogás}}{\text{día}} \right) \left(\frac{0.76304 \text{ L Gas LP}}{1m^3 \text{ Biogás}} \right)$$

Se tendrían aproximadamente:

$$L \text{ Biogás } eq_{LP} = 6.43 \left(\frac{L \text{ Gas LP}}{\text{día}} \right)$$

5.7 Energía sustituida con el biogás

Con la puesta del reactor anaerobio únicamente se puede reducir el consumo de gas LP y no de energía eléctrica puesto que la cantidad de biogás generada al día, no resulta eficiente para la generación de electricidad. Pero si es posible, para la generación de energía en forma de calor al ser quemado en estufas y calentadores de agua del CEIEPASP. La cantidad consumida de gas LP durante el 2011 se muestra en la Tabla 5.14.

Tabla 5.14 Cantidad de gas LP consumido por el CEIEPASP durante el 2011

Fecha	Consumo gas LP periodo (l)	Consumo Gas LP (l/día)	Gasto en pesos (\$)
15-Ene-10	335.11	10.81	2,014.00
16-Mar-10	250.02	8.33	1,502.62
15-Abr-10	164.23	5.47	987.00
15-May-10	103.83	3.35	624.00
10-Jun-10	166.56	5.55	1,001.00
23-Jul-10	166.72	5.38	1,002.00
17-Sep-10	249.64	8.32	1,500.35
01-Oct-10	332.78	10.73	2,000.00
18-Nov-10	166.39	5.55	1,000.00
Total	1,935.27		11,630.97

5.8 Factibilidad económica

5.8.1 Inversión y flujo de efectivo

Se contempla cuanto costará monetariamente el proyecto en total, no se tiene contemplado pedir algún préstamo y se pretende que la FVMZ respaldada por la UNAM, lo financie en su totalidad. Existirá una cantidad monetaria con la cual se realizará el proyecto y terminado éste, se realizará la sustitución de gas LP a biogás producido por el reactor. Dando como resultado en un corto periodo de tiempo, que el costo del proyecto será reembolsable y a largo plazo será una ganancia, puesto que el reactor anaerobio ahorrará el gasto de compra de gas LP.

A continuación en la Tabla 5.15 se observa el monto de inversión, considerando un tipo de cambio entre el peso y dólar de \$13.5 pesos/dólar.

Tabla 5.15 Monto de inversión

Producto	Cantidad	\$US	\$MN	IVA	Total
Renta 1 día, retroexcavadora (CAT, 2011)	1.00	255.00	3,443.00	550.88	3,993.88
Renta 1 día, aplanadora (CAT, 2011)	1.00	200.00	2,700.00	432.00	3,132.00
Material y mano de obra	2.00		10,440.00	1,670.40	12,110.40
Tubería de 6" y accesorios (DIC, 2011)	Varios		7,167.00	1,146.72	8,313.72
Tubería de 4" y accesorios(DIC, 2011)	Varios		348.00	55.68	403.68
Tubería de 1" y accesorios(DIC, 2011)	Varios		890.00	142.40	1,032.40
Válvulas de 6"(DIC,2011)	3.00		4,500.00	720.00	5,220.00
Compresor Toolcraft 2.5hp (FER, 2011)	1.00		1,580.00	252.80	1,832.80
Manguera 1" p/compresor (TRUP, 2011)	10m		240.00	38.40	278.40
Geomembrana	230m ²	1,025.00	13,848.00	2,215.68	16,063.68
Inversión parcial			45,156.00	7,224.96	52,380.96
20% adicional (contratista)			9,031.20	1,444.99	10,476.19
Inversión Total					62,857.15

Los flujos de efectivo serán las cantidades monetarias anuales que aporta el reactor anaerobio al reducir el consumo de gas LP. En la Tabla 5.16 se muestra el ahorro energético y monetario consecuente de la generación de biogás por parte del reactor anaerobio. El precio de litro de gas LP es de \$6.01 (SENER, 2012). Solo se pueden aportar 6.44 litros de gas LP equivalentes de biogás al día para reducir el consumo de gas LP en el CEIEPASP. En los meses de febrero, agosto y diciembre no se compró gas LP, por lo que se realizó un ajuste para contemplar el consumo diario de gas LP durante estos meses.

Tabla 5.16 Ahorro monetario en el consumo de gas Lp durante un año

Fecha	Consumo gas LP periodo (L)	Consumo Gas LP (L/día)	Gasto en pesos (\$)	Biogás generado (L. Gas LP.)	Nuevo consumo Gas LP (L/día)	Nuevo Gasto en pesos (\$)	% ahorro	pesos ahorrados (\$)
15-Ene-10	194.48	6.36	1,168.82	6.44	0.00	0.00	100.00	1,168.82
15-Feb-10	194.48	6.36	1,168.82	6.44	0.00	0.00	100.00	1,168.82
15-Mar-10	194.48	6.36	1,168.82	6.44	0.00	0.00	100.00	1,168.82
15-Abr-10	164.50	5.48	988.65	6.44	0.00	0.00	100.00	988.65
15-May-10	104.00	3.35	625.04	6.44	0.00	0.00	100.00	625.04
10-Jun-10	166.67	5.56	1,001.67	6.44	0.00	0.00	100.00	1,001.67
23-Jul-10	138.89	4.57	834.72	6.44	0.00	0.00	100.00	834.72
15-Ago-10	138.89	4.57	834.72	6.44	0.00	0.00	100.00	834.72
15-Sep-10	138.89	4.57	834.72	6.44	0.00	0.00	100.00	834.72
01-Oct-10	166.67	5.44	1,001.67	6.44	0.00	0.00	100.00	1,001.67
18-Nov-10	166.67	5.44	1,001.67	6.44	0.00	0.00	100.00	1,001.67
15-Dic-10	166.67	5.44	1,001.67	6.44	0.00	0.00	100.00	1,001.67
Total anual	1,935.27	5.29	11,630.97		0.00	0.00	100.00	11,630.97

En la Tabla 5.17 se muestran los gastos adicionales del compresor que recircula el biogás, la cantidad aportada por el reactor se ve afectada, puesto que al tener encendido el compresor una hora al día se tiene un gasto anual de \$ 764.4 pesos que se restará al valor ahorrado por el consumo de gas LP.

Tabla 5.17 Ahorro monetario ajustado al consumo del compresor

Cantidad aportada por el ahorro en el gas LP	\$11,630.97
Cantidad consumida por el compresor en un año	-\$764.40
Ahorro total	\$10,866.57

5.8.2 Valor presente neto (VPN)

Para calcular el valor presente neto, la inversión requerida inicial debe considerarse con signo negativo desde el periodo cero. De manera que un resultado positivo significará rendimientos superiores a la tasa de descuento utilizada. Por el contrario, un resultado negativo indicará que el rendimiento estará por debajo de la tasa de descuento demostrando así que el proyecto no es viable.

En el proceso de los flujos de fondos, las cantidades que signifiquen inversión deberán mostrarse con signo negativo. En tanto que la generación de fondos deben tener signo positivo. Esto se debe a que una inversión es una salida de flujos y la generación son entradas (Castilla, 2012).

$$VPN = -S_0 + \sum \frac{S_t}{(1+i)^n} \dots\dots\dots(5-4)$$

Donde:

VPN = Valor presente neto

S₀ = Inversión inicial

S_t = Flujo de efectivo neto del periodo

n = número de periodos de vida del proyecto

i = tasa de recuperación mínima atractiva (TREMA)

Si:

VPN ≥ 0 → El proyecto se acepta.

VPN < 0 → El proyecto se rechaza.

Para nuestro caso, retomando la ecuación 5.4 y de las Tablas 5.14 y 5.15, se plantea probar si el proyecto usando el criterio del VPN es viable, considerando los datos siguientes:

S₀ = 62,857

S_t = 10,866

n = 20 años (FAO, 2011)

i = 15%

La TREMA se tomó con base en CFE puesto que es la tasa utilizada en sus proyectos y varía como máximo de un 15 a un 18%.

Sustituyendo los valores en la ecuación 5-4, se tiene:

$$VPN = -62,857 + \sum_{n=1}^{20} \frac{10,866}{(1+0.15)^n}$$

$$VPN = 5,160.3$$

Debido a que el valor es positivo significa que los flujos de ingresos son mayores a los de egresos, de manera que se va a tener un rendimiento y consecuentemente, sí se llevaría a cabo el proyecto.

5.8.3 Tasa interna de retorno (TIR)

Este método consiste en igualar la inversión inicial, con la suma de los flujos actualizados a una tasa de descuento supuesta, que haga posible su igualdad, si la tasa de interés que hizo posible la igualdad es mayor o igual al costo de capital (i), el proyecto se acepta, de lo contrario se rechaza (Valdés, 2010). Lo anterior se representa matemáticamente en la ecuación 5.5 (FIN, 2012):

$$0 = -S_0 + \sum \frac{S_t}{(1 + TIR)^n} \dots\dots\dots(5-5)$$

Donde:

- S₀ = Inversión inicial
- S_t = Flujo de efectivo neto del periodo
- n = número de periodos de vida del proyecto

Si:

- TIR ≥ K, el proyecto se acepta
- TIR < K, el proyecto se rechaza.

Donde K es la TREMA del proyecto.

Para resolver fácilmente la TIR, se usa la siguiente fórmula (Marco, 2012) de excel:

$$=TIR(flujos monetarios, tipo de interés estimado) \dots\dots\dots(5-6)$$

Donde:

Flujos monetarios: Es el conjunto de valores, tanto positivos como negativos. En la ecuación de Excel, deberá aparecer de la misma forma: cobros en negativo, y pagos en positivo.

Tipo de interés estimado: Este tipo de interés es el que toma Excel como punto de partida para iniciar los cálculos de la TIR. Es decir, un valor sobre el que empezará a pivotar Excel, para calcular la Tasa Interna de Rentabilidad, regularmente Excel toma el 10% como valor pivote.

Para este caso, usando la ecuación 5-6 en Excel, da una TIR del 16.47%. En la Tabla 5.18 se muestra la TIR y el VPN, éste último a 20 años a una tasa del 15%.

Tabla 5.18 Valores del VPN y TIR

Vida útil	Inversión inicial	Aportación anual	VPN	TIR
20 años	62,857.15	10,867	5,160.31	16.47%

El proyecto tiene una recuperación económica aproximada de 14 a 15 años, como se muestra en la Tabla 5.19.

Tabla 5.19 Tiempo de recuperación de la inversión

Año	Saldo al comienzo del año(\$)	Flujo de efectivo al final del año	Saldo al final del año(\$)
0	0	62,857	62,857
1	62,857	10,867	61,419
2	61,419	10,867	59,765
3	59,765	10,867	57,864
4	57,864	10,867	55,677
5	55,677	10,867	53,162
6	53,162	10,867	50,269
7	50,269	10,867	46,943
8	46,943	10,867	43,118
9	43,118	10,867	38,719
10	38,719	10,867	33,660
11	33,660	10,867	27,843
12	27,843	10,867	21,153
13	21,153	10,867	13,459
14	13,459	10,867	4,611
15	4,611	10,867	-5,563

Máximo el proyecto puede tener una rentabilidad del 16.46%, antes de este valor el proyecto genera ganancias, y fuera de éste genera pérdidas.

5.9 Factibilidad ambiental

Los reactores anaerobios son sistemas que ayudan a disminuir las emisiones de gas metano a la atmósfera causantes del efecto invernadero. Los beneficios ambientales son:

- Eliminación de malos olores
- Reducción de patógenos
- Producción de compost sanitizado
- Disminución de los gases efecto invernadero
- Reducción de la dependencia de fertilizantes químicos por su captura y reuso de nutrientes
- Aceptación de mejoras sociales

Esta metodología es aplicable para cualquier tratamiento de residuos, excluyendo los tratamientos no controlados (Valdés, 2010). La siguiente ecuación 5-7 calcula las toneladas equivalentes de CO₂ que se obtienen de las emisiones de metano anuales.

$$CO_{2eqCH_4} = CH_{4\text{ anual}} * \frac{GWPC_{H_4}}{1000} \dots\dots\dots(5-7)$$

Donde:

CO_{2eqCH₄} = Emisión equivalente de bióxido de carbono en toneladas métricas).

CH₄ anual = Producción de metano en (kg/año).

GWPC_{H₄} = Potencial de calentamiento global del metano (GWPC_{H₄}=21).

Para este caso de estudio:

Considerando que la producción diaria de biogás es de:

$$PB_M = 8.43 \left(\frac{m^3 \text{ biogás}}{\text{día}} \right)$$

Y considerando un promedio de un 65% de CH₄ se tiene una producción diaria de metano de:

$$CH_{4 \text{ día}} = 5.47 \left(\frac{m^3 CH_4}{\text{día}} \right)$$

La densidad del metano a 15 °C o más es de 0.68 (kg/m³) y multiplicada por la cantidad de metano generado anualmente se tiene:

$$CH_{4 \text{ año}} = 2,000.01 \left(\frac{m^3 CH_4}{\text{año}} \right) * 0.68 \left(\frac{kg CH_4}{m^3 CH_4} \right)$$

$$CH_{4 \text{ día}} = 1,360.01 \left[\frac{kg CH_4}{\text{año}} \right]$$

Sustituyendo los datos obtenidos de la ecuación 5-7:

$$CO_{2 \text{ eq } CH_4} = 1,360.01 \cdot \frac{21}{1000} \left[\frac{kg CH_4}{\text{año}} \right]$$

Se tiene:

$$CO_{2 \text{ eq } CH_4} = 28.56 [T_{\text{eq}} CO_2]$$

El aprovechamiento de biogás y la utilización del metano, principal compuesto del mismo, al transformarlo en CO₂ mediante su quema directa o bien su aplicación como combustible para accionar motogeneradores, es uno de los beneficios ambientales al atender los factores que inciden en el cambio climático, ya que en términos de contaminación el metano es 21 veces más contaminante que el bióxido de carbono.

El reactor anaerobio produce fertilizante orgánico con alto contenido de nitrógeno, potasio y fósforo (Tabla 5.20). El fertilizante se puede utilizar en tierras de labranza como alternativa a los fertilizantes químicos, conforme a la NOM-004-SEMARNAT-2002.

*Tabla 5.20 Comparación de los niveles de nutrientes entre los lodos digeridos y lodos sin tratar
(Valdés, 2010)*

Nutrientes (%)			
Producto	Nitrógeno	Fósforo	Potasio
Lodos digeridos	5	10	10
Lodos biológicos sin tratar	3.3	2.3	0.3

En la Tabla 5.21 se muestra el mejor método para el tratamiento de desecho biodegradable, como resultado del estudio realizado por la Agencia de Manejo de Energía Ambiental Francesa (Valdés, 2010).

*Tabla 5.21 Comparación entre digestión y compostaje para el tratamiento de desechos biodegradables
(Valdés, 2010)*

	Digestión con utilización del lodo digerido como fermentación y de la producción de energía	Compostaje con su utilización en la agricultura
Energía primaria	xx	
Efecto invernadero		
Eutrofización		Excepto para digestión con la utilización del biogás como combustible para autos en sustitución al diesel
Acidificación del aire	Dependencia de la valorización del biogás	

La utilización del desecho biodegradable para convertirlo en biogás es potencialmente más interesante que el compostaje en términos del potencial efecto invernadero y del balance de energía primaria.

Esta conclusión también se relaciona a las emisiones evitadas de gases efecto invernadero y al consumo evitado de energía primaria, pues la sustitución de los procesos convencionales de generación de energía puede ser posible por el método del biogás que el compostaje.

En relación con el enriquecimiento en nutrientes de un ecosistema (eutrofización), la producción del biogás tiene un impacto más alto que el método de compostaje debido a las grandes cantidades de descarga líquida durante el proceso anaerobio a excepto de su utilización como combustible con la sustitución del diesel en autobuses o carros de la basura. Pero si a la descarga líquida se le aplica un pos-tratamiento, la eutrofización disminuiría grandemente.

En la categoría de la acidificación del aire, la digestión es preferible al compostaje directo de la basura biodegradable para el método de la utilización de biogás como combustible con la sustitución del diesel o de la gasolina y para la utilización del biogás para la producción de calor con la sustitución de gasolina y aceite. La otra utilización del biogás (electricidad, o la sustitución del gas natural para los vehículos) tiene casi la misma cantidad de emisiones ácidas (para la utilización del biogás como combustible que sustituye el gas natural para los vehículos) o levemente más arriba que el compostaje directo de la basura biodegradable (Valdés, 2010).

Capítulo 6. Conclusiones

- Con base en la población animal promedio de 260 animales por año con una generación de excremento de 873 kg/día, se determinó que el reactor anaerobio tipo laguna, es el mejor sistema energético para aprovechar las excretas en el CEIEPASP.
- El tipo de reactor anaerobio se determinó de acuerdo a la cantidad de excremento generado y al espacio destinado para éste por el CEIEPASP. El área asignada para el reactor anaerobio es 200 m² con medidas de 20 x 10m en el corral externo 5.5, con una restricción de no cavar a más de 2m de profundidad por condiciones del sistema de drenajes del CEIEPASP.
- El volumen del reactor anaerobio es de 84m³, con un contenedor de sustrato de 3m³, un contenedor de lodo digerido de 3m³ y una producción de biogás de 8.43 m³/día. El tiempo de residencia hidráulica es de 28 días. El sistema de trabajo es mesófilo.
- En el CEIEPASP la recolección de excretas no es al 100% puesto que los animales salen a pastoreo de 8:30am a 3:00pm y dado esto la generación diaria de excretas dentro del centro, es aproximadamente del 40-60%. El manejo de excretas en el centro comienza cuando los animales salen a pastoreo, esto incluye el traslado de excretas del corral de origen hasta al corral en donde se acumulan para su posterior uso.
- La propuesta de manejo de excretas en el CEIEPASP no se ve afectada del todo puesto que lo único modificado es la acumulación de excrementos. Se propone que en lugar de acumular los excrementos en el corral externo 5.5, sean depositados en el contenedor del sustrato, para su mezclado con una relación volumétrica de 1:1 con agua.
- Los residuos o desechos del reactor anaerobio pueden ser utilizados como fertilizante orgánico de igual manera que se hacía con los excrementos antes de tratar.
- Se puede modificar el diseño de todo el reactor anaerobio mediante ingeniería ambiental para lograr una mayor eficiencia.

- El biogás obtenido del reactor anaerobio es capaz de sustituir al gas LP consumido en el CEIEPASP desde un mínimo 90 % hasta un máximo 100 %. El biogás no utilizado puede ser almacenado para un posterior uso, en un periodo de 7 días dentro de la misma bolsa de geomembrana. Para energía eléctrica, el ahorro queda descartado, ya que se generarían 0.44kWe.
- El valor del presente neto es \$5,160.31 con una tasa del 15% a 20 años, y la TIR es de 16.47%. Lo que indica que es factible económicamente y que la inversión se recuperaría de 14 a 15 años. La reducción de gases efecto invernadero será de 28.56 TonCO₂eq/año.
- Con la implementación del reactor anaerobio, el CEIEPASP deja de generar 0.08 toneladas métricas de dióxido de carbono al día y con esto se logra sustituir un plantío de 488.8 m² de árboles maduros que sería necesario para mitigar la cantidad de CO₂ generada.
- Con base en el estudio realizado, es necesaria la implementación de un reactor anaerobio en el CEIEPASP con el fin de contribuir a la mitigación de gases de efecto invernadero.

Referencias

1. 2000AGRO, 2011. Manejo de desechos en granjas pecuarias. Publicación de 2000AGRO Revista industrial del campo. México.
2. AEE, 2005. Ahorro y Eficiencia Energética en Instalaciones Ganaderas. Publicación del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. 2005. Madrid, España.
3. Agerieria, 2011. Biodigestor con geomembranas. Publicación de Eg-ingeniería. Santa Fé, Argentina. 2011.
4. AGROE, 2011. Self Mixing Digester - Digestor de Auto Mezclado. Publicación de Agroenergien. Mayo 2008. España.
5. Alatorre, C. 2009. Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México. Ed. Forever Print S.A. de C.V. México, D.F., México.
6. Alcalá, J. 2009. Energía eólica en México. Tesis de Licenciatura de Ingeniería Eléctrica Electrónica. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, D.F. México.
7. Alcalde, M. 2009. Estudio técnico y económico en la implementación de biodigestores en zonas rurales del Estado de México a partir de desechos orgánicos. Tesis de Licenciatura de Ingeniería Química. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, D.F. México.
8. APIZ, 2011. ¿Gas Natural o Gas L.P.?..., Publicación de Gas central de Apizaco. Corp. San Ángel. Apizaco, Puebla, México.
9. Brambila, C. 2008. Factibilidad de la micro-generación de energía eléctrica a partir de biogás producido de desechos de granjas piscícolas en el Estado de México. Tesis de Licenciatura de Ingeniería Eléctrica Electrónica. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. D.F. México.

10. Burgos, I. 2010. Degradación anaerobia de los desechos sólidos de un rastro municipal del estado de México. Tesis de Licenciatura de Química en Alimentos. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. D.F. México.
11. Carranza, E. 2008. Reutilización de aguas y lodos residuales. Universidad Politécnica de Madrid. Ed. CONCYTEC. Madrid, España.
12. Castilla, G. 2012. Cálculo del VPN. Publicación de la Universidad de las Américas. Puebla, Puebla, México.
13. Castro, A. 2011a. Planeación e instalación de sistemas de bionergía. Presentación del curso: Diseño, selección, construcción y operación de plantas de biogás.ppt. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. D.F. México.
14. Castro, A. 2011b. Planeación e instalación de sistemas de bionergía. Presentación del curso: Factores cinéticos y físico-químicos que intervienen en la producción de biogás.ppt. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. D.F. México.
15. Castro, A. 2011c. Planeación e instalación de sistemas de bionergía. Presentación del curso: Reactores biológicos productores de biogás.ppt. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. D.F. México.
16. Castro, A. 2011d. Planeación e instalación de sistemas de bionergía. Presentación del curso: Materiales para generación de biogás y otros subproductos. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. D.F. México.
17. CAT, 2011. Renta de equipo industrial. Maquinas Diesel, SA de CV. México.
18. CFE, 2008. "Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico". Publicación de la Comisión Federal de Electricidad. D.F. 2007. México, D.F. México

19. DIC, 2011. "Tubería Hidráulica Cementar P.V.C.". Publicación de DIC, S.A. de C.V. México, D.F. México.
20. DOF, 2008a. Ley de Promoción Y Desarrollo de los Bioenergéticos. Publicación del Diario Oficial de la Federación el 1º de febrero de 2008. Editado por la Secretaría de Gobernación. México, D.F. México.
21. DOF, 2008b. Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética. Publicación del Diario Oficial de la Federación el 28 de noviembre de 2008. Editado por la Secretaría de Gobernación México, D.F. México.
22. EPA, 2003. Environmental regulations and technology control of pathogens and vector attraction in sewage sludge. Publicación de Environmental Protection Agency. EPA/625/R-92/013. EEUU.
23. FAO, 2011. Capítulo 5. Análisis de costos de producción y de beneficio-costos de los modelos de tratamiento. México. Septiembre 2011. Publicación de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia.
24. FER, 2011. Compresor De Aire Toocraft. México. Mercado libre. México, D.F. México.
25. FIN, 2012. ¿Qué es la Tasa Interna de Retorno? Publicación de Finanzas Prácticas. México, D.F. México.
26. FMVZ, 2011a. C.E.I.E.P.A.S.P Chapa de Mota. Publicación de la Facultad de Medicina, Veterinaria y Zootecnia. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. D.F. México.
27. FMVZ, 2011b. Información de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Publicación de la Facultad de Medicina, Veterinaria y Zootecnia. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. D.F. México.

28. Gómez, E. 2006. Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México. Publicación de la Secretaría de Energía. México, D.F. México.
29. González, E. 2009. Producción de bioenergía en el norte de México: Tan lejos y tan cerca... Publicación de **Frontera norte**. Dirección General de Bibliotecas. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. D.F. México.
30. Guzmán, R. 2008. Energías sustentables en la reforma energética. Publicación virtual de medio ambiente en México. México D.F. México.
31. Hartmut, G. Kokott, J. y Kulesa, M., 2003. World in Transition: Towards Sustainable Energy Systems. Ed. Earthscan. Londres, Inglaterra.
32. IDAE, 2007. Biomasa: Digestores anaerobios. Publicación del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Madrid, España.
33. IILSEN, 2004. Nuevas energías renovables: Una alternativa energética sustentable para México. Publicación del Instituto de Investigaciones Legislativas del Senado de la República. México, D.F. México.
34. INEGI, 2007a. Metodología y resultados del VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal. Publicación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México, D.F. México.
35. INEGI, 2007b. VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal. Publicación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México, D.F. México.
36. INEGI, 2011. Clima del estado de México. Información por entidad. Publicación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México, D.F. México.
37. López M., 2000. Lodos Residuales: Estudio comparativo de dos métodos para la desinfección de lodos residuales provenientes de una planta de tratamiento de agua residual. Tesis de Licenciatura de la carrera de Ingeniería Química, Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. D.F. México.

38. Lugones, B. 2011. Análisis de biodigestores. Publicación virtual sobre reactores anaerobios. Cuba.
39. Malmquist, A. 2011. Microturbina ABB MT100, unidad de energía y calor combinados. Ficha técnica de la unidad CHP modelo ABBMT100. Publicación de ABB Motors. EEUU.
40. Marco, J. 2012. Calcular la TIR y el VAN. Publicación virtual sobre la tasa interna de retorno. México. D.F. México.
41. Martínez, A. 2008. Utilización de biodigestores para la reducción de gases de efecto invernadero. Tesis de Licenciatura de Ingeniería Eléctrica Electrónica. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. D.F. México.
42. Martínez, C. 2011. Orientaciones sobre el cálculo del volumen de residuales que se debe disponer en un biodigestor. Publicación virtual sobre reactores anaerobios. Cuba.
43. Mejía, G. 1996. Digestión Anaerobia. Folleto técnico I. Publicación de la Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.
44. Mirez, J. 2011. J253: Los biodigestores chino e indio. Publicación virtual sobre reactores anaerobios. Lima, Perú.
45. Pacheco, J. y Magaña, E. 2003. Arranque de un reactor anaerobio. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán. 2003. Mérida, Yucatán, México.
46. PAKS, 2011. Biogas Plant Construction Manual Fixed-dome Digester. Publicación de Pakistan's First Science, Technology. Pakistán.
47. Perduni, M. 2005. Penetración de las fuentes renovables de energía en México.

Publicación del grupo de Analítica Consultores S.A. de C.V. 2005. México, D.F. México.

48. PUC, 2011. celdas de combustible y generación distribuida. Publicación de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.
49. SAGARPA, 2007a. Situación del sector pecuario en México. Publicación de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Morelia, Michoacán. México.
50. SAGARPA, 2007b. Aprovechamiento de biogás para la generación de energía eléctrica en el sector agropecuario. Publicación de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D.F. México.
51. SAGARPA, 2011a. La SAGARPA y el cambio climático. Glosario de términos. Publicación de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D.F. México.
52. SAGARPA, 2011b. Tecnologías de mitigación. Técnicas sobre Actividades Agrícolas, Pecuarias y de Traspatio. Publicación de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D.F. México.
53. SAGARPA, 2011c. Utilización de estercoles. Fichas Técnicas sobre Actividades Agrícolas, Pecuarias y de Traspatio. Publicación de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D.F. México.
54. Sánchez, S. 2003. Energías Renovables: Conceptos y Aplicaciones. Publicación de la Fundación Natura. Quito, Ecuador.
55. SCTD, 2011. Using a biogas digester. Practical action. The Schumacher centre for technology and development. Warwickshire, Reino Unido.
56. SEMARNAT, 2002. Norma oficial NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental. Lodos y bio-sólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Publicación de la Secretaría de Medio

Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F., México.

57. SENER, 2007. Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables. Publicación de la Secretaria de Energía. México, D.F. México.
58. SENER, 2012. Cálculo de consumo de gas LP. PublicaAplicación para calcular el consumo de gas LP en la industria y en el hogar. Publicación de la Secretaria de Energía. México, D.F. México.
59. Soliclima, 2009. Sería posible proveer de energía a los países en desarrollo a través de plantas de biogás. Publicación de Soliclima Energía Solar. Madrid, España.
60. TEXC, 2011. Usos del biogás. Septiembre 2011. Publicacion virtual sobre el uso de biogás. México, D.F. México.
61. TRUP, 2011. Mangueras de nivel, industriales y exhibidor. Publicación de Trupper SA de CV. México, D.F. México.
62. UNFCCC, 1997. Protocolo de Kyoto de la convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Publicación de la Organización de las Naciones Unidas. Kyoto, Japón.
63. Valdés, G. 2010. Factibilidad para convertir una planta de energías residuales en una planta generadora de energía eléctrica. Tesis de Licenciatura de Ingeniería Eléctrica Electrónica. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. D.F. México.