



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA PLANTA DE
DIGESTIÓN ANAEROBIA PARA LA
PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLE DE USO
VEHÍCULAR**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A (N)

Armando De Jesús Hernández

María Esther Sánchez García

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017



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.



DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/081/17

Señores
MARÍA ESTHER SÁNCHEZ GARCÍA
ARMANDO DE JESÚS HERNÁNDEZ
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. RODRIGO TAKASHI SEPÚLVEDA HIROSE, que aprobó este Comité, para que lo desarrollen ustedes como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA PLANTA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLE DE USO VEHÍCULAR"

- INTRODUCCIÓN
- I. OBJETIVO
- II. PROBLEMÁTICA EN LA CIUDAD DE MÉXICO
- III. BIOGÁS
- IV. DISEÑO DE UNA PLANTA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA
- V. EVALUACIÓN DEL PROYECTO
- VI. CONCLUSIONES
- ANEXOS
- REFERENCIAS

Ruego a ustedes cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo les recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 5 de septiembre del 2017.
EL PRESIDENTE


M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH*gar.



Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, a la Facultad de Ingeniería y a los docentes, en especial al M. I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose, por la formación recibida en la máxima casa de estudios.

Agradezco a mis padres, Armando De Jesús León y María de los Ángeles Hernández Ramos, por hacer de mi una persona íntegra, por todos los consejos y apoyo recibido a lo largo de los años, por hacer mi niñez increíble y mi vida feliz, los amo.

A mis hermanos, Esteban De Jesús Hernández y Pablo De Jesús Hernández, por siempre hacerme reír sin importar la situación y ser mi inspiración para seguir adelante.

De igual manera agradezco a mi pareja Kenia Helein por su apoyo, paciencia, cariño y amor, que me ha brindado sin condiciones en este duro camino que apenas comienza; a mi colega Esther Sánchez por aceptar el trabajar en esta tesis juntos; a todos mis familiares y amigos que me han enseñado tantas cosas y marcado mi vida de una manera especial.

Por último agradezco a Dios, ya que sin su amor lo anterior no habría sucedido.

Armando De Jesús Hernández.



En primer lugar, quiero agradecer a Dios por darme la oportunidad de estudiar esta carrera, por darme la fuerza para afrontar los retos encontrados y permitirme llegar a este punto victoriosamente.

Gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México que es la máxima casa de estudios por darme la oportunidad de ser parte de su alumnado, a la Facultad de Ingeniería y a mis profesores de carrera por haber formado y fortalecido mis conocimientos para poder contar con el título de Ingeniera Civil, agradezco especialmente al M.I. Rodrigo Sepúlveda por el apoyo en la realización de este trabajo y por la amistad ofrecida.

A mis padres que estuvieron en todo momento velando por mis deseos y estabilidad, a mi padre por que fue ejemplo de entereza, amor, responsabilidad, perseverancia; gracias a ese ejemplo logre realizar este sueño.

María Esther Sánchez García



Dedicatorias

Dedico este trabajo de una manera muy especial a mis padres, Armando De Jesús León y María de los Ángeles Hernández Ramos, ya que aquí se ven culminados 24 años de esfuerzo y dedicación de su parte, gracias.

Armando De Jesús Hernández.



A mi padre, mi ingeniero favorito, por haberme entregado el regalo de la vida, por el apoyo que siempre me brindo, por los valiosos consejos entregados, por ser un hombre con alma de niño que a través de sus sueños convirtió mi historia en la mejor que pude haber tenido, por ser un hombre justo, amoroso y dedicado. A ti mi Inge, todos los logros obtenidos son en tu honor, te amo.

(07-enero-1958 - 30-junio-2015)

A mi madre por ser incondicional y permitirme alcanzar uno de mis más anhelados deseos. Señora gracias por la paciencia y el esfuerzo entregado, gracias por ser la mujer que nunca se rindió ante la adversidad, por ser ejemplo de optimismo a pesar de tener todo en contra.

A Luis Enrique, porque eres el proyecto más importante que tengo en la vida, gracias por entenderme y permitirme llevarte de la mano a lo largo del camino elegido, por apoyarme y ser mi mejor amigo, te amo infinito.

A Edgar por las incontables tazas de café compartidas, por hacerme compañía en mis desvelos durante la carrera, gracias por la dedicación y los años entregados. Gracias por ser mi cómplice y la fuga de mis misterios y enigmas, Te amo.

A mis hermanos Cristina, Enrique y Verónica por acompañarme con amor en el camino en los momentos de flaqueza, de vulnerabilidad y de angustia. A mi tía Bertha y a toda mi familia por su cariño y sus palabras de apoyo.

A mis amigos que hicieron muy amena la trayectoria en mi amada Facultad, por ser cómplices, confidentes y hasta profesores en los momentos de obscuridad.

María Esther Sánchez García



Contenido

INTRODUCCIÓN	XIII
OBJETIVO.....	XIV
1. PROBLEMÁTICA EN LA CIUDAD DE MÉXICO.....	1
1.1. CONTAMINACIÓN DEL AIRE.....	1
1.2. EMISIONES DE CONTAMINANTES DE LAS FUENTES MÓVILES Y NO FIJAS	2
1.3. SITUACIÓN DEL AIRE EN LA CDMX.....	4
1.4. ACCIONES COMPLEMENTARIAS	8
1.5. RESIDUOS SÓLIDOS.....	9
1.6. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS	11
1.7. FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (FORSU).....	13
1.8. COMPOSICIÓN QUÍMICA	15
1.9. TRATAMIENTO DE LA FORSU	16
1.10. GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS.....	19
1.11. PANORAMA GENERAL DE RSU EN LA CDMX	23
1.12. IMPACTOS GENERALES DE LOS RESIDUOS	29
2. BIOGÁS.....	32
2.1. CONTAMINACIÓN DEL AIRE.....	32
2.2. DIGESTIÓN ANAEROBIA	32
2.3. PARÁMETROS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	37
2.4. COMPOSICIÓN QUÍMICA Y CARACTERÍSTICAS DEL BIOGÁS	40
2.5. USOS DEL BIOGÁS	42



2.6.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA UTILIZACIÓN DE BIOGÁS	45
2.7.	EL BIOGÁS COMO COMBUSTIBLE ALTERNATIVO	47
2.8.	ESTADO DEL ARTE.....	57
3.	DISEÑO DE UNA PLANTA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	64
3.1.	CRITERIOS DE DISEÑO	64
3.2.	CARACTERÍSTICAS DEL SUSTRATO	69
3.3.	PRETRATAMIENTO	71
3.4.	TANQUE DE IGUALACIÓN	74
3.5.	PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	75
3.6.	BIODIGESTOR.....	84
3.7.	ALMACENAMIENTO DEL DIGESTATO	91
3.8.	ALMACENAMIENTO DEL BIOGÁS	94
3.9.	LIMPIEZA DEL BIOGÁS.....	95
4.	EVALUACIÓN DEL PROYECTO	97
4.1.	DEFINICIÓN	97
4.2.	PRINCIPALES INDICADORES ECONÓMICOS	98
4.3.	EVALUACIÓN DE INTANGIBLES	100
4.4.	CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DEL PROYECTO	102
4.5.	CONSIDERACIONES DE LA EVALUACIÓN DEL PROYECTO	104
4.5.1.	<i>Análisis de emisiones generadas</i>	<i>104</i>
4.5.2.	<i>Análisis del costo de la gasolina y del biogás</i>	<i>107</i>
4.5.3.	<i>Análisis social: Salud.....</i>	<i>108</i>



4.5.4. <i>Análisis ambiental</i>	112
4.6. EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO.....	115
4.7. PROYECCIONES FINANCIERAS	118
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	124
ANEXO 1	127
ANEXO: NORMA OFICIAL MEXICANA	133
REFERENCIAS	135



Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de Residuos Sólidos	10
Tabla 2. Capacidad de biodegradación de los residuos sólidos orgánicos	13
Tabla 3. Procesos biológicos para el tratamiento de la FORSU	17
Tabla 4. Proyección de la generación per cápita y total de RSU de 2005 a 2020	25
Tabla 5. Generación per cápita de Residuos Sólidos Urbanos en la Ciudad de México	25
Tabla 6. Generación anual de RSU	27
Tabla 7. Impactos generales de los tiraderos a cielo abierto.	30
Tabla 8. Beneficios de la digestión anaerobia de residuos orgánicos	33
Tabla 9. Composición del biogás	40
Tabla 10. Características generales del biogás	41
Tabla 11. Ventajas y desventajas ambientales del biogás	45
Tabla 12. Ventajas y desventajas económicas del biogás	46
Tabla 13. Ventajas y desventajas sociales del biogás	46
Tabla 14. Emisiones de diferentes combustibles	56
Tabla 15. Comparación entre sistemas secos y sistemas húmedos	68
Tabla 16. Caracterización del sustrato	69
Tabla 17. Cálculo del volumen de agua para la dilución	73
Tabla 18. Sólidos en la muestra y en el afluente del biodigestor	76
Tabla 19. Parámetros de diseño en sistemas anaerobios	81
Tabla 20. Producción de metano y biogás	82
Tabla 21, Volumen del biodigestor por tiempo de retención hidráulico	85
Tabla 22. Parámetros de diseño del biodigestor	88
Tabla 23. Ventajas y desventajas del acero en biodigestores	89
Tabla 24. Equivalencia energética	104
Tabla 25. Emisiones de CO ₂ de diferentes combustibles	105
Tabla 26. Emisiones de CO ₂ totales por vehículo y por los que se cubrirían con la planta	106



Tabla 27. Precio de los principales combustibles	107
Tabla 28. Comparativo entre gasolina magna y biogás	107
Tabla 29. Consideraciones para el cálculo de los gastos de salud.....	110
Tabla 30. Porcentaje de muertes por contaminación atmosférica	111
Tabla 31. Costo total ambiental	113
Tabla 32. Factores ambientales	114
Tabla 33. Salario de la plantilla para la operación de la planta de biogás.....	116
Tabla 34. Resumen de los costos intangibles	117
Tabla 35. Proyecciones financieras.....	119
Tabla 36. Flujos de efectivo	121
Tabla 37. Resumen del análisis financiero.....	123



Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Contribución de emisiones por sector	2
Ilustración 2. Emisiones generadas por fuentes móviles 2016	3
Ilustración 3. Emisiones generadas en 2014	5
Ilustración 4. Crecimiento vehicular en la Ciudad de México.....	6
Ilustración 5. Efectos de los contaminantes en la salud humana	7
Ilustración 6 Fundamentos de la generación de residuos.....	20
Ilustración 7 Generación per cápita de Residuos Sólidos Urbanos en la Ciudad de México.....	26
Ilustración 8 Generación anual de RSU.....	28
Ilustración 9 Fase de la digestión anaerobia.....	34
Ilustración 10. Producción de metano dependiendo del pH.....	37
Ilustración 11. Producción de metano dependiendo de la temperatura.....	39
Ilustración 12 Purificación del biogás	42
Ilustración 13. Usos del biogás.....	44
Ilustración 14. Esquema de vehículo adaptado para biogás.	52
Ilustración 15. Producción de biogás en Suecia.....	59
Ilustración 16. Producción de biogás en Suecia.....	62
Ilustración 17. Cambio climático.....	63
Ilustración 18. Ubicación de la planta de DA.....	65
Ilustración 19. Sitio de la planta de DA.....	66
Ilustración 20. Producción de metano y biogás	83
Ilustración 21. Comparación del volumen del biodigestor con la producción de metano y biogás según el tiempo de retención hidráulico.....	86
Ilustración 22. Emisiones de CO ₂ de diferentes combustibles	105
Ilustración 23. Porcentaje comparativo de combustibles	108

Índice de esquemas

Esquema 1. Planta de Digestión Anaerobia	96
--	----



Introducción

La Ciudad de México es una urbe de constante crecimiento y evolución, en la cual a lo largo de los años sus habitantes han tenido que satisfacer necesidades como vivienda, alimento y transporte. Estas dos últimas han generado un impacto importante en el medio ambiente debido a la cantidad de residuos sólidos que se generan producto del consumo doméstico; y de la cantidad de contaminantes que son emitidos a la atmósfera producto de la combustión de hidrocarburos por vehículos, teniendo a la ciudad en los primeros lugares de contaminación a nivel mundial.

Por lo anterior toma relevancia el uso de energías alternativas, renovables y sustentables, que satisfagan de manera óptima la necesidad de transporte y que reduzca de manera significativa el uso de hidrocarburos en la Ciudad de México.

En este sentido el biogás como energía alternativa en vehículos es pertinente dentro del contexto de las problemáticas mencionadas, debido a que en la Ciudad de México cerca del 50% de los residuos sólidos urbanos está conformado por desechos orgánicos, que es la materia prima de este combustible, lo que asegura que habrá recursos disponibles y de manera continua, además que se tendrá una mejor gestión de los residuos sólidos urbanos. Por otra parte, se reducirán las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera teniendo una mejora en la calidad del aire y los beneficios que esto conlleva.



Evaluación de una planta de digestión anaerobia para la producción de biogás como combustible alternativo

Objetivo

Diseñar una planta de digestión anaerobia generadora de biocombustible a partir de la fracción orgánica de residuos sólidos, así como evaluar la viabilidad de su aplicación como combustible vehicular en la Ciudad de México.



1. PROBLEMÁTICA EN LA CIUDAD DE MÉXICO

1.1. Contaminación del aire

La contaminación del aire puede ser definida como la situación en que las concentraciones de sustancias presentes en la atmósfera son suficientemente altas sobre los niveles normales en el ambiente y estos producen efectos nocivos en los seres humanos, vegetación o materiales (Seinfeld y Pandis, 2006). Estas emisiones pueden tener su origen a partir de diversos factores y que están agrupados en emisiones naturales y emisiones antropogénicas.

La contaminación del aire depende de las fuentes que producen los elementos nocivos a la atmósfera; según la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2005), se clasifican en fuentes fijas o móviles, de área o puntuales, y naturales o artificiales. Los contaminantes del aire pueden estar presentes como compuestos gaseosos, aerosoles y material particulado.

El Programa de Investigación en Cambio Climático de la UNAM (PINCC, 2016) identificó que México es una de las principales naciones contaminantes a nivel mundial derivado de la quema de combustibles fósiles.

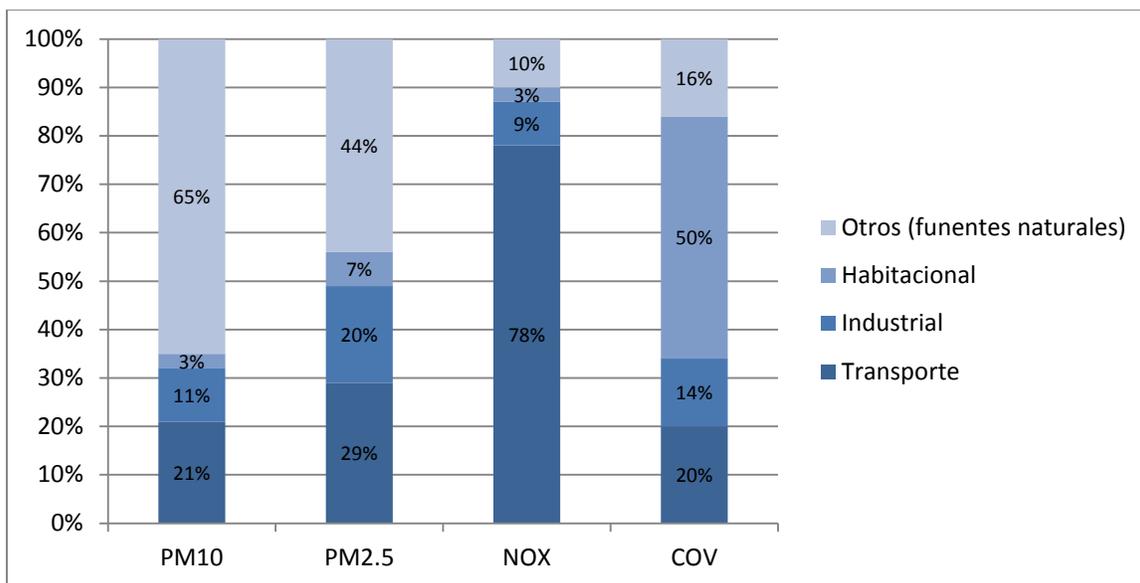


1.2. Emisiones de contaminantes de las fuentes móviles y no fijas

En relación con las fuentes móviles se tiene que son aquellas que el origen de los contaminantes es por parte de los vehículos (terrestres: camiones, automóviles particulares y públicos, etc.; aéreos: aviones, helicópteros, etc.); en sí, todos aquellos equipos o maquinarias no fijas con motores de combustión, que con su operación generen emisiones contaminantes.

Cabe destacar que la principal fuente de emisiones provenientes de los vehículos son COV, SO_x, PM y NO_x, producidos durante la combustión, además representan contaminantes tóxicos del aire, en la ilustración 1 se muestra el porcentaje de emisiones en la CDMX (Aire de la Ciudad de México, 2016).

Ilustración 1. Contribución de emisiones por sector

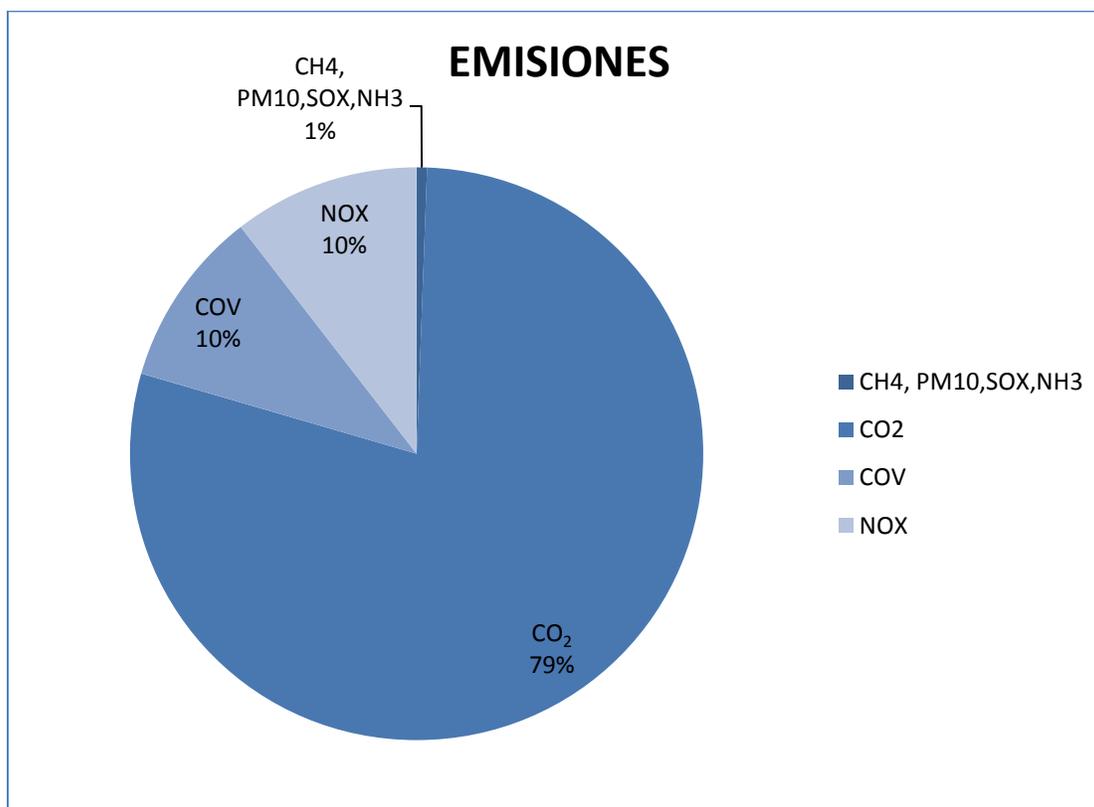


Fuente: Aire Ciudad de México (2016)



En este mismo contexto la CDMX en su página oficial presenta el inventario de emisiones originadas por fuentes móviles que representan el 79% del total, de las cuales se identificó el porcentaje de los contaminantes que la integran, mostradas en la ilustración 2 (Aire de la Ciudad de México, 2016).

Ilustración 2. Emisiones generadas por fuentes móviles 2016



Fuente: Aire de la Ciudad de México (2016)



1.3. Situación del aire en la CDMX

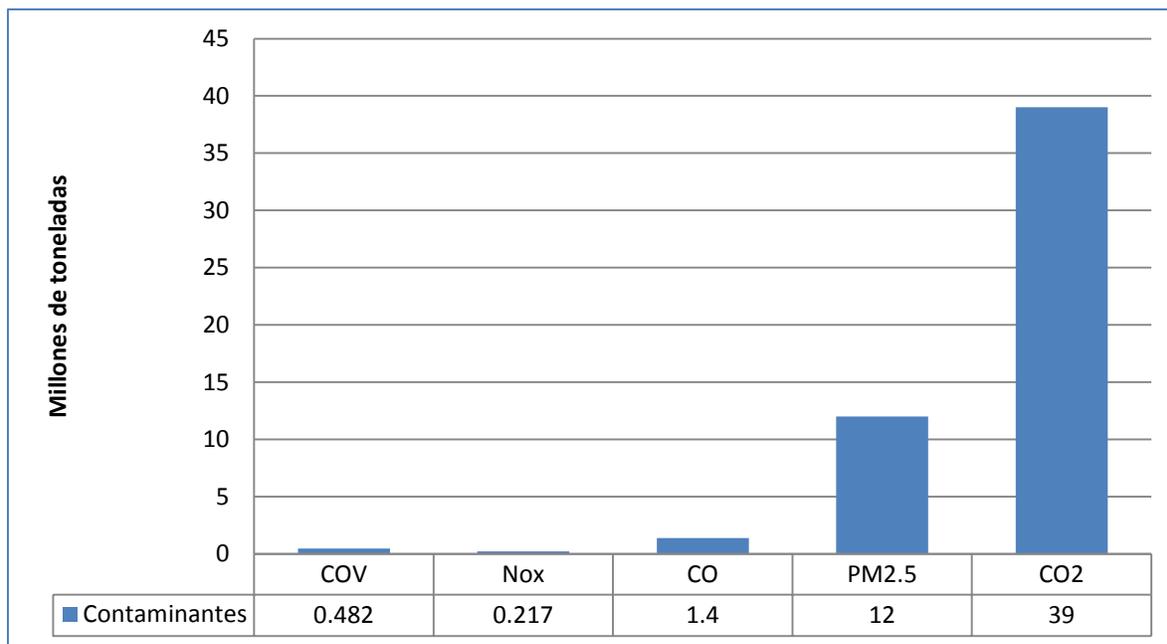
El crecimiento desordenado de la población en la CDMX origina una estructura urbana extendida, disfuncional, fragmentada y con inequidades sociales, producto de procesos socioeconómicos, políticos y ambientales desarticulados. El resultado de lo anterior, ha propiciado un mayor número de desplazamientos cada vez más prolongados. Actualmente, se realizan 22 millones de viajes diarios en poco más de 5 millones de vehículos. Asociado a esto, y para satisfacer las demandas energéticas de la población, en la ZMVM se consumen diariamente más de 46 millones de litros de gasolina, que es directamente proporcional a las emisiones de contaminantes y de compuestos de efecto invernadero. Aunado a lo anterior, se suman las emisiones de la industria y de los más de 800 mil comercios de diferentes giros y tamaños, así como a otras fuentes contaminantes, como las viviendas y las fuentes naturales (vegetación y suelos). Según el Programa General de Desarrollo Urbano (PGDU, 2017) para el año 2014 se estimaron aproximadamente:

- 482 mil toneladas de compuestos orgánicos volátiles (COV),
- 217 mil toneladas de óxidos de nitrógeno (NO_x),
- 1.4 millones de toneladas de Monóxido de Carbono (CO),
- 12 mil toneladas de partículas menores a dos micras (PM_{2.5}),
- 39 millones de toneladas de Dióxido de Carbono (CO₂).

En la ilustración 3 se presentan los valores mencionados previamente, en millones de toneladas.



Ilustración 3. Emisiones generadas en 2014



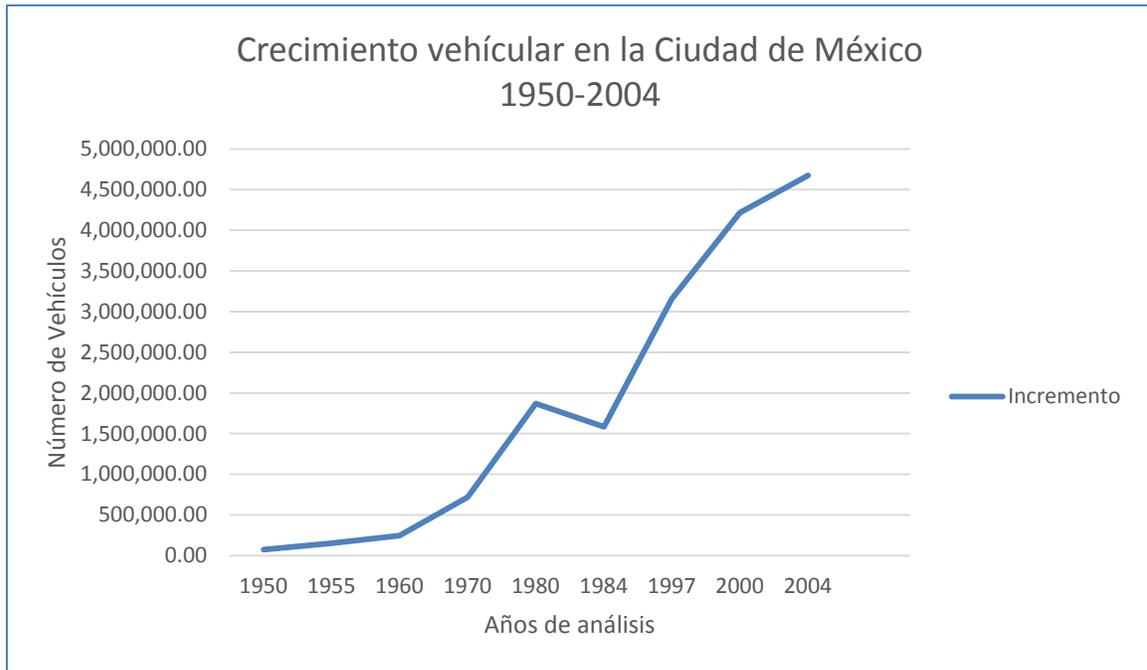
Fuente: PGDU (2017)

La exposición aguda y crónica a la contaminación del aire se asocia con el incremento de la mortalidad y morbilidad (PROAIRE 2011-2020). La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que la contaminación del aire es responsable de 1.4% de todas las muertes prematuras a nivel mundial y de 0.8% de la pérdida de años de vida con plena salud (PGDU, 2017).

De acuerdo al anuario estadístico de los Estados Unidos Mexicanos de 1951 a 1971, al anuario de vialidad y transporte del DDF de 1984, estadísticas del medio ambiente del Distrito Federal y Zona Metropolitana y el anuario estadístico de la Ciudad de México y del Estado de México, se puede observar un crecimiento exponencial en los vehículos (automóviles, camiones, camiones de carga, autobuses y motocicletas) de 1950 al 2004, que va de 74 327 a 4 672 628 en la Ciudad de México. Este incremento, se puede observar en la ilustración 4.



Ilustración 4. Crecimiento vehicular en la Ciudad de México

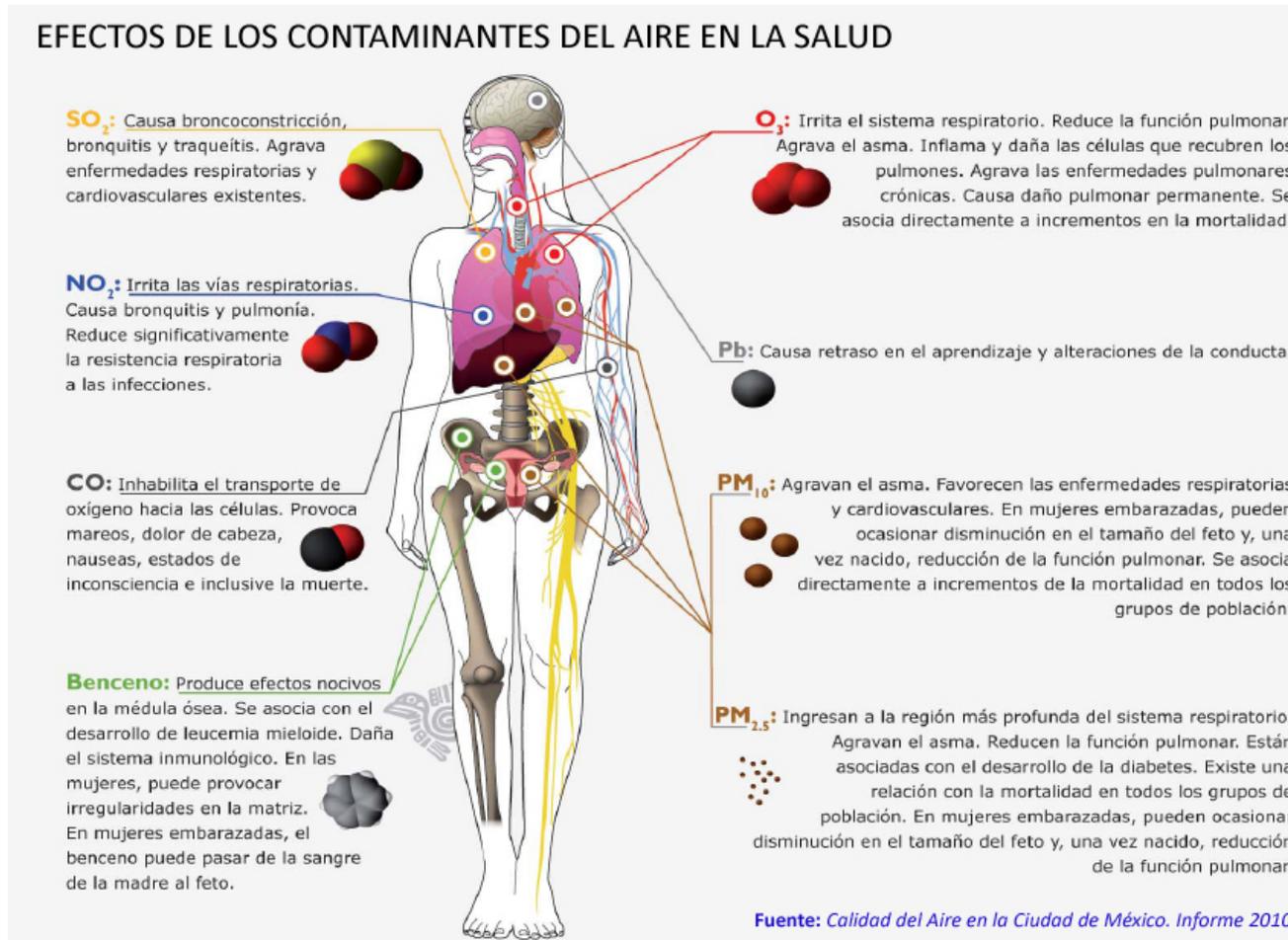


Fuente: Padilla (2007)

De acuerdo con el monitoreo de calidad de aire reportado en la CDMX, la principal fuente de emisión de contaminantes son las móviles, seguido por las fuentes de área, industria, de hogares y las emisiones de fuentes naturales.

Lo anterior tiene un efecto negativo en la salud humana como se muestra en la ilustración 5, y en el medio ambiente; se ha demostrado a través de diversos estudios nacionales e internacionales que la generación de estos contaminantes impacta significativamente en el aumento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

Ilustración 5. Efectos de los contaminantes en la salud humana



Fuente: Calidad del aire en la Ciudad de México. Informe (2010)



1.4. Acciones complementarias

Una manera de proteger la salud de la población es a través del monitoreo y la difusión continua del estado de la calidad del aire. En la Ciudad de México, el Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) es el responsable de la medición permanente de los principales contaminantes del aire, su objetivo es generar información para:

1. Cuantificar los niveles de contaminación del aire a los que la población está expuesta.
2. Verificar el cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas de salud ambiental en la CDMX.
3. Calcular la calidad del aire con respecto a la concentración de los contaminantes.
4. Divulgar a la población sobre los niveles de contaminación y sus posibles riesgos.
5. Efectuar de manera oportuna la activación o desactivación de alertas y procedimientos de emergencia.
6. Informar de manera inmediata a la población sobre la calidad del aire.
7. Generar información que permita la evaluación de la distribución espacial y el transporte de los contaminantes atmosféricos.
8. Generar datos confiables de gestión de la calidad del aire instrumentados en la Ciudad de México.
9. Evaluar los parámetros históricos a los que han llegado los contaminantes en la Ciudad de México.

El SIMAT posee 40 sitios de monitoreo del aire en el área metropolitana, abarcando la Ciudad de México y zonas del Estado de México. Los equipos que se utilizan para dicho monitoreo son continuos y permiten realizar la medición de los contaminantes requeridos por la normatividad federal: dióxido de azufre, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, ozono y partículas



suspendidas. En algunos casos, se miden las principales variables meteorológicas de superficie, incluyendo la radiación solar ultravioleta (Aire de la Ciudad de México, 2016).

1.5. Residuos Sólidos

Los residuos sólidos (RS) son el resultado de cualquier objeto o material de desecho que se produce tras la fabricación, transformación, extracción, producción, consumo, utilización, reparación o tratamiento de otros productos o sustancias, cuya calidad no permite que se usen nuevamente; sin embargo, pueden ser objeto de tratamiento y reciclaje, ya que generalmente se abandonan después de ser utilizados (Fraume, 2007).

Los residuos sólidos se clasifican con base en la fuente de producción, composición y tipo de actividad en la que se originan. Tchobanoglous (1994) hace la clasificación utilizando dichos criterios, como se muestra en la tabla 1.



Tabla 1. Clasificación de Residuos Sólidos

Fuente	Actividades o localizaciones donde se generan	Tipo de residuos sólidos
Doméstica	Viviendas de diferente estrato social (unifamiliar y multifamiliar).	Residuos de comida, papel, cartón, plásticos, textiles, cuero, residuos de jardín, madera, vidrio, latas de hojalata aluminio, otros metales, cenizas, hojas en la calle, residuos de manejo especial, residuos domésticos peligrosos.
Comercial	Tiendas, restaurantes, mercados, edificios de oficinas, hoteles, imprentas, gasolineras, talleres mecánicos, entre otros.	Papel, cartón, plásticos, madera, residuos de manejo especial*, residuos peligrosos.
Institucional	Escuelas, hospitales, cárceles, centros gubernamentales.	
Construcción demolición	Lugares de construcción de casas y edificios, reparación/renovación de carreteras, demolición de edificios, repavimentación.	Madera, acero, concreto, residuos de manejo especial, entre otros.
Servicios municipales (excluyendo plantas de tratamiento de agua)	Limpieza de calles, parques, playas otras zonas de recreo, paisajismo. Limpieza de cuencas.	Residuos de manejo especial residuos de limpieza de calles, recortes de árboles y plantas, residuos de cuencas, residuos generales de parques, playas y zonas de recreo.
Plantas de tratamiento de agua; incineradoras municipales	Procesos de tratamiento de aguas residuales.	Residuos de plantas de tratamiento compuestos principalmente de lodos.
Industrial	Construcción, fabricación ligera y pesada, refinерías, plantas químicas centrales térmicas, demolición.	Residuos de procesos industriales. Materiales chatarra. Residuos no industriales, incluyendo residuos de comida, cenizas, escombros de demolición y construcción.
Agrícola	Cosechas de campo, árboles frutales, viñedos, ganadería intensiva, granjas.	Residuos de comida, residuos peligrosos, residuos agrícolas.

Fuente: Tomado de Tchobanoglous, Theisen, y Vigil (1994)



1.6. Residuos Sólidos Urbanos

Con base en la clasificación anterior, se integra la definición de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), así denominados en México, que son resultado de la eliminación de los materiales no peligrosos generados en viviendas, edificios de departamentos, establecimientos comerciales, de la vía pública o los generados de la limpieza de áreas públicas y que tienen características similares a los domiciliarios (SEMARNAT, 2014).

Composición de los Residuos Sólidos Urbanos

La distribución típica de los RSU en la porción doméstica y comercial integra principalmente, residuos orgánicos como desechos de comida, poda, papel, vidrio, materiales textiles (tela, ropa, algodón, etc.), y materiales metálicos (aluminio, acero, peltre, etc.) constituye cerca de un 50% a 75% del total de residuos generados en una comunidad (Tchobanoglous et al. 1994). La distribución actual depende de:

- 1) Los patrones de consumo de la población. Por lo general, en países con menores ingresos se producen menos residuos predominan los de composición orgánica; mientras que en los países con mayores ingresos los residuos son mayormente inorgánicos debido al mayor consumo de productos manufacturados.
- 2) La extensión de las actividades de construcción y demolición, varía ampliamente según la parte del país y la salud general de la economía local, estatal y nacional.
- 3) La extensión de los servicios municipales suministrados, depende del lugar y de las tecnologías aplicadas.



-
- 4) Los tipos de procesos de tratamiento de agua y aguas sucias que son utilizados, el porcentaje de plantas de tratamiento también variará ampliamente según la extensión y el tipo de tratamiento suministrado para el agua y las aguas residuales (Banco Interamericano de Desarrollo, 1997).

La composición del porcentaje mencionado (doméstico y comercial) tiene importancia para los propósitos de su manejo eficiente, la Gaceta Oficial del Estado de México (2011) presenta la siguiente clasificación:

- Reciclables limpios y secos: Todos aquellos materiales de residuo reciclables que se pueden guardar limpios y secos. Por ejemplo: vidrio, aluminio y plástico, entre otros.
- Orgánicos húmedos y composteables: Residuos biodegradables derivados de la preparación y consumo de alimentos y del mantenimiento de jardines y áreas verdes que pueden ser composteables. Por ejemplo: restos de alimentos y residuos de jardinería.
- Sanitarios y otros: Residuos no reciclables ni composteables. Por ejemplo: pañales, cerámica y pilas alcalinas, entre otros.



1.7. Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU)

La FORSU es una porción de los RSU y ésta comprende a aquellos residuos orgánicos húmedos y composteables que su degradación se da de manera rápida; es decir, todos los residuos sólidos biodegradables. La clasificación de la FORSU es respecto al origen de los residuos.

La clasificación de biodegradabilidad se presenta en la tabla 2 en la cual definen a los residuos sólidos orgánicos en función del tiempo que tardan en degradarse ya sea de forma rápida o lenta; sin embargo, para el proceso de digestión anaerobia (DA) es necesario considerar solo a los residuos orgánicos rápidamente biodegradables

Tabla 2. Capacidad de biodegradación de los residuos sólidos orgánicos

Componente de residuo orgánico	Rápidamente biodegradable	Lentamente biodegradable
Residuos de comida	X	
Periódicos	X	
Papel de oficina	X	
Cartón	X	
Textiles		X
Goma		X
Cuero		X
Residuos de jardín	X	
Madera		X
Orgánicos misceláneos		X

Fuente: Tomado de Tchobanoglous et al. (1994)

Como se mencionó anteriormente, la FORSU está compuesta de material biodegradable que es útil en el proceso de digestión anaerobia en la medida que su tiempo de degradación sea menor, dentro de estos compuestos tenemos los que se señalan a continuación:



Compuestos orgánico húmedos y composteables.

- Cáscaras de fruta y vegetales
- Carne y pescado (huesos, grasa y piel)
- Pasta, pan y cereal
- Productos lácteos y cascarones de huevo
- Dulces, galletas y pasteles
- Bolsas de té, filtros de café y tierra
- Plantas y flores de hogar
- Restos de animales
- Otros que puedan ser composteables

Existen residuos orgánicos que integran a los RSU, pero estos se degradan muy lentamente y en algunos casos no se degradan, ejemplo de estos productos son los textiles, el cartón y plásticos, por lo cual no se consideran para ser aprovechados ni se les da un valor en la DA (Duran, Casas y Rojas, 2014).



1.8. Composición química

La composición química de la FORSU incluye carbohidratos, proteínas y lípidos, a continuación, se muestran las características fundamentales de sus componentes.

Carbohidratos

Los carbohidratos o hidratos de carbono tienen una composición química condensada $C_nH_{2n}O_n$; es decir, cada átomo de carbono tiene una molécula de agua que lo hidrata; son moléculas polihidroxi aldehídos y polihidroxi cetonas que pertenecen al grupo de los aldehídos o de las cetonas, además de varios grupos de hidroxilos; por ejemplo, está el gliceraldehído y la dihidroxiacetona, así como los azúcares que los pueden contener como las frutas, las papas y el betabel azucarero (Durán et al., 2014).

Proteínas, son polímeros que contienen gran cantidad de aminoácidos y que constituyen cerca del 50% del peso seco de gran parte de los organismos; por su parte los aminoácidos están integrados por un grupo amino y un grupo carboxilo ácido, entre sus particularidades está que puede formar largas cadenas con enlaces amino o amida con grupos NH_2 de un aminoácido y el grupo CO_2H .

Las moléculas de las proteínas son grandes y su peso molecular oscila entre 12,000 unidades hasta llegar a varios millones de éstas; el porcentaje de nitrógeno que contienen está entre el 16% y el 18%, además contienen azufre (Durán et al., 2014).

Lípidos, según Koolman y Rohm (2004) mencionan que los lípidos están compuestos por sustancias de origen biológico solubles en metanol, acetona y benceno, y que se clasifican en hidrolizables que son aquellos que se rompe su enlace ante la adición de agua por ejemplo las grasas o triacilgliceroles, cera y los ésteres de esterol y los no hidrolizables entre los que se encuentran los alcoholes de cadena larga, esteroides cíclicos, como el colesterol, y esteroides, como la testosterona.



1.9. Tratamiento de la FORSU

El tratamiento de la FORSU está considerado en el manejo integral de los RSU donde se les da tratamiento biológico a los residuos orgánicos con el objeto de transformar la materia orgánica en un producto final estable a través de la conversión biológica.

La SEMARNAT (2014) identifica que la composición de la FORSU depende su origen, ejemplo de lo anterior es evidente en la comparativa de países industrializados donde la fracción orgánica representa 20% de los RSU, mientras que países en vías de desarrollo es superior al 50%.

Enseguida, se presenta algunas de las ventajas más relevantes para el tratamiento biológico.

- Recuperación de materia orgánica (MO) y nutrientes para añadirlos en los suelos
- Reducción de los problemas generados por la MO en los rellenos sanitarios
- Reducción del número de instalaciones finales para el tratamiento de residuos (depósitos controlados, incineradoras, entre otros)
- Obtención de energía en caso de aplicar digestión anaerobia
- Adaptación a los requerimientos de las normativas comunitarias y acuerdos internacionales de protección al medio ambiente
- Reducción del volumen de los residuos
- Estabilización de los residuos
- Eliminación de agentes patógenos en el material de desecho

En la tabla 3 se muestran los procesos biológicos para el tratamiento de la FORSU de manera sintetizada.



Tabla 3. Procesos biológicos para el tratamiento de la FORSU

Proceso de transformación	Medio o método de transformación	Descripción del proceso	Productos principales
Compostaje	Conversión biológica en presencia de oxígeno	La fracción orgánica de los RSU sufre descomposición biológica, el tiempo necesario para que se lleve a cabo dependerá de la naturaleza del residuo, del contenido de humedad, de nutrientes disponibles y de otros factores ambientales como la temperatura.	Composta (material húmico utilizado como acondicionador de suelo).
Digestión anaerobia	Conversión biológica en ausencia de oxígeno	La porción biodegradable de la FORSU se puede convertir biológicamente. Bajo condiciones anaerobias, en un gas que contiene dióxido de carbono y metano.	CH ₄ , CO ₂ , NH ₃ , H ₂ S y materia orgánica resistente (digestato).

Fuente: Tomada de Durán et al. (2014)

Posterior al tratamiento biológico, los productos generados pueden utilizarse como fertilizantes y estabilizadores del suelo considerando sus características específicas, o para la producción de energía por medio del biogás obtenido.

Lo anterior se logra a partir de la selección de los residuos orgánicos, como la separación de la fracción húmeda de los residuos sólidos para incrementar su valor comparado con otros residuos, así como la reducción de gases y lixiviados generados en los rellenos sanitarios (SEMARNAT, 2011).



Ahora bien, como resultado del tratamiento anaerobio se puede obtener metano (CH_4) que se utiliza como combustible en la producción de calor y electricidad; para ello en este proceso de fermentación es de gran importancia mantener los parámetros de temperatura, contenido de humedad y el pH en los niveles óptimos (Durán et al., 2014).

Como consecuencia de las características actuales de la sociedad y de la economía ha ido en incremento el interés por la investigación de tecnologías eficientes y rentables que permitan el tratamiento de residuos, con la finalidad de mitigar la generación de gases de efecto invernadero; y es aquí donde cobra un gran peso la gestión de residuos orgánicos.



1.10. Gestión integral de los residuos

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2013) en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos en su artículo 5 fracción X define la gestión integral de los residuos como el “conjunto articulado e interrelacionado de acciones normativas, operativas, sociales, educativas, de monitoreo, supervisión y evaluación para el manejo de residuos, abarcando desde la generación hasta la disposición final, con el objeto de lograr beneficios ambientales, optimización económica de su manejo y su aceptación social, respondiendo a las necesidades y circunstancias de cada localidad o región”.

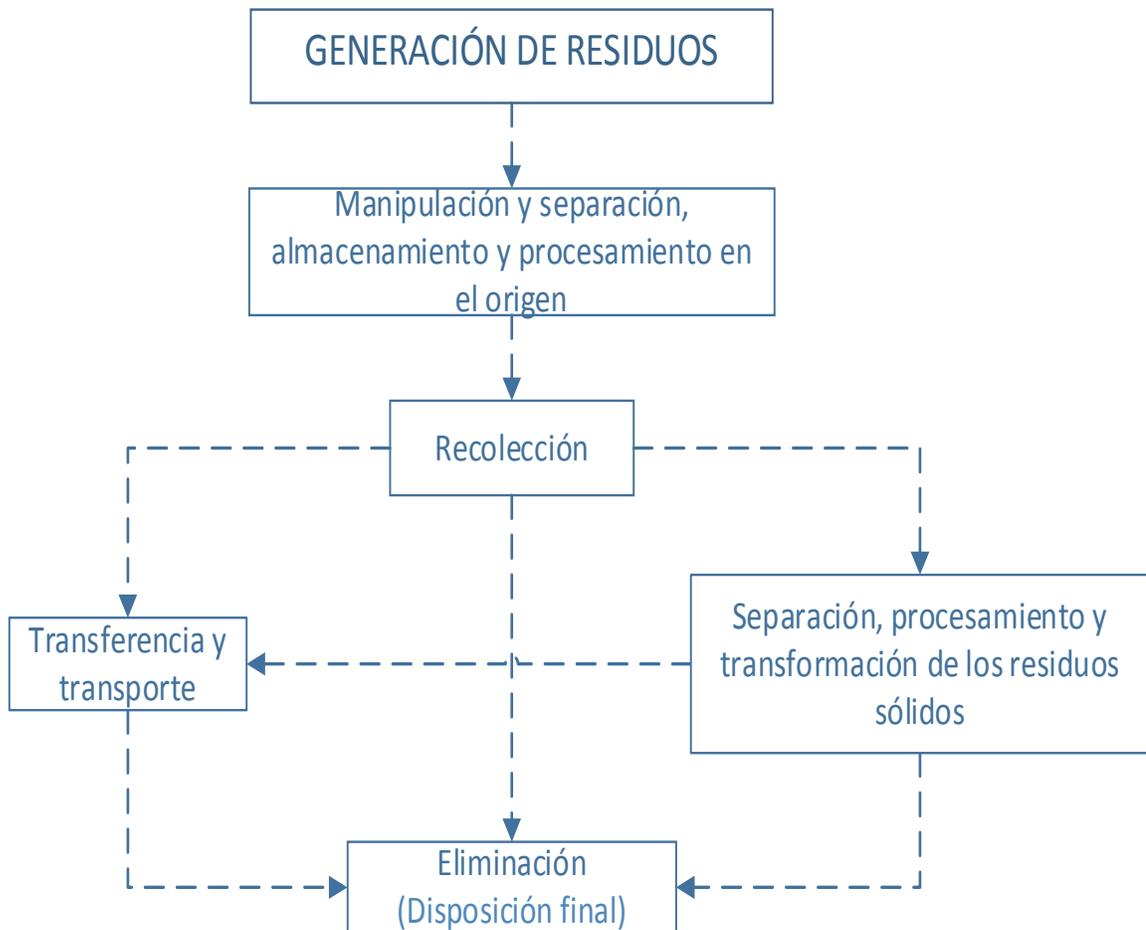
La gestión de los residuos sólidos conlleva la administración de las acciones a implementar, con un alcance que va desde la reproducción de los residuos hasta su disposición última, con el objetivo de reducir costos y minimizar los impactos adversos.

La gestión integral de los residuos sólidos busca mitigar dichos efectos adversos sobre el medio ambiente derivados de una inadecuada disposición; para lograrlo es necesario tomar en cuenta como es la presencia de estos residuos en la sociedad y la reducción de materia prima, Campos señala que es importante tomar en cuenta el producto de la optimización de los procesos industriales, la disminución de la cantidad de residuos y la reutilización de materiales, así como su recuperación (Tchobanoglous et al., 1994).



Tchobanoglous (1994) propone actividades relacionadas con la gestión de los residuos y las agrupa en seis fundamentos que forman un sistema de gestión de residuos. Los cuales se presentan en la ilustración 6.

Ilustración 6 Fundamentos de la generación de residuos



Fuente: Tchobanoglous et al. (1994)



Generación de RSU

Los RSU se da en hogares, oficinas y espacios públicos, y son materiales clasificados como inservibles o sin ningún valor adicional; por lo cual son desechados para su posterior disposición (Tchobanoglous et al. 1994). Según la SEMARNAT (2011), en México se generaron más de 41 millones de toneladas de RSU, siendo así que cada habitante genera 1 kg de RSU por día.

Manejo, separación y almacenamiento de RSU en el lugar origen

Según Tchobanoglous (1994), son las actividades relacionadas desde la generación de residuos hasta la recolección; el caso del manejo de RSU hace referencia al traslado de los residuos desde los contenedores hasta el punto de recolección; por su parte la separación desde el lugar de generación está integrada por aquellas actividades que ayudan a la identificación, clasificación manual, transferencia y disposición final.

Actualmente, la Ciudad de México es la única entidad en México que ha establecido obligaciones para los generadores de residuos sólidos, señalando la separación forzosa de los desechos en orgánicos e inorgánicos (SEMARNAT, 2013).

Recolección de RSU

La recolección es el acopio de desechos para su transporte a las estaciones de transferencia; o bien, para los sitios de disposición final. En México la SEMARNAT reportó en 2011 que se recolectaron cerca de 104,000 toneladas de RSU diariamente en todo el país y que esos RSU fueron recolectados por un total de 14,000 vehículos.



Transferencia y transporte

Es el movimiento de RSU cuyo propósito es transportarlos a las plantas de procesamiento y recuperación de materiales reciclables, o a los espacios de disposición final, en el caso de los residuos sólidos no reciclables (Tchobanoglous, 1994).

Cabe destacar que, en México, de acuerdo con el Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales (2010), se contaba con 108 estaciones de transferencia y 241 centros de acopio registrados en todo el país.

Procesamiento y transformación de los residuos sólidos

Lo que se establece sobre el procesamiento y la transformación tiene como objetivo reducir el volumen y el peso de los residuos para su disposición final, así como recuperar los productos reciclables que son enviados a plantas especializadas para cada tipo de material, mediante procesos químicos como la combustión o biológicos como el compostaje o la DA (Tchobanoglous et al., 1994).

Disposición final

Los rellenos sanitarios son el destino final para los residuos sólidos que no pueden ser reciclados, actualmente los rellenos sanitarios modernos desarrollan medios controlados de disposición de los RSU (Tchobanoglous et al. 1994); para el 2010 la SEMARNAT reportó que en México se tenían 1645 tiraderos a cielo abierto registrados y solo 238 rellenos sanitarios en funcionamiento (SEMARNAT, 2011).



1.11. Panorama general de RSU en la CDMX

El crecimiento demográfico e industrial que se presenta en México ha generado serios problemas en materia de gestión de los RSU, esto es el resultado de la desmedida adquisición de productos empacados, así como la emigración de personas de zonas rurales a urbanas; lo anterior impacta directamente en la composición de los RSU haciendo que las acciones implementadas para su manejo hayan tenido que adaptarse en los últimos decenios.

La Secretaria de Desarrollo Social (Sedesol) hizo una comparativa en la década de los cincuenta al año 2000, en donde se observó que la generación de residuos sólidos se incrementó de 300 gramos/habitante/día a 865 gramos/habitante/día, adicionalmente si identifocó que la población aumentó de 30 a más de 98 millones; asimismo de las 84,200 toneladas de residuos generados diariamente, se colectaba solamente 77% (64,800 toneladas); 53% se disponía de manera adecuada (45,000 toneladas) y 47% (aproximadamente 40,000 toneladas) se disponía a cielo abierto, depositados diariamente en basureros no controlados o clandestinos (SEMARNAT, 2011).

Para el año 2004, la generación de reiduos se incrementó a más de 900 gramos/habitante/día, alcanzando un total nacional estimado de 34.6 millones de toneladas anuales de RSU y en 2010, la generación nacional se incrementó a 39.1 millones de toneladas (SEDESOL, 2005).



Estos residuos tenían las siguientes características (Puma, Armijo, Nelly, Juana, y Ojeda, 2011):

- Los residuos orgánicos representaban más de 50% de los residuos totales y los reciclables 28%.
- Del total de RSU generado, se recolectaban 34 millones de toneladas anuales que representaban el 87%; de estos, 64% se enviaban a rellenos sanitarios.
- En operación hay 96 rellenos sanitarios tipo A y B; 84 tipo C y D, y 79 fueron clausurados.
- La NOM-O83-SEMARNAT-2003, define la categoría de los sitios de disposición final, de acuerdo al tonelaje recibido:
 - Tipo A: volúmenes mayores a 100 toneladas por día
 - Tipo B: volúmenes de 50 a 100 toneladas por día
 - Tipo C: volúmenes de 10 a 50 toneladas por día
 - Tipo D: volúmenes menores a 10 toneladas por día

Con base en informes históricos de la Sedesol, es posible observar el cambio significativo en la generación y composición de los RSU durante las últimas décadas. En este sentido, el Consejo Nacional de Población (Conapo), en 2003 y la Sedesol, en 2004 realizaron proyecciones de población y generación de RSU para el periodo de 2005 a 2020, mismas que se muestran en la tabla 4.



Tabla 4. Proyección de la generación per cápita y total de RSU de 2005 a 2020

Año	Número de habitantes (miles)	Generación per cápita kg/hab/d	Toneladas diarias	Toneladas anuales (miles)
2005	106,452	0.91	96,900	35,370
2010	111,614	0.96	107,100	39,100
2015	116,345	1.01	117,500	42,890
2020	120,639	1.06	128,000	46,700

Fuente: Tomado de Gutiérrez Avedoy (2006)

La generación per cápita diaria de RSU (kg/hab/d) en CDMX, 2000 a 2011 (Durán et al., 2014).

En la tabla 5 e ilustración 7 se encuentra el promedio que se obtuvo dividiendo el volumen de RSU originados de la zona entre el total de la población, a continuación, se presentan los datos.

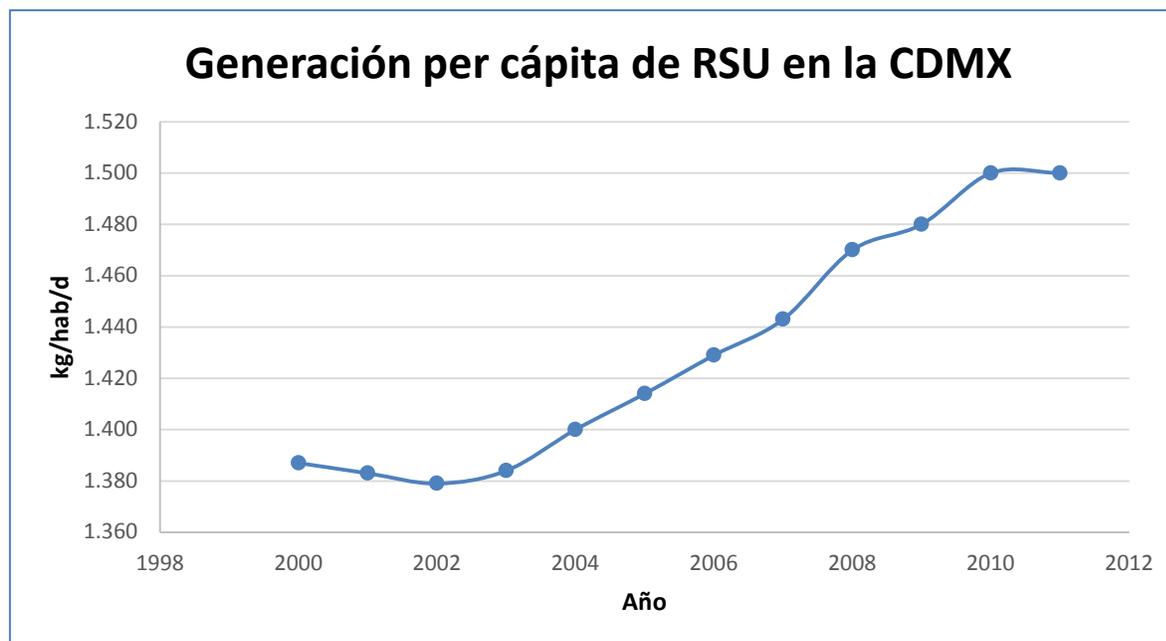
Tabla 5. Generación per cápita de Residuos Sólidos Urbanos en la Ciudad de México

CDMX kg/hab/d	Año
1.387	2000
1.383	2001
1.379	2002
1.384	2003
1.400	2004
1.414	2005
1.429	2006
1.443	2007
1.470	2008
1.480	2009
1.500	2010
1.500	2011

Fuente: Datos a partir de Semarnat y SNIARN (2012)



Ilustración 7 Generación per cápita de Residuos Sólidos Urbanos en la Ciudad de México



Fuente: Elaboración propia a partir de Semarnat y SNIARN (2012)

Adicionalmente, en la ilustración 8 se puede observar el incremento que ha presentado la generación de RSU; y se puede apreciar que otros factores tienen influencia en dicha generación como el número de habitantes, hábitos y costumbres de la población, nivel socioeconómico, así como el grado de educación ambiental.

En este sentido, en la tabla 6 se puede observar el incremento en millones de toneladas; es importante destacar que las cifras para la CDMX son reportadas individualmente, con base en sus características particulares de densidad demográfica y elevada generación de RSU (Durán et al., 2014).



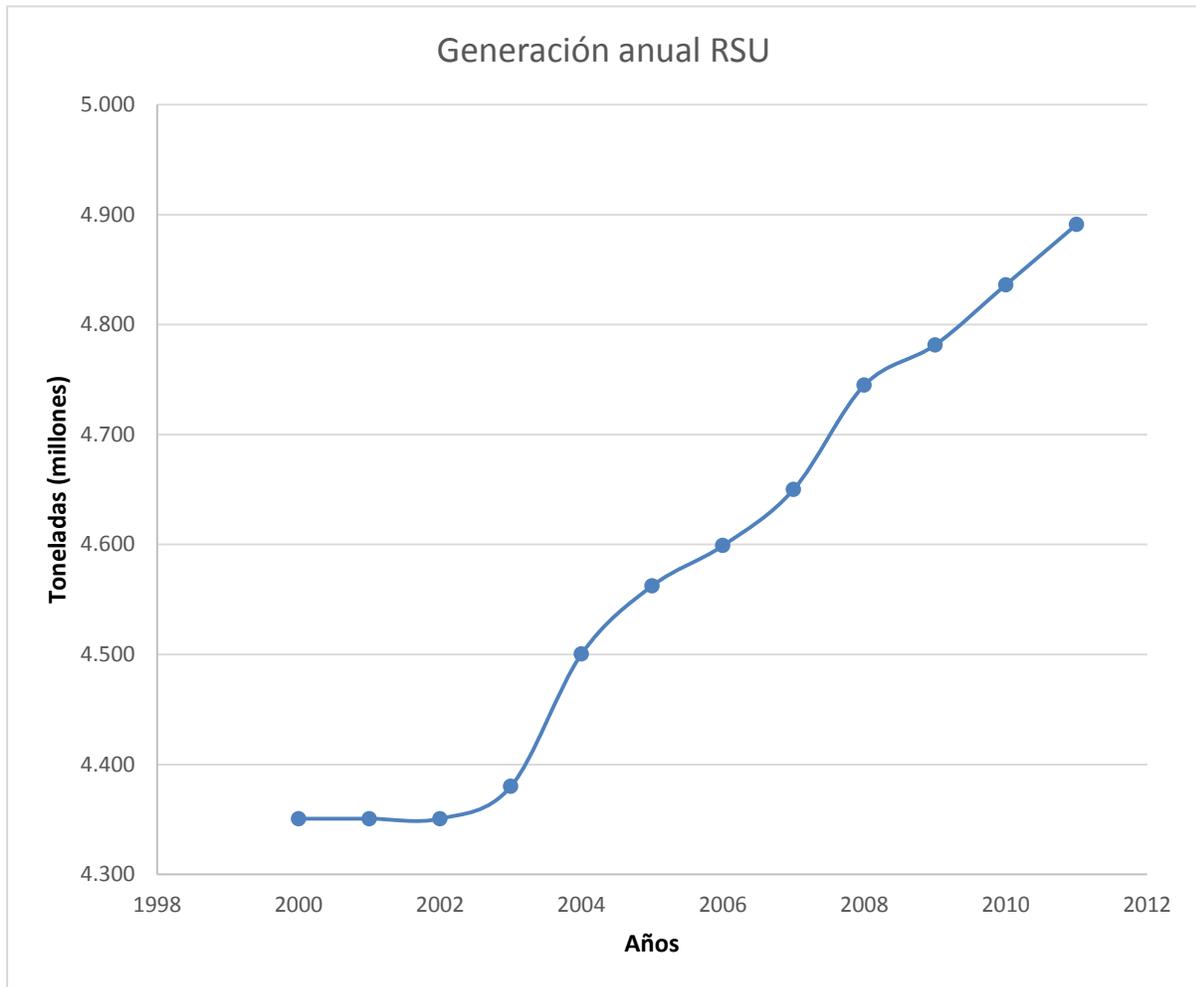
Tabla 6. Generación anual de RSU

Millones de t	Año
4.351	2000
4.351	2001
4.351	2002
4.380	2003
4.500	2004
4.563	2005
4.599	2006
4.650	2007
4.745	2008
4.782	2009
4.836	2010
4.891	2011

Fuente: Datos a partir de Durán et al. (2014)



Ilustración 8 Generación anual de RSU



Fuente: Elaboración propia a partir de Durán et al. (2014)



1.12. Impactos generales de los residuos

La concentración de la población en centros urbanos y el crecimiento exponencial son los principales actores que influyen en el problema de la generación de residuos. La creación de tiraderos “a cielo abierto” (generalmente clandestinos), son el resultado de la falta de cultura por parte de la población, incrementado los sitios inapropiados para la disposición final de los residuos e intensificando los impactos negativos en el ambiente como en la sociedad (Durán et al 2014).

Ejemplo de estos impactos son el deterioro del paisaje, la contaminación del aire, los cuerpos de agua y del suelo, así como la insalubridad en viviendas, calles y colonias que ponen en mayor riesgo la salud de la población principalmente, tal como se describe en la tabla 7.



Tabla 7. Impactos generales de los tiraderos a cielo abierto.

Impactos	Causas
Deterioro del paisaje	Acumulación de residuos sólidos a cielo abierto. Ubicados cerca de carreteras, caminos vecinales, asentamientos humanos y arroyos. Incendios, dispersión de materiales ligeros y polvos.
Contaminación del aire	Olores desagradables propios de la descomposición de los residuos orgánicos. Incendios y suspensión de partículas. Generación de gases tóxicos y humos.
Contaminación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos.	Ubicación en sitios de disposición final donde los suelos son permeables. Carencia de un sistema de impermeabilización y control de lixiviados. Carencia de obras de desvío de aguas pluviales. Falta de control de materiales ligeros.
Contaminación del suelo	
Impacto en la salud humana	Proliferación de fauna nociva. Contacto directo con los residuos sólidos. Migración y movilidad de contaminantes generados en los sitios de disposición final, a través de suelo, aire y agua.
Impacto social	Desigualdad social. Abandono o falta de control de los sitios de disposición final. Existencia de materiales aprovechables para reciclaje y reutilización
Se acentúa la desigualdad social.	
Generación de empleos	
Reciclaje y reutilización de materiales	

Fuente: Tomada de Durán et al. (2014)

Establecer e identificar los impactos negativos facilita el establecimiento de oportunidades de mejora y aprovechamiento; por ejemplo, la posibilidad de reusar y reciclar materiales de los residuos sólidos que aún son aprovechables y generar empleos. La principal forma de minimizar los impactos negativos es llevar a cabo una gestión integral adecuada de los residuos.



En este sentido, se deben diseñar estrategias que permitan alcanzar el desarrollo sustentable, las cuales planteen la reducción de los residuos que la sociedad produce, así como la gestión de aquellos que se generen.

El ser humano genera como parte de sus actividades diarias, con la producción de bienes y servicios, grandes volúmenes de residuos, sin embargo, no ha logrado implementar estrategias de regulación para su control y manejo ambientalmente idóneo, así como políticas para reducir su generación y estimular su reúso, reciclado y recuperación de materiales con valor económico.

Según el Instituto Nacional de Ecología, tales políticas deben de estar dirigidas a modificar los hábitos de consumo de la población para evitar el desperdicio y fomentar el reúso de productos y envases, y la elección de productos respetuosos del ambiente.

Por otra parte, es importante que se implementen nuevas tecnologías y nuevos métodos al hablar de la disposición final de los RSU, en este caso se promueve el aprovechamiento del metano producido por la descomposición de materia orgánica como una fuente alternativa de combustible.

A pesar de tener identificada la línea a seguir, la capacidad para el manejo adecuado de los residuos es insuficiente.



2. BIOGÁS

2.1. Contaminación del aire

El biogás es un recurso energético renovable potencial, producto de la descomposición de materia orgánica (MO) entre las principales fuentes se encuentran:

- Residuos ganaderos
- Residuos de lodos de depuradoras de aguas residuales (EDAR)
- Residuos de efluentes industriales
- Fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (RSU)

Se lleva a cabo por el proceso de digestión anaerobia (DA) mediante la acción de microorganismos que degradan la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Los microorganismos anaerobios transforman MO en biomasa celular, compuestos inorgánicos y una mezcla de compuestos gaseosos con alta valorización energética (Consultora BESEL, S.A., 2008), (Castells, Flotats, y Campos, 2012).

2.2. Digestión Anaerobia

La DA se basa en la existencia de tres fases diferenciadas en el proceso de degradación de la materia orgánica, interviniendo diversas poblaciones de bacterias (Castells et al. 2012).

Estos microorganismos actúan catalizando cuatro procesos consecutivos que se pueden observar en la ilustración 9, enseguida se profundiza en los procesos mencionados:

- Hidrólisis: la despolimerización de compuestos orgánicos complejos tales como lípidos, proteínas, carbohidratos a partir de enzimas hidrolíticas que esta integradas por bacterias hidrolítico – acidogénicas



- Fermentación o acidogénesis: se metabolizan los productos de hidrólisis en el interior de la célula y se obtienen ácidos orgánicos y alcoholes
- Acetogénesis: generación de acetatos, hidrógeno y dióxido de carbono, formados por las bacterias acetogéncias
- Metanogénesis: produce metano CH_4 y dióxido de carbono CO_2 al descomponer ácido acético y absorción de hidrógeno, ésta representa la última etapa del proceso y está integrado por bacterias metanogénicas acetoclásticas

Acorde con Wellinger (2005) el método para tratar la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU) es a través de la DA, ya que presenta ventajas entre las que se encuentran la mitigación del impacto negativo que tiene en el medio ambiente, así como el impulso al aprovechamiento de la energía renovable y la recuperación de nutrientes para fertilizantes, tal como se señala en la tabla 8.

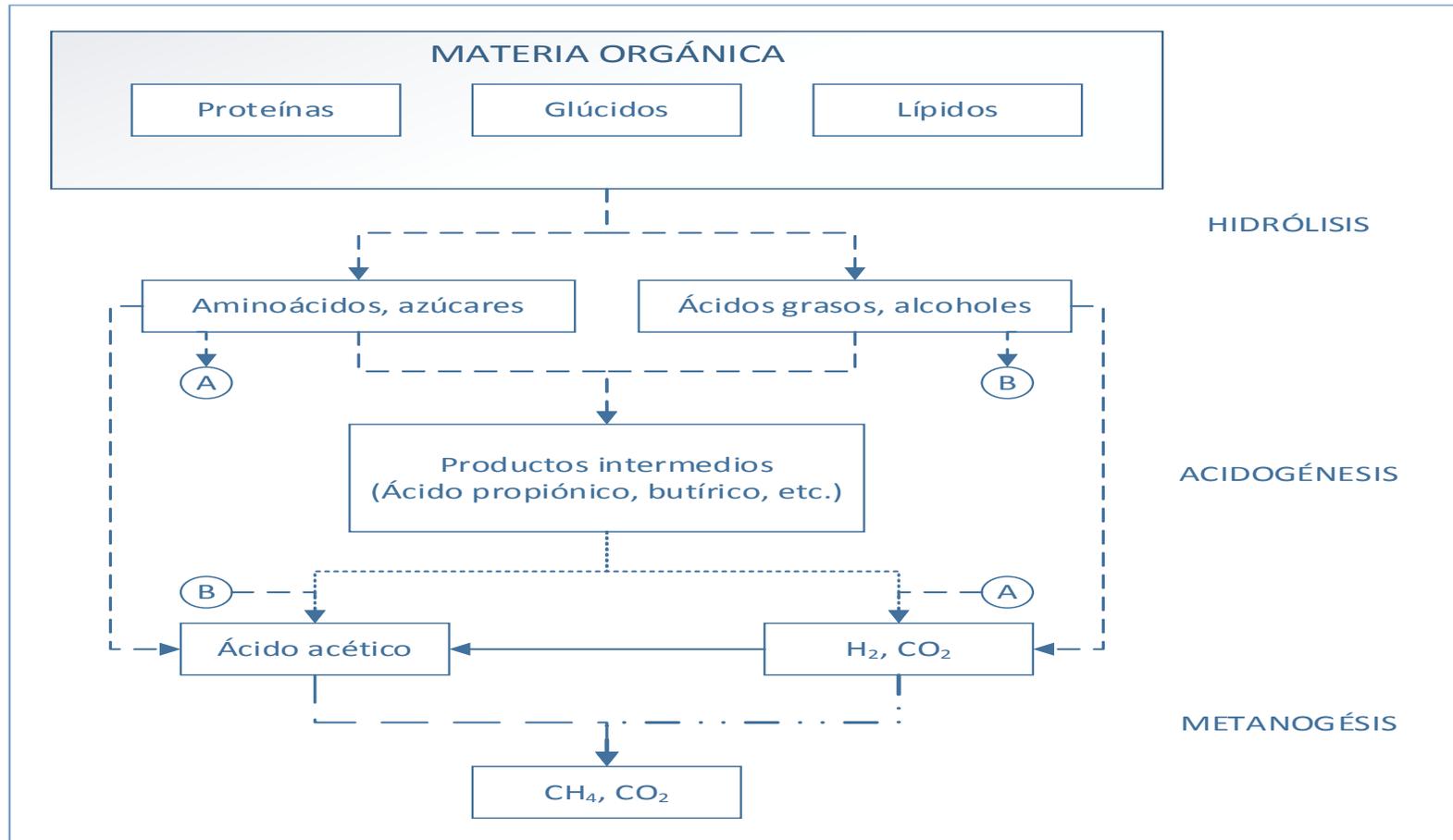
Tabla 8. Beneficios de la digestión anaerobia de residuos orgánicos

Tipo de Beneficios	Descripción
Tratamiento de residuos	Proceso biológico de los residuos. Requiere menor espacio que el tratamiento aerobio. Reducción en volumen y peso.
Energético	Producción neta de energía. Generación de combustible renovable de alta calidad. El biogás ha sido probado en numerosas aplicaciones de uso lineal.
Ambiental	Disminuye significativamente las emisiones de gas efecto invernadero. Se obtiene abono y fertilizantes nutrientes. Maximiza los beneficios del reciclaje.
Económico	Resulta más rentable que otras opciones de tratamiento teniendo en cuenta la totalidad del ciclo de vida.

Fuente: Elaboración propia basada en Wellinger (2005) y Durán et al. (2014)



Ilustración 9 Fase de la digestión anaerobia



“Producto de las fases de degradación anteriormente mencionadas, se obtiene el biocombustible constituido principalmente de metano y dióxido de carbono en una relación de 60%-40%”. Fuente: Tomada de Costa (2013)



Las bacterias se clasifican de acuerdo con su actividad metabólica (degradación de residuos) y los factores que influyen en dicho proceso, como la temperatura. Lo anterior impacta significativamente en la operación de los digestores dando como resultado una buena o mala calidad del biogás.

Las bacterias y arqueas se clasifican, respecto a su respuesta al oxígeno molecular, en tres grupos: aerobias estrictas, anaerobias facultativas y anaerobias (dentro de las cuales se encuentran las arqueas formadoras de metano) (Gerardi, 2003). Las bacterias anaerobias facultativas se encuentran activas en la presencia o ausencia de oxígeno molecular. Así, cuando el oxígeno se encuentra presente se usa para la actividad enzimática y para la degradación de los residuos. De lo contrario, los alcoholes, ácidos grasos y compuestos aromáticos pueden ser degradados por microorganismos con respiración anaerobia, los cuales usan, entre otros, los siguientes nutrientes: nitratos, azufre, sulfatos, carbono y hierro (III) como lo señala Deublein S. (2008).

Los microorganismos involucrados en la primera etapa de la DA realizan la degradación de los compuestos por medio del uso de enzimas, las cuales son moléculas proteínicas que catalizan las reacciones químicas (Gómez, Clare, y McQueen-Manson, 2008).

En este sentido Cruz y Herмосilla (citado en Durán et al., 2014) establecen dos tipos de enzimas que se encuentran involucradas en la degradación de los compuestos: endoenzimas y exo-enzimas. Las primeras son aquellas enzimas que actúan en el interior de la célula; mientras que las enzimas extracelulares son aquellas sintetizadas igualmente dentro de la célula, pero exportadas al medio extracelular.



Todas las bacterias de la gran variedad que existen son capaces de producir enzimas de manera intracelular; sin embargo, no todas son aptas para generar enzimas extracelulares. Una vez que el sustrato entra en contacto con las enzimas extracelulares, dentro del biodigestor el sustrato es solubilizado para que pueda ingresar al interior de las células y sea degradado por las enzimas intracelulares, generando los productos de la DA (Gerardi, 2003).

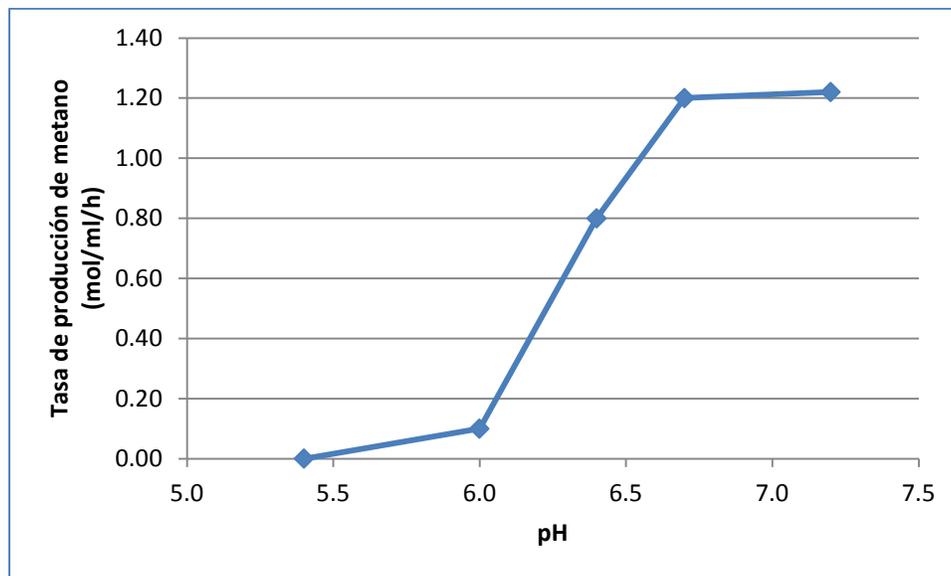
El proceso ocurre en escenarios con condiciones específicas, la temperatura que se presenta es baja y un pH de 7.0 que es muy cercano al neutro, es importante mencionar que la temperatura óptima con la que trabajan las enzimas depende de la enzima de que se trate y por lo general la temperatura óptima es aquella en la que logran su crecimiento.

2.3. Parámetros de la digestión anaerobia

- pH. Como se mencionó anteriormente los microorganismos tienen un intervalo de pH adecuado para su desarrollo, las bacterias que se encargan de la degradación del sustrato son extremadamente sensibles a cambios en el pH, los cuales son perjudiciales para su desarrollo y, por consiguiente, en la producción del biogás (Durán et al., 2014).

En la ilustración 10 se muestra que la producción de metano cae de manera significativa en los valores de pH por debajo de 6.5 (Van Kessel y Russell, 1996).

Ilustración 10. Producción de metano dependiendo del pH



Fuente: Elaboración propia basada en Van Kessel y Russell (1996)

Se ha identificado que los biodigestores trabajan con un intervalo óptimo de pH, para obtener el máximo rendimiento de biogás en el proceso de DA, el pH debe oscilar entre 6.5 y 7.5, a nivel de la planta el intervalo óptimo varía con el tipo de sustrato y la temperatura de la digestión. El valor de pH en el biodigestor no sólo determina la producción de biogás, sino también su composición. Una de las consecuencias de que se produzca un descenso del

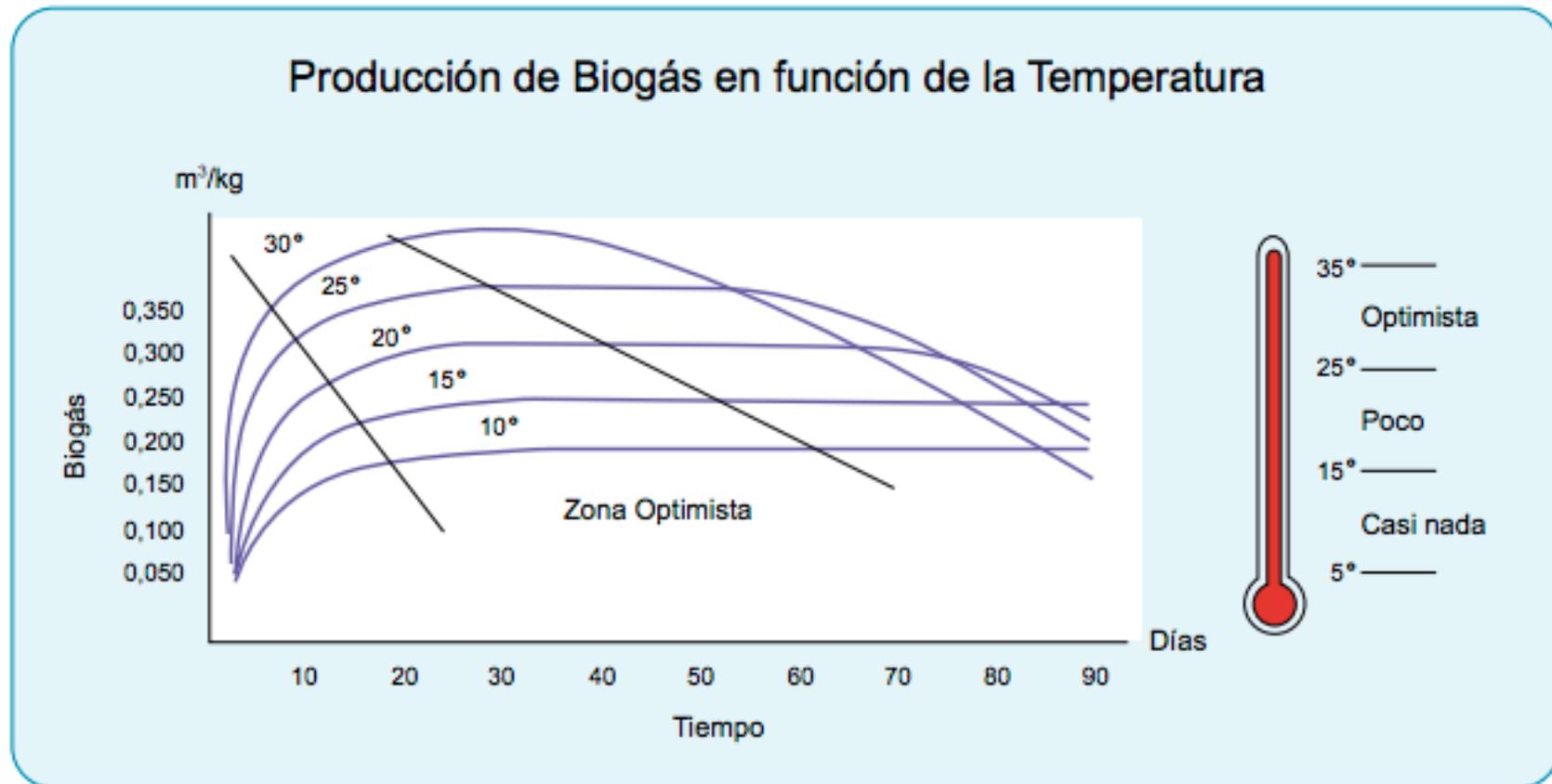


pH es que el biogás generado es muy pobre en metano (MINENERGIA, PNUD, FAO, GEF, 2011).

- **Tamaño de partícula.** Es muy importante que el tamaño de las partículas con las que se va a trabajar en el biodigestor sea el adecuado, esto con el fin de evitar la obstrucción y facilitar la digestión que realizan los microorganismos. Por otro lado, los sustratos contienen partículas con una superficie de contacto pequeña donde los organismos pueden atacar y degradarlas, por lo que una disminución en el tamaño de partícula puede proveer a los microorganismos una mayor superficie de contacto con el sustrato, incrementando así su actividad y la producción de biogás (MINENERGIA, PNUD, FAO y GEF, 2011).
- **Temperatura.** La digestión anaerobia se puede dar a diversas temperaturas, por ello es conveniente definir el intervalo de temperatura para cada tipo de operación, en seguida se presentan dichos intervalos: psicrófila (por debajo de 25 °C), mesófila (entre 25 y 45 °C) y termófila (entre 45 y 65 °C). Es importante señalar que, con el aumento de la temperatura, la rapidez con la que crecen los microorganismos también se incrementa, además se acelera el proceso de digestión, lo que genera que se presente una mayor producción de biogás. Por otra parte, un aumento excesivo en la temperatura puede causar que las enzimas pierdan su estructura y función, disminuyendo así la producción de biogás. En la ilustración 11 se observa la producción de metano en función de la temperatura (Durán et al., 2014; MINENERGIA et al., 2011).



Ilustración 11. Producción de metano dependiendo de la temperatura



Fuente: Tomada de MINENERGIA et al. (2011)

2.4. Composición química y características del biogás

Este biocombustible está constituido principalmente de metano CH_4 y dióxido de carbono CO_2 , aunque existe la presencia de otros componentes en menor proporción los cuales están en función del sustrato que lo origina, ver tabla 9.

Tabla 9. Composición del biogás

Composición	Concentración (v/v)	Propiedades
CH_4	50-70%	Portador de energía
CO_2	25-50%	Disminuir el valor calorífico Corrosivo especialmente en presencia de humedad
H_2S	0-500 ppm	Corrosivo La emisión de dióxido de azufre durante la combustión
NH_3	0-500 ppm	NOX – Emisión durante la combustión
N_2	0-5%	Disminuye el valor del calentamiento
Vapor de agua	1-5%	Facilita la corrosión en presencia de CO_2 y SO_2

Fuente: Tomada de Durán et al. (2004)

Como se mencionó anteriormente la concentración y características del biogás están en función del sustrato, la temperatura y la presión a la que se somete la materia en degradación, esto permite determinar la energía química y el contenido energético que puede entregar en cada caso, tabla 10.



Tabla 10. Características generales del biogás

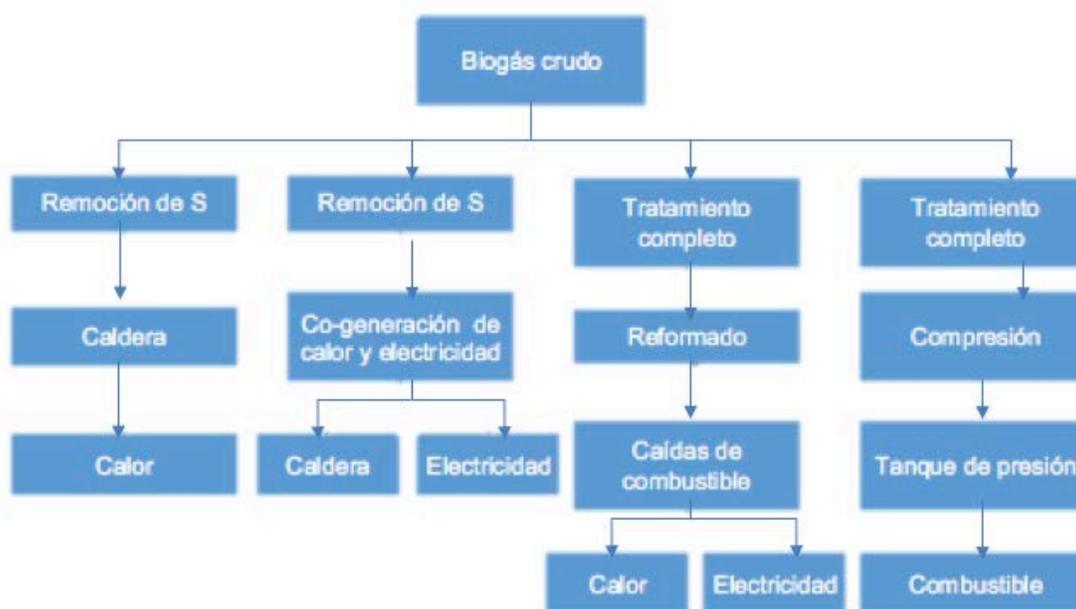
Características	Valores
Contenido energético	6.0-6.5 kWh/ m ³
Combustible equivalente	0.60-0.65 L oil/ m ³ biogás
Límite de explosión	6-12% biogás en el aire
Temperatura de ignición	650-750 °C
Presión crítica	75-89 bar
Temperatura crítica	-82.5 °C
Densidad	1.2 kg/ m ³
Olor	Huevo podrido (el olor de biogás desulfurado es difícil de notar)
Masa Molar	16.043 kg/kmol

Fuente: Tomada de Deublein S. (2008)

2.5. Usos del biogás

Como se ha observado, el biogás contiene partículas y trazas de otros gases lo que hace que no sea completamente puro; por lo anterior es necesario remover las impurezas hasta lograr el grado de purificación de acuerdo con la utilización del biogás; con su purificación se logra aumentar el poder calorífico del mismo y cumplir con los requerimientos de las aplicaciones, en la ilustración 12 se muestra las fases del biogás, desde la fase en estado crudo hasta la utilización en la generación de calor y electricidad, y la utilización como combustible (MINENERGIA et al., 2011).

Ilustración 12 Purificación del biogás



Fuente: Elaboración propia basada en MINENERGIA et al. (2011)

Contar con biogás es purificado, significa que el CO₂ y otros contaminantes fueron eliminados proporcionando al gas una mejor calidad que puede ser aprovechada en la generación de electricidad, iluminación, generación de energía mecánica y generación de energía térmica ver ilustración 11 (Ávila, 2009; MINENERGIA et al., 2011).



A continuación, se enlistan las principales formas en las que se utiliza el biogás:

- Producción de calor.

Pequeños sistemas de biogás permiten generar energía calorífica para realizar actividades domésticas como cocinar, la facilidad que presentan los quemadores de gas convencional para adaptarlos y que operen con este combustible permite cambiar la relación aire – gas y que la calidad de funcionamiento se mantenga.

- Generación de energía eléctrica.

La electricidad generada a través del biogás se ha utilizado en el alumbrado público con lámparas de baja eficiencia, con el requisito de que el área en donde se coloquen debe contar con la suficiente ventilación que permita diseminar el calor que se produzca. Adicionalmente su implementación en el área doméstica está presente en los refrigeradores gracias a que cuentan con un consumo uniforme a lo largo del día minimizando la necesidad de almacenar gas.

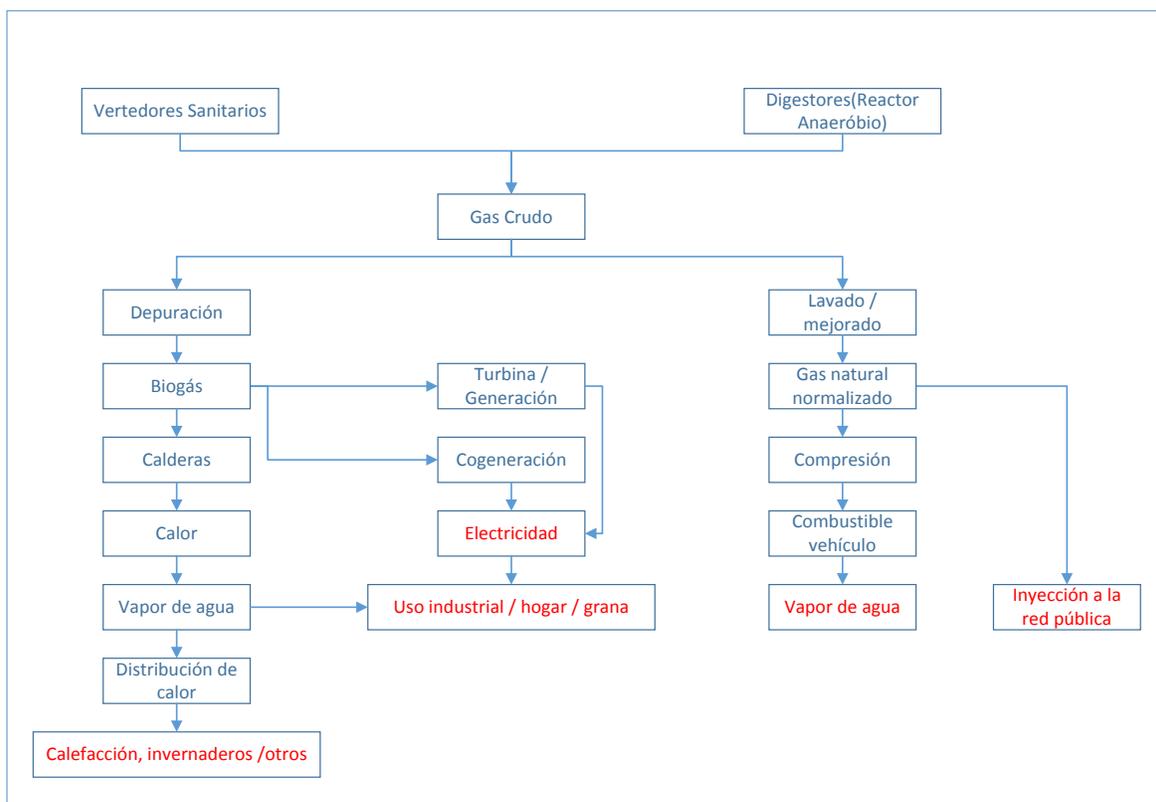
- Combinación de calor y electricidad.

Estos sistemas combinados utilizan la electricidad generada a través de la quema de combustible y el calor residual que se produce; generalmente estos sistemas generan calor mientras que la generación de electricidad pasa a segundo término; aunque, hay sistemas cuyo resultado es el inverso; sin embargo, en ambos casos la eficiencia del proceso es mayor si se compara con la utilización de biogás para producir aisladamente electricidad o calor.

- Combustible para vehículos.

Para la implementación del biogás como combustible vehicular, es necesario que la calidad que presente el biogás sea similar a la del gas natural. Actualmente existen vehículos que funcionan con gas natural gracias a modificaciones en el motor, que dá como resultado el correcto funcionamiento con gasolina convencional y con gas natural. Además, el biogás puede ser utilizado en motores de combustión interna tanto a gasolina como Diesel. En la ilustración 13 se presenta las fases por las que pasa el biogás y cuales son sus usos.

Ilustración 13. Usos del biogás



Fuente: Elaboración propia basada en Consultora BESEL S.A. (2008), SCHRIEWER BIOGAS

CONSULTING (2010), Deublein y Steinhauser (2011), Robles (2014), Bacchetta (2013), Martínez, Böttinger, Oechsner, y Schlegel (2008), Ávila (2009), Eaton, Díaz-López y Lokey (2014), Martínez, Böttinger, Oechsner, y Schlegel, (2008) y Villaseñor et.al (2013)



2.6. Ventajas y desventajas de la utilización de biogás

Son múltiples los beneficios que se derivan de la utilización del biogás como energético renovable, los cuales impactan favorablemente a la sociedad, la economía y al medio ambiente; en las tablas que a continuación se presentan se puede observar las ventajas y desventajas que se han identificado de la implementación del biogás como combustible vehicular, tablas 11, 12 y 13.

Tabla 11. Ventajas y desventajas ambientales del biogás

Factor: Ambiental	
Ventajas	Desventajas
Disminución de las emisiones de los vehículos terrestres, tales como monóxido de carbono e hidrocarburos volátiles	Dependencia de la materia orgánica de origen vegetal, animal y residual para la producción de biogás
Ahorro de combustibles fósiles	Produce menos energía por unidad de volumen
Se produce de recursos renovables, residuos industriales o basura	Riesgo de que gas metano puede escapar en la atmósfera al esparcir el digestato en los campos
No contribuye al calentamiento global, ni a la lluvia ácida	Es altamente inflamable
Evita contaminación del suelo, subsuelo, agua y aire	
Su producción genera un efluente rico en nutrientes por lo cual se considera un fertilizante natural	
La disposición final del material resultante de su producción puede ser esparcido directamente en los campos de manera más fácil	
Transformación de materia orgánica de origen vegetal, animal y residual en energía	
Energía 100% renovable	

Fuente: Elaboración propia basada en Consultora BESEL S.A. (2008), SCHRIEWER BIOGAS CONSULTING (2010), Deublein y Steinhauser (2011), Robles (2014), Bacchetta (2013), Martínez, Böttinger, Oechsner, y Schlegel (2008), Ávila (2009), Eaton, Díaz-López y Lokey (2014), Martínez, Böttinger, Oechsner, y Schlegel, (2008) y Villaseñor et.al (2013)



Tabla 12. Ventajas y desventajas económicas del biogás

Factor: Económico	
Ventajas	Desventajas
Reduce la dependencia del combustible fósil en los procesos industriales, así como en el sector del transporte	Disminución de la actividad petrolera
Menor costo de producción del biogás, comparado con el del energético fósil	Alto costo de inversión
No es afectado por las fluctuaciones cambiantes del mercado	Escasez de infraestructura
Ingresos a partir de la comercialización de certificado de carbono	Menor oferta de tecnologías para su uso

Fuente: Elaboración propia basada en Consultora BESEL S.A. (2008), SCHRIEWER BIOGAS CONSULTING (2010), Deublein y Steinhauser (2011), Robles (2014), Bacchetta (2013), Martínez, Böttinger, Oechsner, y Schlegel (2008), Ávila (2009), Eaton, Díaz-López y Lokey (2014), Martínez, Böttinger, Oechsner, y Schlegel, (2008) y Villaseñor et.al (2013)

Tabla 13. Ventajas y desventajas sociales del biogás

Factor: Social	
Ventajas	Desventajas
Ideal para el desarrollo de comunas rurales aisladas de los servicios de distribución eléctrica convencional	Generación de olores desagradables
Reducción de riesgo de enfermedades o complicaciones respiratorias	
Mejores cosechas derivadas de un fertilizante natural	
El biogás puede ser producido donde sea sin importar si la planta industrial se localiza en una zona urbana o rural.	

Fuente: Elaboración propia basada en Consultora BESEL S.A. (2008), SCHRIEWER BIOGAS CONSULTING (2010), Deublein y Steinhauser (2011), Robles (2014), Bacchetta (2013), Martínez, Böttinger, Oechsner, y Schlegel (2008), Ávila (2009), Eaton, Díaz-López y Lokey (2014), Martínez, Böttinger, Oechsner, y Schlegel, (2008) y Villaseñor et.al (2013)



2.7. El biogás como combustible alternativo

Utilizar el biogás que se genera de la descomposición de materia orgánica como combustible alternativo, está ligado con la modificación de los motores, con el fin de que estos puedan realizar la quema de biogás y convertirlo en energía mecánica. Actualmente existen diversos tipos de motores que trabajan eficientemente, para tener el contexto necesario se presentan a continuación la variedad de motores, así como sus principales características.

Motores de Combustión Interna

Esta maquinaria obtiene la energía mecánica a partir de la energía química de la quema del combustible que arde dentro de la cámara de combustión, de este tipo de motores existen varios; sin embargo, los más utilizados en sector vehicular son los motores de ciclos Otto y Diesel.

- El motor ciclo Otto

En este ciclo la combustión es generada por una causa externa, generalmente una chispa en la bujía y es la combustión se realiza a volumen constante. Los motores que responden a este ciclo son llamados Motores de Encendido Provocado (MEP).

- El motor Diesel

La combustión que se genera en este ciclo es en el momento en que el aire introducido en los cilindros se comprime hasta que alcanza una alta temperatura y presión, posteriormente se inyecta el combustible Diesel que se inflama a consecuencia de las condiciones internas. Los motores de que trabajan con Diesel se les conocen como Motor de Encendido por Compresión (MEC).



- El Motor de Gas-Otto

Este tipo de motores Gas Otto son para uso exclusivo de gas siguiendo el principio Otto, en estos motores la combustión es pobre y funciona con exceso de aire, para minimizar las emisiones de monóxido de carbono, lo que resulta en un menor consumo de gas. Los Motores de gas-Otto (MEP) requieren de un mínimo del 45% de metano en el biogás que utilizan.

- El Motor de Gas-Diesel

También conocido como motor MEC, es un motor Diesel de gas natural o biogás que constructivamente se deriva del motor Diesel; sin embargo, tiene un sistema de ignición diferente, el cual utiliza dos procedimientos:

1. Compresión de la mezcla aire-combustible e ignición por bujía.
2. Compresión de la mezcla aire-combustible e ignición de una pequeña cantidad de gasóleo que provocará la combustión del resto de la mezcla.

En este motor se mezcla el gas con aire, dicha mezcla pasa a través de un sistema de inyección en la cámara de combustión donde es encendido por el combustible irrigado. Estos motores funcionan con un exceso de aire; asimismo, pueden funcionar con Diesel o biodiesel si hay interrupción de gas.

Entre las ventajas que presenta este motor, se encuentran que la ignición de combustible renovable, es libre de azufre y mitiga la emisión de monóxido de carbono; sin embargo, entre las desventajas que se han identificado están que se presenta un mayor desgaste de los filtros, obstrucción del chorro, una menor viscosidad del aceite vegetal y libera óxido nitroso.



- Motor Stirling

Este motor funciona sin que se presente la combustión interna; más bien se basa en el principio de los cambios de volumen que se produce en el gas derivado de los cambios de temperatura. Los pistones del motor Stirling se mueven por la expansión del gas y la inyección de calor desde la fuente externa. Este motor presenta una eficiencia que oscila entre el 24% al 28%, que es menor a la que presentan los motores gas – Otto, asimismo la temperatura de escape está entre los 250 y 300 °C y la capacidad está por debajo de los 50 kW.

- Microturbinas de biogás

Son turbinas de pequeño tamaño que pueden obtener calor y electricidad con eficiencias térmicas que se encuentran en el rango del 50% a 60%, eléctricas entre 15% a 30% y la potencia inferior a 200 kW.

Estas se utilizan directamente en la generación distribuida, como elementos independientes de generación, o como integrantes de instalaciones híbridas con pilas de combustibles y en el terreno del transporte en vehículos híbridos.

El funcionamiento de las microturbinas ocurre cuando el aire se comprime en la cámara de combustión a alta presión y se mezcla con biogás, a partir de la mezcla de aire y biogás que se quema, causa el aumento de temperatura, así como la expansión del gas, posteriormente los gases calientes se liberan.

Finalmente es importante señalar que el costo de las microturbinas de biogás es alto en comparativa con otros sistemas de generación de energía.

Parámetros constructivos en vehículos con biogás



El impulso para el uso del biogás como combustible alternativo depende de las adaptaciones que se realicen a los motores para que operen con esta fuente de energía, dichas modificaciones puede ir desde la sustitución del combustible que para su funcionamiento hasta el diseño completo del motor optimizado para el uso del biogás, en la mayoría de los casos en los que se utilizó el biogás como combustible se logró igualar y en algunos casos hasta mejorar la presentación que ofrecen otros combustibles líquidos.

El esquema básico de un vehículo alimentado con biogás responde al de la ilustración 14. En este sentido, se presenta a continuación la descripción de cada componente que la ilustración describe:

1. Depósito de gas a presión

Es un depósito de combustible, en el cual se almacena el gas comprimido hasta 200 bares, las características de fabricación generalmente están basadas en el acero sin soldar; sin embargo, se fabrican también de materiales más ligeros. La posición en que se ubica en los vehículos convertidos por lo general es en la parte del maletero, mientras que en los vehículos nuevos se encuentra en la parte inferior. En los autobuses suelen tener estos depósitos en el techo llegando a pesar un 15% del total del peso del vehículo.

2. Válvula de botella

Está localizada e instalada en la salida del gas, es un elemento de seguridad para controlar el exceso de presión, la apertura y el cierre rápido del circuito.

3. Tubos de conexión

Permiten la correcta conexión entre el motor y la botella de gas natural comprimido (GNC) que es el depósito de combustible.



4. Regulador de presión

La finalidad del regulador de presión, como su nombre lo indica es moderar la presión para la alimentación del motor con gas; el regulador presenta varias fases a través de las cuales la presión inicial es reducida a presión constante.

5. Display: Indicador de nivel y selector de combustible

Es un sistema de control que permite realizar los cambios de combustibles desde el interior del vehículo, además indica el nivel de GNC con que se cuenta en la botella de almacenamiento.

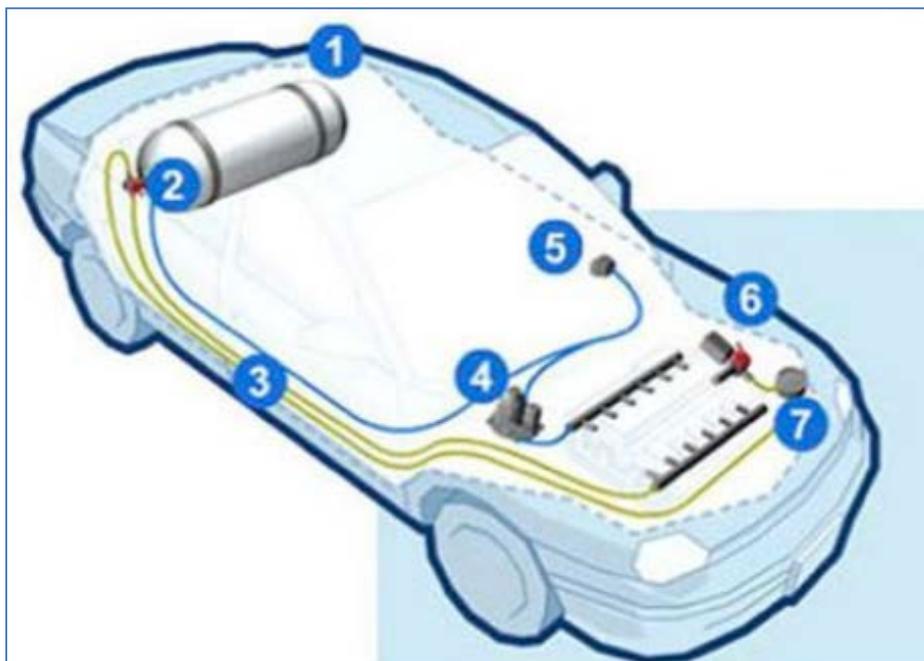
6. Válvula de llenado

Esta válvula puede estar ubicada dentro del compartimiento del motor, o al exterior del vehículo, este acoplamiento está estandarizado en Europa.

7. Manómetro

Mide e indica continuamente la presión del GNC que se encuentra almacenado en el depósito; el volumen del gas almacenado responde a la relación con la presión, o sea, el manómetro envía una señal que indica en el panel del vehículo la cantidad de GNC con que se cuenta en el depósito en todo momento.

Ilustración 14. Esquema de vehículo adaptado para biogás.



Fuente: Tomada de Consultora BESEL S.A. (2008)

Dispositivos para la formación de mezcla con combustibles gaseosos

Actualmente para que se lleve a cabo la combustión de gas que fue introducido a la cámara y para la formación de la mezcla es necesario contar con dos elementos fundamentales, los cuales son: un regulador de presión que permitirá tener el control de la presión y disminuirla desde el depósito en el que se encuentra almacenado el gas hasta la presión de trabajo; el otro elemento es un mezclador o inyector de gas, con el fin de que la mezcla de gas con aire se dosifique. Aunque existe una gran variedad de estos elementos, en seguida se mencionan los dos tipos más representativos:

- Mezcladores

Estos dispositivos permiten que el gas sea introducido en el conducto por el que pasa el aire admitido de forma parecida a la de los carburadores; la manera en que opera este



dispositivo es a través de una galería anular con orificios que conectan con el Venturi, permitiendo de este modo la distribución del gas, finalmente es conectada con el regulador de presión. Al presentarse una mezcla uniforme se facilita el tránsito hasta el cilindro, dicha presión suele ser baja, aproximadamente de 0.5 bar.

Para este efecto se pueden utilizar motores estacionarios, aquellos de cogeneración y regeneración como en automoción, en este caso es frecuente disponer del sistema de formación de mezcla con gasolina en paralelo.

- Inyectores

Estos son sistemas semejantes a los empleados en el uso de gasolina; sin embargo, es importante considerar la densidad de los fluidos empleados y condicionar el gasto a utilizar. Se ha identificado para el caso de gas natural, que la presión de entrada en el inyector es mayor a la del conector de admisión lo que lo vuelve un proceso independiente, además de suponer un salto crítico en la entrada del inyector derivado de la presión que se llega a producir cercana a los 7 bar.

Los inyectores pueden operar como único elemento, o bien, como inyección multipunto, con una rampa en común de alimentación a los inyectores cerca de la válvula de admisión. Así mismo, se suele utilizar para el arranque de los motores y apoyo a las condiciones máximas de potencia, cabe señalar que el gas natural y el biometano representan un 10% menor de la potencia generada por la gasolina.

Tipos de motores en la combustión con biogás

El gas natural se utiliza habitualmente en motores de combustión interna alternativos de encendido provocado del tipo MEP y motores tipo Otto, además se puede utilizar en



motores de encendido por compresión del tipo MEC; para lo cual se requiere que sean motores Diesel transformados. Enseguida se puntualizan los motores mencionados.

- Motores de encendido provocado (MEP)

Existen principalmente dos tipos de estos motores de encendido provocado en los vehículos alimentados con gas natural comprimido o con biometano, a continuación, se mencionan:

- Motores de vehículos monofuel, monovalentes o dedicados

Son motores optimizados que trabajan únicamente con gas natural, gran rendimiento y bajas emisiones, además de que poseen gran potencia.

- Motores de vehículos bifuel o bivalentes

Son motores con dos dispositivos de alimentación, uno de ellos para el gas natural y el otro para la gasolina; este tipo de motores únicamente requiere de una adaptación en el avance de encendido y esta puede ser reversible.

- Motores de vehículos trifuel: Motores flexibles

Son motores que pueden utilizar gasolina, etanol, mezclas de ambos o gas natural. Si el motor está correctamente adaptado para funcionar con biogás puede generar mayor potencia que uno de gasolina. Además, esta tecnología permite, entre otras cosas, la reducción de emisiones dañinas al medio ambiente.

- Motores de encendido por compresión (MEC)

Existen principalmente dos tipos de estos motores de encendido provocado en los vehículos alimentados con gas natural comprimido o con biometano; a continuación, se mencionan:



- Motores de vehículos dualfuel o combustible dual

Utilizan una mezcla de gas natural y gasóleo; este último actúa como iniciador del proceso de combustión inyectando directamente la mezcla a la cámara de combustión; por otro lado, el gas natural se inyecta en el aire de admisión a través del carburador o el sistema de inyección.

Cuando no se cuenta con carga de esta mezcla, el motor es alimentado por Diesel únicamente, lo que permite disminuir la proporción de gasóleo entre el 5 y el 20%, además de consumir del orden de 60-70% de gas natural y 30-40% de gasóleo.

Esta tecnología permite adaptar fácilmente motores Diesel con sólo reducir su relación de compresión y sin necesidad de adaptarle un sistema de ignición.

- Motores de vehículos de inyección directa de alta presión (HPDI)

Son motores cuya tecnología es dual-fuel la cual inyecta simultáneamente gasóleo y gas natural a alta presión en la cámara de combustión. Frecuentemente el gasóleo se inyecta en pequeñas cantidades, siendo este el responsable de que se produzca la combustión. Tiene aplicación para vehículos pesados.

- Motores de vehículos de HCNG

Estos motores operan con una mezcla de gas natural e hidrógeno que oscila entre el 4 al 9%; se ha identificado que si estos motores son bien optimizados pueden trabajar con mezclas pobres, mejorando su rendimiento y reduciendo las emisiones de óxidos nitrosos; sin embargo, quedan gran cantidad de hidrocarburos sin quemar.

Actualmente los sistemas dual fuel dependen de las condiciones de operación, si estos se controlan de manera electrónica y se inyecta directamente el gas en la cámara de



combustión se mejoran los rendimientos y mitigan las emisiones (Consultora BESEL S.A., 2008).

Comparación con otros combustibles

El poder calorífico de la fracción de metano que se encuentra en el biogás es muy valioso. El metano puro a temperatura y presión estándar tiene un poder calorífico de aproximadamente $34,000 \text{ kJ/m}^3$, mientras que el biogás sin purificar con 65% de metano en su composición tiene un valor calorífico aproximado de $22,350 \text{ kJ/m}^3$, debido a que sólo se quema la porción de metano (Durán et al., 2014).

En la tabla 14 se pueden observar las cantidades de dióxido de carbono que se generan tras la combustión de biogás y se puede apreciar que son inferiores a las emitidas por combustibles fósiles (Ecoscore, 2012; Durán et al., 2014).

Tabla 14. Emisiones de diferentes combustibles

Combustible	Emisiones de CO₂ kg/L
Diesel	2.64
Gasolina	2.39
Gas licuado de petróleo	1.67
Gas natural	0.00175
Biogás	0.00193

Fuente: Tomada de Durán et al. (2014)



2.8. Estado del arte

El tema de biogás y de los biodigestores no es asunto nuevo, desde el año 1600 aproximadamente, varios científicos identificaron al compuesto como un gas proveniente de la descomposición de la materia orgánica (Hibert). Como resultado de nuevas tecnologías y de su implementación como energía ha logrado gran impulso a nivel mundial, apoyándose en las ventajas que representa su utilización, tales como la mitigación del calentamiento global y una mejor gestión de los residuos sólidos urbanos. Actualmente en países de Europa, Asia y de América el uso del biogás ha tenido cabida en varias aplicaciones, la más representativa es su uso para la producción de energía eléctrica, combustible de vehículos terrestres y generación de calor.

Los países con mayor desarrollo en el uso de biogás para generación de calor y energía eléctrica son China, India, Holanda, Francia, Gran Bretaña, Italia, Estados Unidos y Filipinas; además, Suecia, Suiza y Alemania ya cuentan con estaciones de distribución de biogás para vehículos terrestres, a continuación, se detalla en qué consiste el desarrollo de la producción de biogás en algunos de estos países.

Un país líder en el desarrollo e implantación del biogás en el sector transporte es Suecia, quien ha impulsado la introducción de este nuevo combustible en los vehículos, a pesar de la producción es compleja, así como que la infraestructura y la flota vehicular deben de crecer y desarrollarse a la par.

Lo anterior, se logró gracias a que Suecia implementó instrumentos políticos, esquemas de inversión y exclusión de impuestos sobre energía y dióxido de carbono, lo que ha permitido que el país construya instalaciones adecuadas para la producción de biogás y su distribución.



En Suecia el aprovechamiento del biogás que producen las plantas de tratamiento de aguas residuales a través de la digestión anaerobia comenzó en la década de los noventa para el sector del transporte, lograron purificarlo al 95% de metano que es un estándar sueco, con ello se logró que fuera combustible adecuado para su uso en vehículos, así como para la inyección en las redes de gas natural del país; el gobierno de este país busca que para el año 2030 se cuente con una flotilla de vehículos cuyo combustible utilizado no sea fósil.

Olsson y Falde (2014) informan que el desarrollo del biogás en Suecia ha sido impulsado con éxito por cuestiones relacionadas con el medio ambiente y gestión de residuos, además, señalan que, para aumentar la producción de biogás, es esencial aplicar medidas locales y sectoriales, especialmente en las políticas de gestión de residuos.

De acuerdo con Olsson y Falde se identificaron inconvenientes que se presentan de manera recurrente en cuanto al uso del biogás; entre los que destacan:

- Disponibilidad de:
 - Combustibles
 - Vehículos específicos para la quema de biogás
 - Materia prima
 - Infraestructura especial para la distribución del biogás
- Falta de políticas para impulsar el biogás:
 - Subsidios
 - Normas

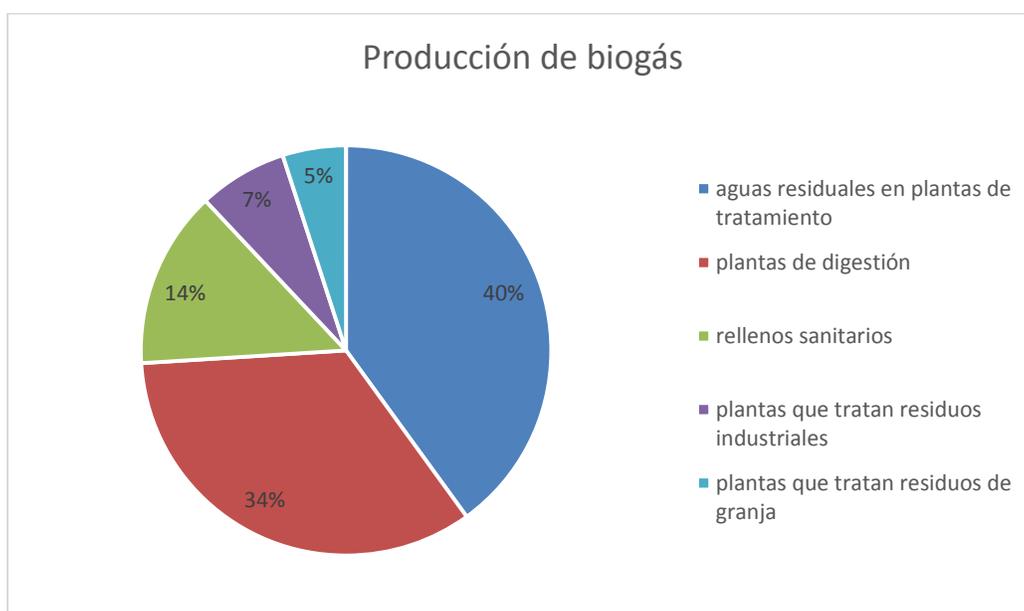
El potencial que tiene la producción de biogás y las posibilidades de distribución se verían favorecidas con los subsidios; en este sentido, Goulding (2014), sugiere implantar instrumentos de políticas y acciones que permitan la incorporación del biogás en el sector

del transporte, introducir el biogás en la flotilla cautiva, facilitar la inyección en la red de gas natural, la introducción de apoyo a la inversión para la infraestructura.

En el 2015 Eker y Van Daalen desarrollaron un análisis de la producción de biometano y los resultados que reportan es que el subsidio es crucial para este desarrollo y que debe ser proporcionado por un largo período de tiempo para alcanzar los objetivos de maximizar la producción de biogás y reducción de emisiones de una manera rentable.

Según datos recabados en 2013, en Suecia, se establece que la producción total de biogás es equivalente a 1.7 TWh (teravoltios hora), que son el resultado del procesamiento de aguas residuales en plantas de tratamiento, representando un 40% del total de la producción de biogás, mientras que las plantas de digestión son equiparables al 34%, los rellenos sanitarios al 14%, en las plantas que tratan residuos industriales se reportó un 7% y las plantas que tratan residuos de granja un 5%, los porcentajes se muestran en la ilustración 15.

Ilustración 15. Producción de biogás en Suecia.



Fuente: Elaboración propia basada en Marten Larrsson (2015)



La parte principal del biogás, que representa un 54%, se purifica sometiendo al gas a un proceso de desulfuración para obtener biogás mejorado con altas concentraciones de metano (cerca al 98%) y esta fracción ha aumentado continuamente durante los últimos diez años, mientras que el 31% se utiliza para la calefacción y una pequeña fracción del 3% se utiliza para la electricidad. El principal uso de biogás después de haber sido purificado es como combustible vehicular.

Durante este mismo año, el 11% del combustible utilizado en el sector del transporte por carretera era de biocombustibles, el 11% de esto fue biogás, el 25% de bioetanol y un 64% de biodiesel. Hoy en día, el biogás no sólo se utiliza principalmente en autobuses y coches comerciales o de empresa, sino también en los vehículos particulares y camiones ligeros y pesados. El biogás puro se puede utilizar en un motor Otto y una mezcla de biogás y Diesel se pueden usar en un motor Diesel de combustible dual. El motor Otto es adecuado para coches de pasajeros, transportes ligeros y autobuses, mientras que el motor Diesel de doble combustible es más adecuado para transportes pesados, de larga distancia.

Distribución

La energía para la compresión o refrigeración junto con la baja densidad de energía provoca altos costos de almacenamiento y distribución. El biogás puede ser transportado con camiones como CBG (Biogás Comprimido) o LBG (Biogás Licuado), en la red de gas natural, o en una red exclusiva de biogás.

Existen principalmente tres factores que influyen en el medio de transporte del biogás: el volumen de biogás, la distancia de transporte y la infraestructura disponible.

Para el transporte de 100 GWh al año de biogás, estimaron que el costo más bajo de transporte (EUR / kWh).



-
- Para distancias de hasta 50 km podría lograrse mediante la construcción de una red local de gas.
 - Por encima de esa distancia (>50 km) el transporte por carreteras de CBG tenía el menor costo.
 - El transporte en camiones de LBG puede ser más favorable que el CBG en distancias más largas (200-300 km) en términos de economía y eficiencia energética. Pero un mayor volumen de biogás (>100 GWh) es necesario para motivar el proceso de licuefacción.
 - Una red de biogás local puede proporcionar un transporte eficiente cuando el volumen de biogás es alto y se estima en 1 TWA de biogás por año.

Políticas generales para energías alternativas

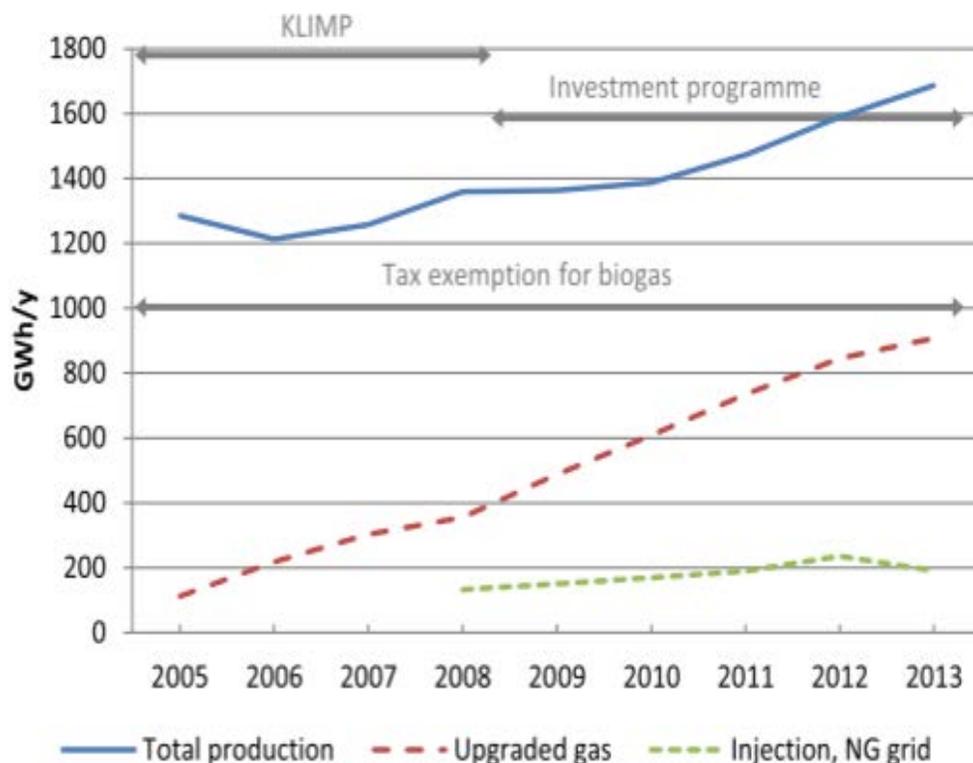
Las políticas y medidas para incentivar a los combustibles alternativos y vehículos incluyen:

- Instrumentos de regulación, por ejemplo, los mandatos de combustible o las normas de emisión.
- Instrumentos económicos, por ejemplo, subsidios, subvenciones de capital y los incentivos fiscales.
- Instrumentos de adquisición, por ejemplo, compra pública verde.
- Instrumentos de colaboración, por ejemplo, el sector público y privado.
- Instrumentos de comunicación y difusión.

El biogás para el sector del transporte sigue siendo una industria en desarrollo y la producción y distribución, son más caros que la de los combustibles fósiles líquidos. Por lo tanto, se necesitan instrumentos de política para apoyar la cadena de producción de biogás

para su uso en el sector del transporte, en la ilustración 16 se muestra el crecimiento en la producción de biogás a partir de la inclusión de políticas como las ya mencionadas.

Ilustración 16. Producción de biogás en Suecia



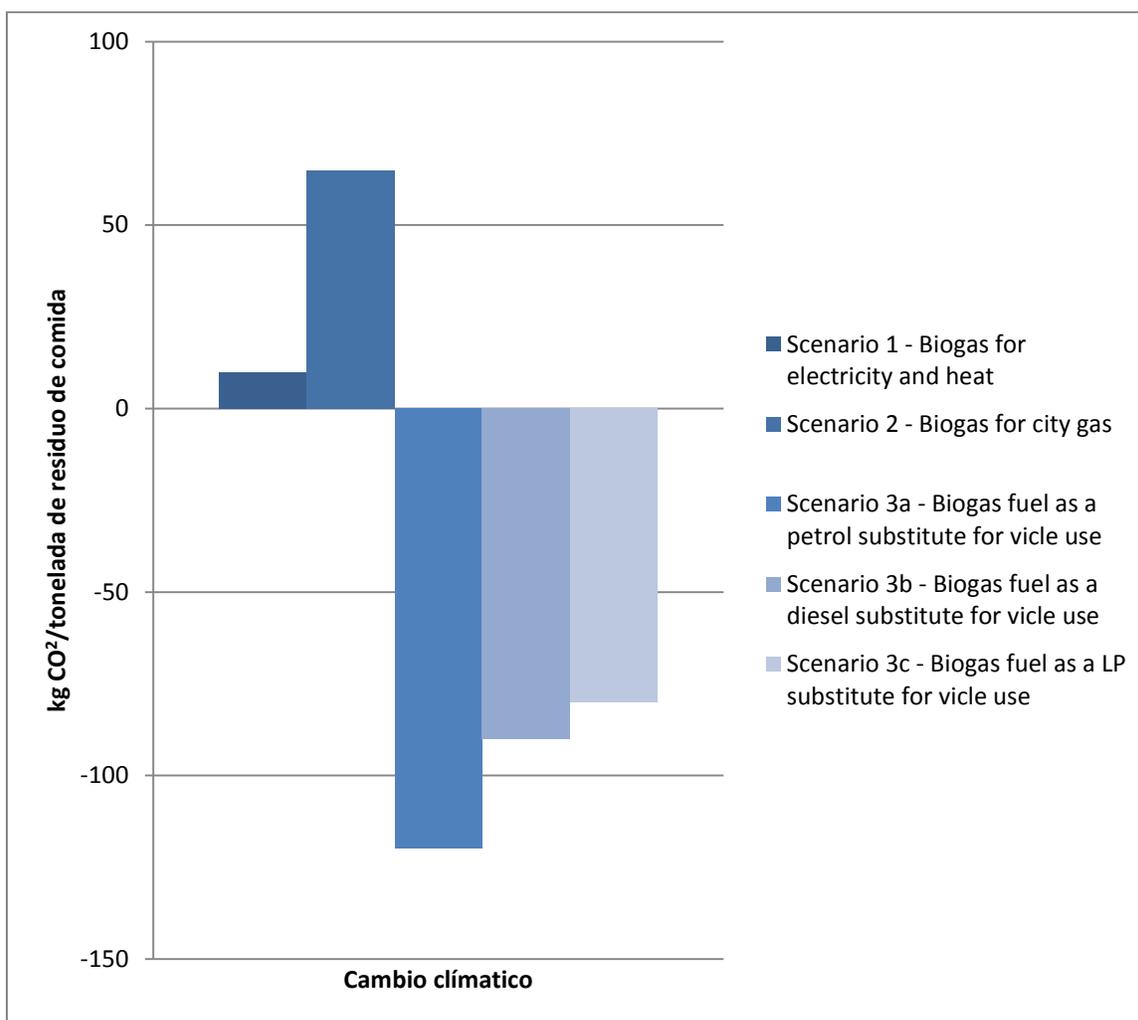
Fuente: Tomada de Marten Larrsson (2015)

Evaluación ambiental

Otro ejemplo del uso de biogás ocurre en Hong Kong, donde se ha utilizado como sustituto de la gasolina en el uso de vehículos y se ha visto que es ventajoso con respecto a otros tipos de energía en relación de la salud humana, los ecosistemas, y también es eficiente en la reducción de emisiones futuras. 1080 toneladas por día de residuos de alimentos generan biogás como sustituto de la gasolina, lo cual equivale a la reducción del 1,9% de las emisiones de gases de efecto invernadero en los sectores de transporte, lo que da como resultado una gran disminución de gases que contribuyen con el efecto invernadero.

En la ilustración 17 para el cambio climático, se presentan en valores negativos las emisiones de CO₂ evitadas, en particular en el escenario 3a (es decir, el combustible biogás como sustituto de la gasolina), que representa el mejor de los casos (103.67 kgCO₂/tonelada de residuos de alimentos), por lo tanto, proporciona un impacto ambiental positivo sobre el cambio climático.

Ilustración 17. Cambio climático



Fuente: Tomada de Kok Sin Woon (2016)



3. DISEÑO DE UNA PLANTA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

Se diseñó de manera conceptual una planta de digestión anaerobia para la producción de biogás de uso vehicular, donde los principales sistemas dentro de dicho proceso son:

- Pretratamiento
- Biodigestor
- Almacenamiento del digestato
- Tuberías y válvulas
- Limpieza del biogás
- Almacenamiento

3.1. Criterios de diseño

Los criterios básicos para el diseño de una planta de DA son las características del sitio y el tipo de proceso seleccionado para el tratamiento de la FORSU (Durán, 2014).

Características del sitio

Se deben considerar las siguientes indicaciones para la correcta instalación y ubicación de la planta ya que es un factor importante para su adecuado funcionamiento (Durán, 2014).

- Debe instalarse cerca del lugar donde se consumirá el biogás, pues las tuberías son costosas.
- Debe encontrarse cerca del lugar donde se recolecta el sustrato de alimentación del biodigestor, para evitar inconvenientes con el traslado del mismo que puedan afectar la operación correcta y continua del biodigestor, y que implicarían mayores costos.
- La topografía del terreno debe favorecer que el almacenamiento del efluente se realice por gravedad. Debe situarse en un lugar cercano al de almacenamiento del

efluente y con una pendiente adecuada para facilitar el transporte y salida del mismo.

- Debe instalarse a una distancia mínima de 500 m de cualquier núcleo poblacional.
- Debe ubicarse, por lo menos, a 500 m de cualquier fuente de agua (lagos, lagunas y pozos de extracción), para evitar posibles contaminaciones.
- Debe evitarse el contacto con el manto freático, para prevenir las filtraciones hacia el interior o la contaminación del manto freático.

La planta se ubicará en Prolongación Sinaloa 2, Villa Milpa Alta, Santa Martha, C.P. 12000 Ciudad de México. Ver ilustración 18.

Ilustración 18. Ubicación de la planta de DA

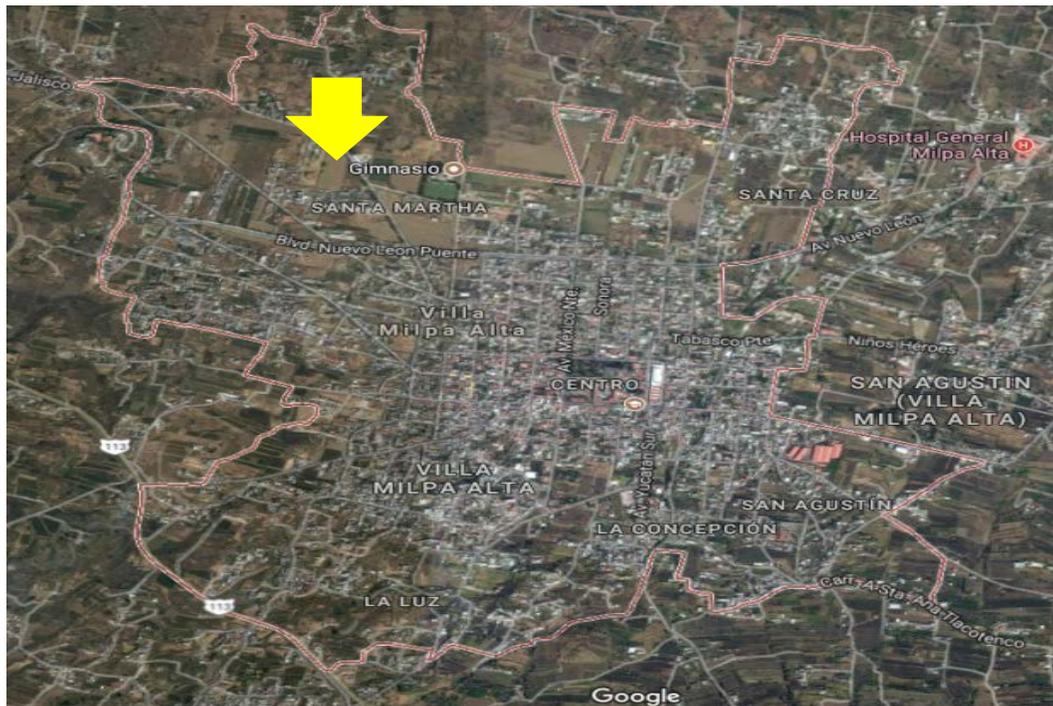


Ilustración 18: Muestra la ubicación de la planta de DA al borde de la delegación Milpa Alta

Se eligió porque cuenta con los puntos anteriormente señalados como se muestra en la ilustración 19 (Durán et al., 2014).

Ilustración 19. Sitio de la planta de DA

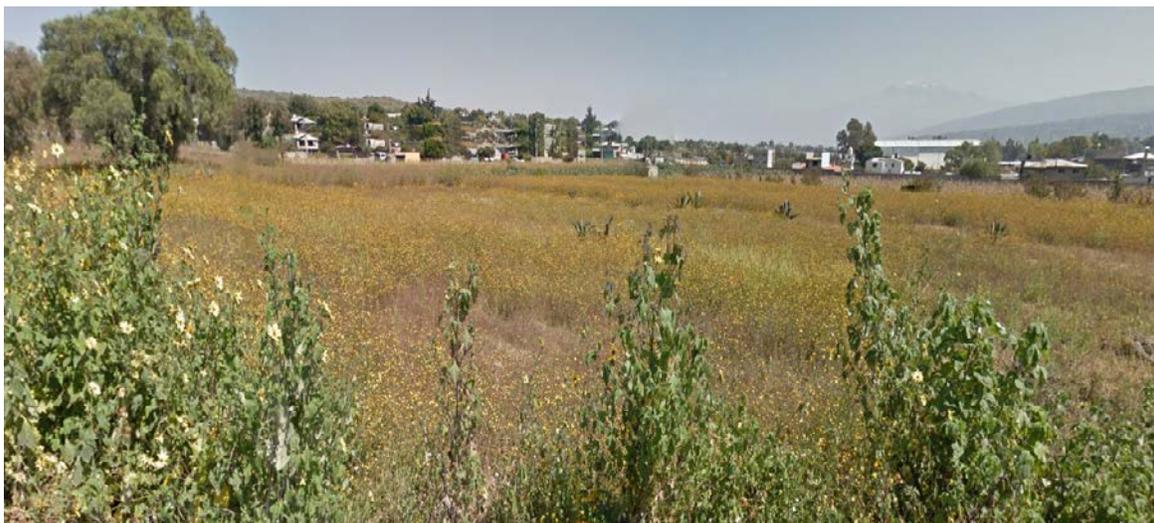


Ilustración 19: Foto obtenida de Google Maps que muestra los terrenos donde estará ubicada la planta de DA

Tipo de proceso

El dimensionamiento de los sistemas de la planta de DA se basará en los procesos de frecuencia de alimentación y del contenido de sólidos en la materia de alimentación (Durán et al., 2014).

Frecuencia de alimentación

Debido al tipo de sustrato que se quiere tratar se eligió un biodigestor de alimentación continua, por lo cual los lodos y el biogás generado salen del biodigestor con un flujo continuo y constante.

Existen dos tipos de biodigestores continuos, los del tipo Reactor Continuo Completamente Mezclados (CSTR) y los del tipo Reactor de Flujo Pistón (PFR), generalmente los CSTR se usan para la digestión húmeda mientras que los PFR para la digestión seca.



En un CSTR la concentración de bacterias y sustrato es la misma en todo el volumen del biodigestor, por lo tanto, el efluente de éste tiene las mismas características que la materia dentro del biodigestor.

En un PFR las características del sustrato son las mismas radial y angularmente, no así de manera longitudinal.

Contenido de sólidos

En la mayoría de los procesos de DA todas las fases se llevan a cabo en una sola etapa, esto quiere decir que la hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis se producen en un sólo biodigestor.

Los sistemas de una etapa se clasifican según el contenido de sólidos. Existen los sistemas secos de una etapa y los sistemas húmedos de una etapa.

Sistemas secos de una etapa. $ST > 20\%$

En estos sistemas el contenido de sólidos totales tiene un porcentaje requerido entre el 20% y 40%, de modo que no se requiere su dilución con agua. Para este tipo de sistemas se requiere cintas transportadoras, tornillos y bombas especiales para flujos altamente viscosos. Normalmente se emplean biodigestores tipo PFR.

Sistemas húmedos de una etapa. $ST < 15\%$

Estos sistemas utilizan agua para diluir la concentración de sólidos totales del sustrato desde un 4% hasta un 15%. Comúnmente se utiliza un biodigestor del tipo CSTR de agitación continua (Duran et al., 2014).



Haciendo una comparativa entre ambos procesos tanto el de frecuencia de alimentación, así como el de contenido de sólidos, se decidió diseñar un Sistema húmedo de una etapa con un reactor del tipo CSTR. Esta decisión se tomó debido a las ventajas que presenta ver tabla 15, y a los procesos que son más conocidos.

Tabla 15. Comparación entre sistemas secos y sistemas húmedos

	Sistemas secos. ST > 20%		Sistemas húmedos. ST < 15%	
Criterio	Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Técnico	No es necesario remover inertes. No se forman capas en el biodigestor.	No se pueden tratar desechos con ST menores al 20%.	Basado en procesos muy conocidos. Mayor capacidad de tratamiento.	Abrasión con arena.
Biológico	Poca pérdida de SV en el pretratamiento. Dispersión limitada de inhibidores.	Poca posibilidad de diluir inhibidores con agua.	Dilución de inhibidores con agua.	Perdida de SV.
Económico y ambiental	Pretratamiento barato. Mejores requerimientos energéticos y de agua.	Equipo de transporte más robusto y caro. Mantenimiento caro y complicado.	Equipo de manejo de lodos más barato.	Alto consumo de agua y energía.

Fuente: Elaboración propia basada en Duran et. al (2014)



3.2. Características del sustrato

Se utilizaron los datos del estudio Trituración de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos de la Ciudad de México y producción anaerobia de biogás que utiliza residuos de la estación de transferencia de Milpa Alta perteneciente a la Dirección General de Servicios Urbanos los cuales ocuparemos para realizar el diseño de la planta de DA (Ramos, 2012). La estación de transferencia cuenta con 51 vehículos de recolección que en promedio ingresan 76 toneladas al día de residuos mezclados provenientes de domicilios, barrido manual, edificios públicos, comercios, industrias, mercados y escuelas.

El peso volumétrico se determinó con base en la NMX-AA-019-1985 donde se obtuvo un valor de 778 kg/m³.

Para obtener la caracterización del sustrato se mezclaron 50 g de residuos con 150 ml de agua hasta obtener una mezcla homogénea. En la tabla 16 se muestran los resultados de la caracterización con un tamaño de partícula de 3 a 100 mm (Ramos, 2012).

Tabla 16. Caracterización del sustrato

Humedad (%)	ST (mg/kg)	SV (mg/kg)	SF(mg/kg)
79	215,600	175,032	40,568

Fuente: Elaboración propia basada en Ramos (2012)

En la Tabla 15 se muestra la cantidad de sólidos (sólidos totales ST, sólidos volátiles SV y sólidos fijos SF) y el porcentaje de humedad que presenta el sustrato. Se observa que los ST > 15% por lo que se requiere un pretratamiento (Ramos, 2012).

Producción neta de biogás

La producción neta de biogás (en condiciones estándar y en el quinto día de experimentación) que se obtuvo fue de 0.518 NL/gSV (Ramos, 2012).



Producción específica de metano

La producción específica de metano permite conocer la cantidad de metano que se produce por microorganismos en condiciones anaerobias. Para determinar la producción específica de metano se multiplica la fracción de metano por el volumen de biogás y se divide entre la cantidad de sólidos volátiles que existen en el reactor. El valor promedio de la producción específica de metano en condiciones estándar (presión 0.771 atm; temperatura 22 °C) es de 0.369 NL/gSV (Ramos, 2012).



3.3. Pretratamiento

El pretratamiento de la FORSU es un proceso indispensable para el correcto y óptimo funcionamiento del biodigestor.

Trituración

La función de un pretratamiento mecánico es reducir el tamaño de partícula consiguiendo un menor volumen de compactación, el aumento del peso volumétrico y una mayor superficie específica del material, que se verá reflejado en una mayor dilución del sustrato y una mayor biodisponibilidad de los nutrientes.

Se recomienda alcanzar un tamaño de partícula de entre 20 y 150 mm (Durán, 2014).

Se utilizará una trituradora denominada HC de residuos sólidos, que es utilizada en el tratamiento de los residuos sólidos municipales.

Para el pretratamiento se contará con una trituradora HCD-8T (Huanchuang, 2017).

- Apertura de alimentación 1220 mm x 830 mm.
- Alimentación máxima 450 mm.
- Abertura de descarga 50 mm.
- Capacidad 7 a 10 toneladas por hora.
- Velocidad de 41 revoluciones por minuto.
- Potencia de 45-75 kW.
- Tamaño de maquina 4000 mm × 1400 mm × 1700mm.



Dilución

En caso de que la materia prima contenga un porcentaje mayor de ST que los requeridos es conveniente diluirla antes de ser introducida al biodigestor. Esto se representa mediante la siguiente expresión.

$$Q = B + A$$

Donde:

Q (m³/d): Materia prima de alimentación.

B (m³/d): Volumen de FORSU en la entrada del sistema.

A (m³/d): Volumen de agua en la entrada del sistema.

Para la DA húmeda la materia prima de alimentación debe presentar un contenido de sólidos totales de 4 a 15%, por lo que se requiere calcular el volumen de agua requerido para diluir su concentración por medio de la siguiente ecuación (Durán, 2014).

$$ST_Q Q = ST_B B + ST_A A$$

Sustituyendo Q de la ecuación anterior y despejando A es posible conocer el volumen de agua requerido para la dilución.

$$A = \frac{B(ST_B - ST_Q)}{ST_Q - ST_A}$$

Donde:

Q (m³/d): Materia prima de alimentación.

B (m³/d): Volumen de FORSU en la entrada del sistema.

A (m³/d): Volumen de agua en la entrada del sistema.

ST_A (%): Porcentaje de sólidos totales en el agua.

ST_B (%): Porcentaje de sólidos totales en la FORSU.

ST_Q (%): Porcentaje de sólidos totales en el afluente del biodigestor.



Para realizar el cálculo del volumen de agua requerido para la dilución se tomaron en cuenta los siguientes datos y consideraciones.

La planta va a tratar $100 \text{ m}^3/\text{d}$ de FORSU; por lo tanto, $B = 100 \text{ m}^3/\text{d}$.

Los sólidos totales presentes en la FORSU son $215,600 \text{ mg}_{\text{ST}}/\text{kg}_{\text{FORSU}}$, lo que equivale a 21.56% ; por lo tanto, $ST_B = 21.56\%$ (Ramos, 2012).

La dilución se realizará con agua tratada para descarga en el sistema de alcantarillado con un límite permisible de sólidos totales de 1600 mg/l según lo establecido en la NOM-02-SEMARNAT-1996; Por lo tanto, $ST_A = 0.16\%$ la (Ley de Gestión Ambiental y del Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental , 2002).

El porcentaje de sólidos totales en el afluente del biodigestor se va a variar desde $ST_Q = 5\%$ - 10% .

Aplicando la ecuación 3 se tienen los resultados que se muestran en la tabla 17.

Tabla 17. Cálculo del volumen de agua para la dilución

STQ (%)	A (m^3/d)
5	342.15
6	266.44
7	212.87
8	172.96
9	142.08
10	117.48

Fuente: Elaboración propia



La relación de mezclado (B: A) que generalmente utilizan los biodigestores húmedos para el tratamiento de FORSU es de 1:2 (Durán, Bases de diseño del proceso de digestión anaerobia, 2014). De los resultados obtenidos lo más cercano a esa relación de mezclado está dada por $ST_Q = 7\%$, con un volumen de agua igual a $A = 212.87 \text{ m}^3/\text{d}$.

Sustituyendo A en la ecuación 1, tenemos que la materia prima de alimentación es de $Q = 312.87 \text{ m}^3/\text{d}$.

3.4. Tanque de igualación

El tanque de igualación se va a diseñar para mejorar la homogenización de la materia prima, y para recibir lo que se va a digerir durante un día de operación, considerando un factor de sobredimensionamiento.

$$V_{ti} = Qfs$$

Donde:

V_{ti} (m^3): Volumen del tanque de igualación.

Q (m^3/d): Materia prima de alimentación.

fs : Factor de sobredimensionamiento.

Considerando un $fs = 1.2$ que indica un sobredimensionamiento del 20% en caso de imprevistos se tiene.

$$V_{ti} = (312.87)(1.2)$$

$$V_{ti} = 375.44 \text{ m}^3$$

Los tanques de igualación regularmente tienen una geometría cilíndrica vertical.

$$V_{ti} = \pi r^2 h$$



Donde:

V_{ii} (m^3): Volumen del tanque de igualación.

r (m): Radio del tanque.

h (m): Altura del tanque.

Considerando una altura $h = 10$ m; y despejando r se tienen las siguientes dimensiones para su diseño.

$$r = \sqrt{\frac{375.44}{\pi 10}}$$
$$r = 3.46 \text{ m}$$

El tanque de igualación tendrá un volumen de 375.44 m^3 ; un radio de 3.46 m y una altura de 10 m.

3.5. Producción de biogás

Para obtener el flujo de alimentación al biodigestor se recomienda utilizar un factor de seguridad de 1.2 , ya que en ocasiones el volumen del biodigestor es afectado por acumulación de material inorgánico o de la baja eficiencia del mezclado.

$$Q_D = 1.2Q$$

Donde:

Q (m^3/d): Materia prima de alimentación.

Q_D (m^3/d): Materia prima de alimentación para el diseño.

$$Q_D = (1.2)(312.87)$$

$$Q_D = 375.44 \frac{m^3}{d}$$

Teniendo un flujo final para el diseño de $375.44 \text{ m}^3/d$ (Durán, 2014).



El cálculo de la producción de biogás de la planta estará dado por la producción neta de biogás; es decir la producción en m^3 de biogás por kg de sólido volátil; $P_{NB} = 0.518 \text{ m}^3/\text{kg}_{sv}$.

Para conocer los SV en el sustrato o materia prima de alimentación se tiene lo siguiente.

$$\gamma_{\text{FORSU}} = 778 \text{ kg}/\text{m}^3$$

Los sólidos de las muestras se obtuvieron con una humedad del 79% y se estimaron por medio de una relación al 93% de humedad o el 7% de ST requeridos en el afluente del biodigestor como se muestra en la tabla 18.

Tabla 18. Sólidos en la muestra y en el afluente del biodigestor

Humedad	ST kgST/kgFORSU	SV kgSV/kgFORSU	SF kgSF/kgFORSU
79%	0.216	0.175	0.041
93%	0.183	0.149	0.034

Fuente: Elaboración propia

Es necesario calcular la cantidad de SV en kg que entran al biodigestor en la materia prima de alimentación.

Se hace la conversión de volumen a masa, del volumen de FORSU en la entrada del sistema y del volumen de agua en la entrada del sistema.

$$M_B = \gamma_B B$$

$$M_B = (778)(100)$$

$$M_B = 77,800 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

$$M_A = \gamma_A A$$

$$M_A = (1000)(212.87)$$

$$M_A = 212,865.50 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$



Donde:

B (m^3/d): Volumen de FORSU en la entrada del sistema.

M_B (kg/d): Masa de FORSU en la entrada del sistema.

γ_B (kg/m^3): Peso volumétrico de la FORSU.

A (m^3/d): Volumen de agua en la entrada del sistema.

M_A (kg/d): Masa de agua en la entrada del sistema.

γ_A (kg/m^3): Peso volumétrico del agua.

La masa de la FORSU y del agua, suman para obtener la masa de la materia prima de alimentación y se multiplica por el factor de seguridad de 1.2 para obtener la masa de diseño.

$$M_Q = M_B + M_A$$

$$M_Q = 77,800 + 212,865.50$$

$$M_Q = 290,665.50 \frac{kg}{d}$$

$$M_{QD} = (1.2)(290,665.50)$$

$$M_{QD} = 348,798.60 \frac{kg}{d}$$

Donde:

M_Q (kg/d): Materia prima de alimentación.

M_{QD} (kg/d): Materia prima de alimentación para el diseño.

Se obtienen los ST que existen en la materia prima de alimentación multiplicando el valor de la masa del sustrato para el diseño, por la masa de ST que existen en la FORSU con una humedad del 93%, despreciando los ST en el agua.

$$ST_{QD} = (M_{QD})(ST_{FORSU})$$



$$ST_{QD} = (348,798.60)(0.183)$$

$$ST_{QD} = 63,880.40 \frac{kg}{d}$$

Donde:

$ST_{FOR\text{SU}}$ ($kg_{ST}/kg_{FOR\text{SU}}$): Contenido de ST con una humedad del 93%.

ST_{QD} (kg_{ST}/d): Contenido de ST en la entrada del sistema.

Para obtener los SV que entran al sistema se procede de manera similar utilizando el valor correspondiente a la concentración de SV en la FORSU con una humedad del 93%.

$$SV_{QD} = (M_{QD})(SV_{FOR\text{SU}})$$

$$SV_{QD} = (348,798.60)(0.149)$$

$$SV_{QD} = 51,850.97 \frac{kg}{d}$$

Donde:

$SV_{FOR\text{SU}}$ ($kg_{SV}/kg_{FOR\text{SU}}$): Contenido de SV con una humedad del 93%.

SV_{QD} (kg_{SV}/d): Contenido de SV en la entrada del sistema.

Del total de los SV que entran al sistema solo el 60% son los que producirán biogás (SV_{BIOGAS}), (Duran, 2014).

Por lo tanto.

$$SV_{BIOGAS} = 0.6SV_{QD}$$

$$SV_{BIOGAS} = 31,110.58 \frac{kg}{d}$$

La producción de biogás estará dada por la transformación de 31,110.58 kg/d de sólidos volátiles digeridos en el biodigestor.

Además de la producción neta de biogás y la cantidad de SV, en la generación de biogás existen otras variables para que el cálculo de su producción sea más preciso.



Como un modelo sencillo para el diseño de biodigestores se utilizan valores constantes en parámetros operacionales, de alimentación del sustrato, cinéticas de consumo y balance en estado estacionario; obteniendo ecuaciones fáciles de comprender, pero inexactas ya que carecen de especificaciones particulares dentro del proceso global.

El modelo más sencillo para representar la digestión anaerobia se representa por la rapidez de consumo de sustrato r_s , una constante cinética de primer orden K y la concentración del sustrato S .

$$r_s = -KS$$

Para empezar, se efectúa un balance de masa en un biodigestor completamente mezclado y en estado estacionario.

$$\frac{VdS}{dt} = QS_0 - QS + r_s$$

Donde:

V (m^3): Volumen del biodigestor.

Q (m^3/d): Flujo a la entrada del biodigestor.

S_0 (g/l): Concentración del sustrato en el afluente.

S (g/l): Concentración del sustrato en el efluente y por lo tanto en el biodigestor.

r_s : Rapidez del consumo del sustrato

Tomando la ecuación anterior y considerando que en el estado estacionario no hay acumulación y que el tiempo de retención hidráulica θ es el cociente del volumen entre el flujo, se tiene.

$$0 = \frac{S_0}{\theta} - \frac{S}{\theta} - KS = \frac{S_0}{\theta} - S \left(\frac{1}{\theta} + K \right) = \frac{1}{\theta} [S_0 - S(1 + K\theta)]$$



Donde al despejar S se tiene:

$$S = S_0 \frac{1}{1 + K\theta}$$

Que es la concentración en el biodigestor y por tanto en el efluente.

Si se considera el crecimiento microbiano es posible obtener una ecuación que modela la concentración del sustrato en estado estacionario a partir de las cinéticas de crecimiento microbiano y de consumo del sustrato.

$$S = \frac{K_s(1 + K_d\theta)}{\theta(YK_{MAX} - K_d) - 1}$$

Donde:

S (g/l): Concentración del sustrato en el efluente y por lo tanto en el biodigestor.

K_s (mg/l): Constante de rapidez media.

K_d (g/g d): Coeficiente de decaimiento endógeno.

Y (g_{SSV}/g_{DQO}): Coeficiente de producción celular.

K_{MAX} (g_{DQO}/g_{DQO} d): Rapidez específica de utilización del sustrato.

θ (d): Tiempo de retención hidráulico.

Teniendo finalmente la producción de metano.

$$B = B_0 \left(1 - \frac{S}{S_0}\right)$$



Donde.

B_0 (m^3/kg_{SV}): Producción última de metano.

B (m^3/kg_{SV}): Metano producido por unidad de SV adicionado al biodigestor.

Cálculo de la producción de biogás de la planta.

Para realizar el cálculo de la producción de biogás se va a variar el tiempo de retención hidráulico (θ) de 14 a 30 días que son valores típicos para la DA de FORSU en sistemas húmedos de una etapa a una temperatura mesófila de 45 °C (Duran, 2014).

El valor de las cinéticas de crecimiento y de consumo del sustrato se muestra en la tabla 19.

Tabla 19. Parámetros de diseño en sistemas anaerobios

Parámetro	Unidades	Valor típico
Coefficiente de producción celular; Y.	gSSV/gDQO	0.08
Coefficiente de decaimiento endógeno; Kd.	d-1	0.03
Constante de rapidez media; Ks. Temperatura 45 °C.	mg/l	27.60
Rapidez específica de utilización del sustrato; KMAX.	gDQO/gDQO d	25

Fuente: Tomada de Durán et al.(2014)

Se calcula la concentración de sólidos en el afluente del biodigestor (S_0) que, recordando, se eligió que fuera del 7%.

$$S_0 = \frac{ST_{\text{FOR SU en gramos}}}{\text{Litros de agua}}$$

$$S_0 = \frac{14,248,609.89}{212,865,497.08}$$



$$S_0 = 0.06693 \frac{g}{l} = 66.94 \frac{mg}{l}$$

Teniendo una concentración de ST en el afluente del biodigestor es de 66.94 mg/l es decir 7%, una producción ultima de metano $B_0 = 0.369 \text{ m}^3/\text{kg}_{\text{SV}}$ y aplicando las ecuaciones. Se tiene la producción de biogás de la planta como se muestra en la tabla 20.

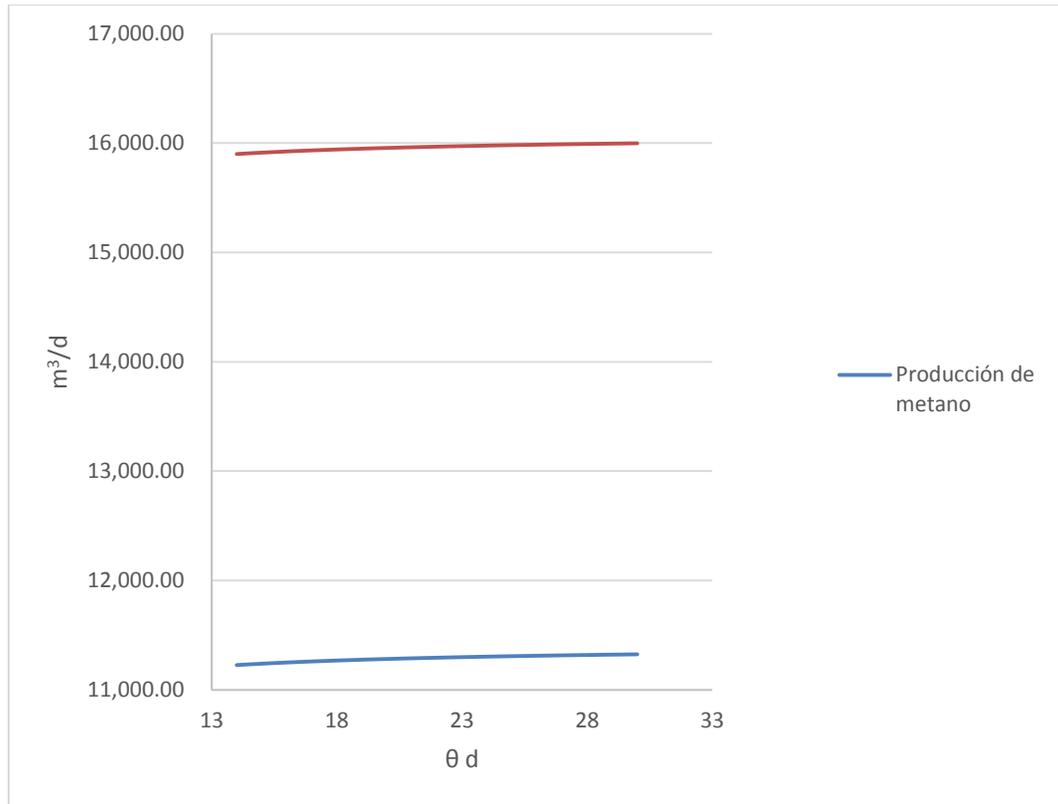
Tabla 20. Producción de metano y biogás

θ d	S mg/l	B m³/kg	QCH₄ m³/d	Qbiogás m³/d
14	1.474	0.361	11,226.93	15,900.36
15	1.402	0.361	11,239.40	15,912.84
16	1.338	0.362	11,250.27	15,923.70
17	1.283	0.362	11,259.82	15,933.25
18	1.233	0.362	11,268.27	15,941.70
19	1.189	0.362	11,275.81	15,949.24
20	1.150	0.363	11,282.58	15,956.01
21	1.114	0.363	11,288.69	15,962.12
22	1.082	0.363	11,294.22	15,967.66
23	1.053	0.363	11,299.27	15,972.70
24	1.026	0.363	11,303.89	15,977.32
25	1.001	0.363	11,308.13	15,981.56
26	0.978	0.364	11,312.03	15,985.47
27	0.957	0.364	11,315.65	15,989.08
28	0.938	0.364	11,318.99	15,992.43
29	0.920	0.364	11,322.11	15,995.54
30	0.903	0.364	11,325.01	15,998.44

Fuente: Elaboración propia

El contenido de metano es de 71% del contenido total del biogás, teniendo una producción lineal conforme el pasar de los días como se observa en la ilustración 20.

Ilustración 20. Producción de metano y biogás



Fuente: Elaboración propia



3.6. Biodigestor

El biodigestor es el equipo principal de una planta de digestión anaerobia, ya que en el ocurre el proceso de degradación de la materia orgánica, pueden tener distintas geometrías, pero la mayoría de biodigestores de sistemas húmedos presentan una geometría cilíndrica vertical (Durán, 2014).

El método más adecuado para diseñar el biodigestor es mediante la carga volumétrica, ya que controlar este parámetro permitirá estabilidad en el biodigestor; sin embargo, el método más usado para el cálculo del volumen de un biodigestor es utilizando el tiempo de retención hidráulico. En ocasiones si el volumen es similar es conveniente promediarlo para obtener el volumen final (Durán et al., 2014).

Volumen del biodigestor por tiempo de retención hidráulico

El volumen se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$V_{\theta} = (Q_D)(\theta)(fs)$$

Donde.

V_{θ} (m^3): Volumen del biodigestor.

Q_D (m^3/d): Materia prima de alimentación para el diseño.

θ (d): Tiempo de retención hidráulico.

fs : Factor de sobredimensionamiento para el almacenamiento de biogás.

Del volumen total del biodigestor el 75% debe ser ocupado por la materia prima de alimentación, por lo que el 25% restante será ocupado por el biogás generado. El factor de sobredimensionamiento más empleado es 1.25.

Aplicando la ecuación y variando el tiempo de retención hidráulico se tienen los siguientes resultados para el volumen del biodigestor. Ver tabla 21.



Tabla 21, Volumen del biodigestor por tiempo de retención hidráulico

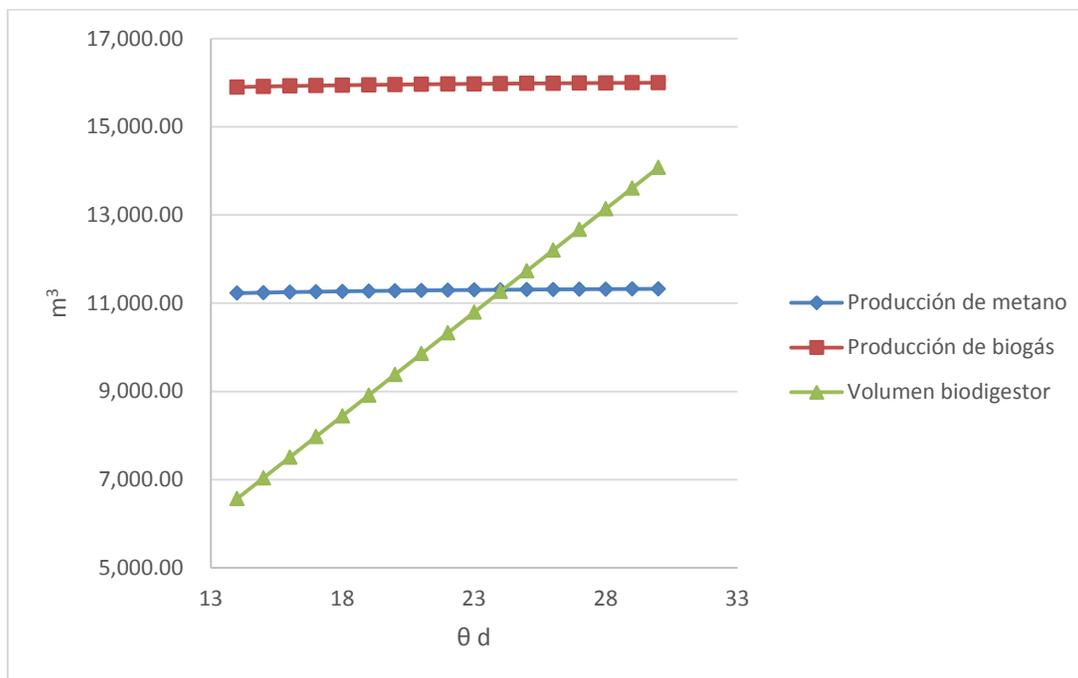
$$Q_D = 375.44 \text{ m}^3/\text{d}$$

θ d	$V\theta \text{ m}^3$
14	6,570.18
15	7,039.47
16	7,508.77
17	7,978.07
18	8,447.37
19	8,916.67
20	9,385.96
21	9,855.26
22	10,324.56
23	10,793.86
24	11,263.16
25	11,732.46
26	12,201.75
27	12,671.05
28	13,140.35
29	13,609.65
30	14,078.95

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la ilustración 21 el volumen del biodigestor crece de manera más acelerada con respecto a la producción de metano y biogás, por lo que un pequeño aumento en la producción de biogás representará un gran aumento en el volumen del biodigestor y por lo tanto en su costo.

Ilustración 21. Comparación del volumen del biodigestor con la producción de metano y biogás según el tiempo de retención hidráulico.



Fuente: Elaboración propia

Volumen del biodigestor por carga orgánica volumétrica

De acuerdo con este método el volumen del biodigestor se calcula con la siguiente ecuación.

$$V_{COV} = \frac{Q_D SV}{COV}$$

Donde.

V_{COV} (m³): Volumen del biodigestor.

Q_D (m³/d): Materia prima de alimentación para el diseño.

SV (kg_{SV}/m³): Cantidad de sólidos volátiles.

COV (kg_{SV}/m³d): Carga orgánica volumétrica.



La cantidad de SV se calcula multiplicando los SV_{FORSU} por el peso volumétrico de la misma.

$$SV = SV_{FORSU} \gamma_{FORSU}$$

$$SV = (0.149)(778)$$

$$SV = 115.65 \frac{kg_{SV}}{m^3}$$

Teniendo la cantidad de sólidos volátiles, el gasto de diseño $Q_D = 375.44 \text{ m}^3/\text{d}$ y que la carga orgánica volumétrica para las condiciones del sistema (DA húmeda de una etapa, temperatura de operación $45 \text{ }^\circ\text{C}$ con FORSU como materia de alimentación) tiene un valor $COV = 4 \text{ kg}_{SV}/\text{m}^3\text{d}$ (Duran et al., 2014).

Aplicando la ecuación se tiene.

$$V_{COV} = \frac{(375.44)(115.65)}{4}$$

$$V_{COV} = 10,855.27 \text{ m}^3$$

Promediando con el volumen obtenido por el tiempo de retención hidráulico se tiene.

$$V_B = \frac{V_\theta + V_{COV}}{2}$$

Donde.

$V_B \text{ (m}^3\text{)}$: Volumen final del biodigestor.

$$V_B = \frac{10,793.86 + 10,855.27}{2}$$

$$V_B = 10,824.57 \text{ m}^3$$

Ajustando el tiempo de retención hidráulico.

$$\theta = \frac{V_B}{Q_D f s}$$



$$\theta = \frac{10,824.57}{(375.44)(1.25)}$$

$$\theta = 23.13 \text{ d}$$

Para el tiempo de retención hidráulico $\theta = 23.13$ días y aplicando las ecuaciones obtendremos la producción de biogás y metano para la cual estará diseñado el biodigestor como se muestra en la tabla 22.

Tabla 22. Parámetros de diseño del biodigestor

Parámetro	θ (d)	COV (kgSV/ m^3d)	VB (m^3)	QCH4 (m^3/d)	Qbiogás (m^3/d)
Valor	23.13	4	10,824.57	11,299.89	15,973.33

Fuente: Elaboración propia

Dimensionamiento del biodigestor

La mayoría de los biodigestores completamente mezclados presentan una geometría cilíndrica ya sea vertical u horizontal, debido al volumen del biodigestor se va a proponer una altura $h = 15$ m con un diámetro ajustable para una relación de 2:1 con respecto a su altura.

$$V_B = \pi r^2 h$$

Donde:

V_B (m^3): Volumen del biodigestor.

r (m): Radio del biodigestor.

h (m): Altura del biodigestor.

Considerando una altura $h = 15$ m; y despejando r se tienen las siguientes dimensiones para su diseño.

$$r = \sqrt{\frac{10,824.57}{\pi 15}}$$



$$r = 15.16 \text{ m}$$

$$d = 30.31 \text{ m}$$

El biodigestor tendrá una geometría de cilindro horizontal con un volumen de 10,824.57 m³; un diámetro de 30.31 m y una altura de 15 m.

Materiales de fabricación

El material de construcción para el biodigestor debe ser impermeable, y debe soportar cualquier tipo de fuerza externa o interna durante su funcionamiento para evitar fugas. Los materiales dependen de la ubicación geográfica, hidrológica, condiciones locales y disponibilidad de los materiales.

El biodigestor se va a construir de acero que cuenta con las siguientes ventajas y desventajas mostradas en la tabla 23.

Tabla 23. Ventajas y desventajas del acero en biodigestores

Material	Ventajas	Desventajas
Acero	Puede utilizarse acero inoxidable. Produce gas a flujo constante. A prueba de fugas. Resistencia a la corrosión.	Gran peso. Podría requerir recubrimiento.

Fuente: Tomado de Durán (2014).

En general la construcción de este tipo de biodigestores fácil, rápida y segura.

Calentamiento del sustrato

El sistema de calentamiento en las paredes internas del biodigestor es el más utilizado en plantas a gran escala. Para alcanzar la temperatura mesofílica se utiliza agua caliente producto del calentamiento del motor o de las calderas.



Agitación del sustrato

El mezclado del sustrato homogeniza la materia prima, incrementa la cinética de crecimiento en el biodigestor, y permite un calentamiento homogéneo.

Dentro del biodigestor existe un mínimo mezclado llamado pasivo, sin embargo, es necesario implementar un mezclado activo utilizando equipo mecánico, hidráulico o neumático.

En la mayoría de los casos se opta por un agitador sumergido, que en biodigestores donde el diámetro es mayor que la altura, se instalan a través de la pared. Los mezcladores tienen motores están instalados de 2.5 a 25 kW, poseen un agitador de propela con dos o tres asas que va montado en el eje del motor (Durán et al., 2014).



3.7. Almacenamiento del digestato

El digestato es un subproducto de la digestión anaerobia, que suele ser rico en nutrientes para el desarrollo de cultivos agropecuarios (Durán et al., 2014).

El sustrato digerido debe transportarse hasta un sitio de disposición donde será almacenado temporalmente. Si el tiempo de retención hidráulico es cortó, el volumen del tanque para el digestato será elevado, debido a la baja degradación biológica y por lo tanto los costos de construcción y operación aumentaran (Durán et al., 2014).

La capacidad del depósito se calcula con la siguiente expresión.

$$V_{AD} = (Q_d)(t)$$

Donde.

V_{AD} (m^3): Volumen del tanque.

Q_d (m^3/d): Flujo del digestato.

t (d): Tiempo de operación del biodigestor.

Se calcula el flujo del digestato, debido a que es un CSTR sin recirculación de lodos, no existe almacenamiento y se efectuó un balance de masa se obtiene de la siguiente manera.

$$SF_{QD} = (M_{QD})(SF_{FORSU})$$

$$SF_{QD} = (348,798.60)(0.034)$$

$$SF_{QD} = 11,999.80 \frac{kg}{d}$$

Donde:

SF_{FORSU} (kg_{ST}/kg_{FORSU}): Contenido de SF con una humedad del 93%.

SF_{QD} (kg_{ST}/d): Contenido de ST en la entrada del sistema.

A los SF se le suma la cantidad de SV que no fueron transformados en biogás.

$$SV_{DIGESTATO} = 0.40(SF_{QD})$$



$$SV_{DIGESTATO} = 20,740.39 \frac{kg}{d}$$

$$SD = SF_{QD} + SV_{DIGESTATO}$$

$$SD = 11,999.80 + 20,740.39$$

$$SD = 32,740.19 \frac{kg}{d}$$

Donde:

SD (kg_{ST}/d): Contenido de sólidos con una humedad del 93% en el digestato.

Teniendo los kg/d de sólidos en el digestato se obtiene el flujo dividiendo entre el peso volumétrico de la FORSU y el agua.

$$Y_{FORSU+AGUA} = [(778)(32\%)] + [(1000)(68\%)]$$

$$Y_{FORSU+AGUA} = 929.04 \frac{kg}{m^3}$$

$$Q_d = \frac{SD}{Y_{FORSU+AGUA}}$$

$$Q_d = \frac{32,740.19}{929.04}$$

$$Q_d = 35.24 \frac{m^3}{d}$$

Finalmente se sustituye en la ecuación y teniendo un tiempo de operación igual al tiempo de retención hidráulico se obtiene el volumen del tanque para el digestato.

$$V_{AD} = (35.24)(23.13)$$

$$V_{AD} = 815.12 m^3$$

Los tanques para el digestato suelen ser rectangulares herméticos y construidos de concreto, sus dimensiones se calculan según el sitio y el posterior uso del digestato.

Se proponen las siguientes dimensiones.



$l = 15$ m; largo del tanque.

$a = 10$ m; ancho del tanque.

Se calcula la altura del tanque.

$$h = \frac{V_{AD}}{(l)(a)}$$

$$h = \frac{815.12}{(15)(10)}$$

$$h = 5.43 \text{ m}$$

El tanque del digestato tendrá una altura de 5.43 m, y estará construido de concreto.



3.8. Almacenamiento del biogás

Se va a utilizar un sistema de membrana con una presión de 10-30 mbar. Un volumen para una producción de biogás de 15,973.33 m³/d, donde generalmente se almacena el 40% de la producción diaria; por lo tanto, el volumen de almacenamiento será de 6,389.33 m³ (Chengdu Amoco Architecture Technology, 2017 y Durán et al.,2014).

Configuración.

- Se divide en membrana interior y exterior.
- Control eléctrico y sistema de visualización.
- Sistema de operación de presión.
- Sistema de detección de presión y el volumen.
- Sistema de protección de seguridad.
- Diseño de base
- Piezas y accesorios de tuberías de conexión de acero etc.



3.9. Limpieza del biogás

El biogás producido contiene otros compuestos como CO_2 , H_2S , agua entre otros productos de la DA, por lo que es importante su limpieza. Para que funcione como combustible vehicular debe poseer un porcentaje mayor del 95% de metano en la mezcla.

Se colocará una planta la cual permita la eliminación de los compuestos anteriormente mencionados y la inyección del biogás a la red de gas natural para su posterior utilización en la automoción.

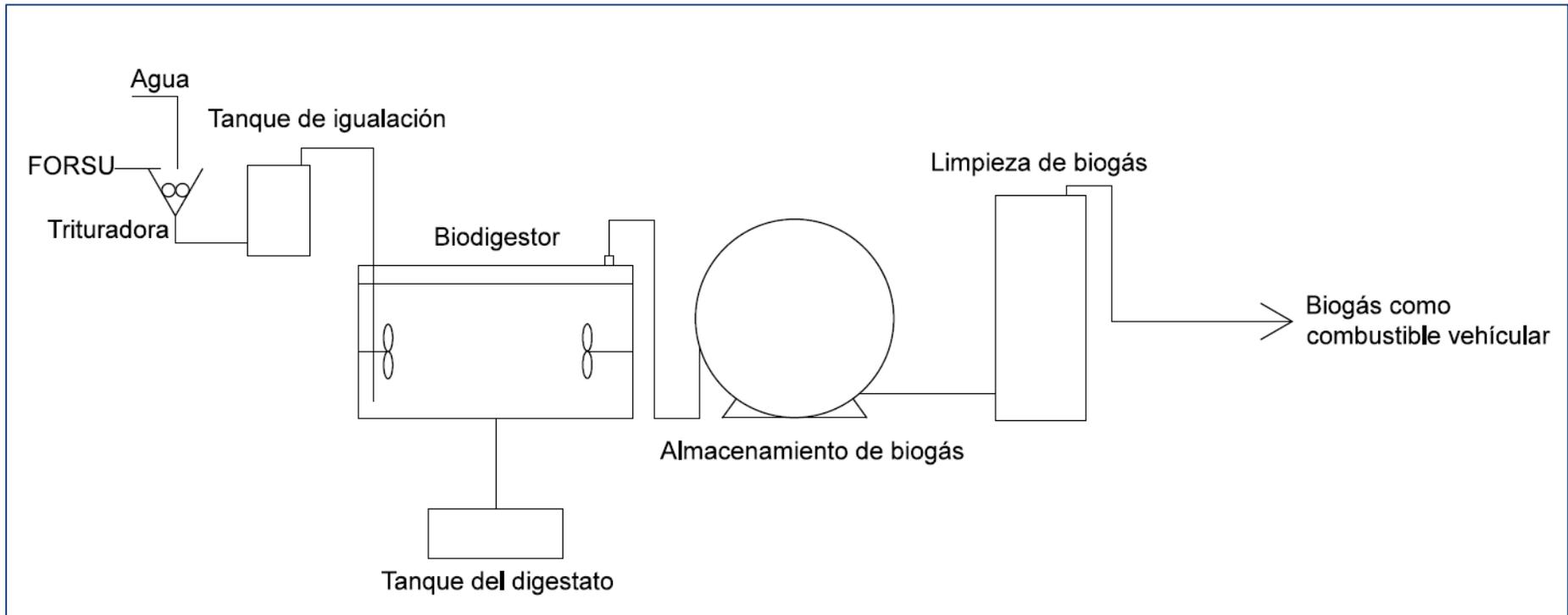
La técnica que se utiliza es la absorción química, que garantiza un acondicionamiento del biogás a bajas presiones.

Mediante esta técnica se elimina en gran medida el CO_2 y H_2S contenido en el biogás, permitiendo elevar el nivel de CH_4 hasta valores cercanos al 97%.

Garantiza un gas con un poder calorífico elevado y constante, que puede ser utilizado como combustible para la automoción o su inyección en la red de gas natural (Kaifeng Huanghe Air Separation Group, 2017).

Por lo tanto, después de este proceso y con una limpieza del 98% se obtendrá un flujo de biogás de $11,393.36 \text{ m}^3/\text{d}$.

Esquema 1. Planta de Digestión Anaerobia



Esquema de la planta de digestión anaerobia donde se muestra el flujo de tratamiento que recibe la materia orgánica desde su trituración y mezclado, hasta la generación de biogás purificado para su uso en vehículos. Elaboración propia.



4. EVALUACIÓN DEL PROYECTO

Tipo de proyecto

“Podemos definir como proyecto la asignación de recursos para la producción de determinados bienes y servicios. Así pues, son proyectos una industria nueva, una ampliación de una empresa ya establecida, la instalación de una planta adicional y, en general, toda actividad que signifique la creación de algo o el cambio de lo ya establecido” (Hinojosa, 2005).

Tomando como referencia los lineamientos para la elaboración y presentación de los análisis costo - beneficio de los programas y proyectos de inversión para la Administración Pública Federal, el proyecto para la generación de biogás como combustible alternativo tiene que ser evaluado a través del análisis costo beneficio debido a que:

“Es una evaluación socioeconómica del programa o proyecto a nivel de prefactibilidad, y consistirá en determinar la conveniencia de un programa o proyecto de inversión mediante la valoración en términos monetarios de los costos y beneficios asociados directa e indirectamente, incluyendo externalidades, a la ejecución y operación de dicho programa o proyecto de inversión” (Hinojosa, 2005).

4.1. Definición

El costo beneficio es un proceso cuyo fin es identificar el grado de eficacia y eficiencia de los recursos utilizados para alcanzar los objetivos planteados, permitiendo la determinación de desviaciones que pueden surgir y la opción de medidas correctivas que garantizan el cumplimiento de las metas que se presupuestaron.



4.2. Principales indicadores económicos

Se puede observar a la evaluación económica como un mecanismo que permite calcular los beneficios monetarios en los que incurre el proyecto en el tiempo cero contra el capital invertido actualizado a una tasa de descuento fija, con lo cual podemos obtener el índice que nos permita medir la rentabilidad del proyecto.

Para la evaluación económica es importante determinar las ventajas que la implementación del biogás como combustible vehicular ofrece en comparativa con la utilización de los combustibles fósiles, considerando los costos de producción, distribución y operación vehicular, para lograr lo anterior, la evaluación socioeconómica precisa la comparación de dos escenarios, uno con proyecto y otro sin proyecto.

Con la finalidad de facilitar el análisis a desarrollar, se agruparán los costos en dos grupos directos e indirectos, los primeros hacen referencia a la situación financiera, valor y vida del proyecto, los segundos a criterios intangibles sociales y ambientales.

Adicionalmente es necesario describir el método empleado en el análisis de la evaluación económica. La rentabilidad de la implementación del biogás como combustible alternativo es recomendable medirla con dos indicadores el Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

El criterio del VPN permite “determinar la equivalencia en el tiempo cero de los flujos de efectivo futuros que genera un proyecto y comparar esta equivalencia con el desembolso inicial” (Coss, 2005), es decir, coadyuva a que se cuente con argumentos que permitan aceptar o no un proyecto a partir de los resultados obtenidos, si el VPN es mayor o igual que cero el proyecto puede aceptarse.



$$VPN = \sum_{t=0}^{t=n} \frac{B_t - C_t}{(1 + r)^t}$$

Donde

VPN: Valor Presente Neto

B_t : Beneficios totales en el año t

C_t : Costos totales en el año t

$B_t - C_t$: Flujo neto en el año t

n: Número de años en el horizonte de evaluación

r: Tasa de recuperación mínima atractiva

t: año del calendario, en donde el año 0 indica el inicio de las erogaciones

Mundialmente el VPN es muy empleado debido a que representa una forma fácil de medir la factibilidad de un proyecto; asimismo, permite transformar a pesos actuales los ingresos y los egresos que se pretenden a futuro, para tal efecto es indispensable que el tiempo de evaluación sea igual para las alternativas que se plantean. Adicionalmente se considera una tasa de interés superior a la tasa de interés de oportunidad, con la finalidad de contar con un rango de seguridad para factores de riesgos que puedan surgir como inflación o desviaciones que no se tengan contempladas.

Ahora bien, la Tasa Interna de Retorno “de un proyecto de inversión es la tasa de descuento (r), que hace que el valor actual de los flujos de beneficios (positivos) sea igual al valor actual de los flujos de inversión negativos” (Fernández Espinoza, 2007), es decir, que la TIR es la resta de todos los movimientos relacionados al proyecto a un valor igual a cero.

$$VPN = \sum_{t=0}^{t=n} \frac{B_t - C_t}{(1 + TIR)^t} = 0$$

Donde

TIR: Tasa Interna de Retorno

B_t : Beneficios totales en el año t

C_t : Costos totales en el año t



$B_t - C_t$: Flujo neto en el año t

n: Número de años en el horizonte de evaluación

t: año del calendario, en donde el año 0 indica el inicio de la erogación

Es frecuente, que este criterio de evaluación para proyectos de inversión sea muy socorrido debido a que calcula la tasa de descuento para obtener el Valor Presente Neto de los flujos de efectivo del proyecto.

La evaluación económica permite decidir si es factible llevar a cabo el proyecto o no; sin embargo, no es el único factor que se debe de considerar para la toma de decisiones, es por ésta razón que resulta fundamental que se analice el factor social y el factor ambiental.

Relación Beneficio / Costo

Finalmente se realiza el cálculo de la relación beneficio / costo, “teniendo presente que las distintas corrientes de beneficios y costos deben ser actualizados para hacerse comprobables, su relación será igual al cociente del valor de los beneficios sobre el valor actual de los costos” (Cohen E, 1996).

La relación de B/C son los flujos descontados de los beneficios o ingresos totales el proyecto, sobre los flujos descontados de los costos o egresos totales del proyecto.

$$\frac{B}{C} = \frac{\text{Beneficios}}{\text{Costos}}$$

4.3. Evaluación de intangibles

Es importante analizar tanto el factor social como el ambiental; se tiene que identificar el flujo de los recursos utilizados y generados con la ejecución del proyecto con la finalidad de determinar si la implementación del biogás como combustible alternativo traerá consigo beneficios mayores a los que se obtienen con el uso del combustible fósil.



En este sentido, la evaluación social permite identificar los costos y beneficios probables con la ejecución del proyecto, considerando los efectos indirectos e intangibles que cada población presente en particular. Por ejemplo, los accidentes de tránsito, obstrucción de vialidades entre otros son problemas que pueden surgir con la ejecución del proyecto y pertenecen a daños directos, mientras que los malos olores, afectación visual del entorno en donde se desarrolle el proyecto son efectos intangibles.

Para poder efectuar la evaluación del costo beneficio desde el aspecto social y ambiental, a continuación, se señalan los beneficios en los que se impactará de manera directa:

- a) Mejoramiento de la imagen urbana: Disminución de la contaminación ambiental y de la fauna nociva en los sitios de disposición final de los RSU.
- b) Mitigación del efecto invernadero: Disminución de emisiones de gases que incrementan la problemática del efecto invernadero.
- c) Mejoramiento de la calidad del aire: Reducción de enfermedades respiratorias y cancerígenas causadas por los gases generados por la quema de gasolina.



4.4. Caracterización de la zona del proyecto

Como se mencionó anteriormente, la planta de biogás está ubicada en la delegación de Milpa Alta en la Ciudad de México, esta colinda al norte con las delegaciones de Xochimilco y Tláhuac; al este con la delegación de Tláhuac y el Estado de México; al sur con el estado de Morelos; al oeste con el estado de Morelos y las delegaciones Tlalpan y Xochimilco.

De acuerdo con el Catálogo de Localidades de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) publicado en 2015, la delegación de Milpa Alta para el 2010 contaba con una población total de 130,582 habitantes, de los cuales el 50.84% eran mujeres y 49.16% hombres, de los cuales 50,475 son menores de 19 años; en una superficie de 299.15 Km².

El grupo de edades con mayor cantidad de habitantes oscilaba entre el de (5 a 9 años) con 12,781 al de (25 a 29 años) con 10,592, este segmento de la población tiene un total de habitantes 60,799 de lo cual se puede identificar que cuentan con un alto índice población propensa a contraer enfermedades cardiorrespiratorias; sin embargo, el Censo de Población y Vivienda 2010 ubicó a esta delegación en el último lugar comparativa de población entre delegaciones de la Ciudad de México, con 1.48% respecto a las demás.

Según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía en el 2010, entre las principales actividades económicas que se desarrollan en la delegación destaca el sector del comercio al por menor ocupando el primer lugar con 11,756 empleados, seguido por la agricultura, ganadería, aprovechamiento forestal, pesca y caza con 8,012 empleados. El porcentaje de población de 12 años y más económicamente activa es del 56% del total de los habitantes reportados, esta cifra es equivalente a 73,126.



Con la puesta en marcha y operación de la planta de biogás se abrirían 10 vacantes con el perfil técnico para que realicen funciones de operadores de la misma, además se considera que el abanico de ocupación podría llegar a ser amplio derivado de la infraestructura a construir.

Antecedentes de plantas para la producción en la zona

Actualmente en la delegación Milpa Alta, existe la primera *“Planta Piloto del Sistema para el Tratamiento Integral en sitio de Residuos Orgánicos Mbio”* que fue inaugurada en el Centro de Acopio y Comercialización de Nopal-Verdura (CANV), la cual tiene como objetivo procesar 100 ton de residuos orgánicos mensuales. Dicha planta espera producir 240 kilowatts / hora al día que equivaldrían a prender 9,600 focos. Sin embargo, el objetivo de la planta es distinto al de la proyectada en este trabajo, que es la de obtener biogás como combustible vehicular.

La población objetivo a la que se busca cubrir con el proyecto es a los propietarios de vehículos particulares y/o del transporte público y que como prerrequisito su unidad debe contar con un motor modificado para que pueda hacer la combustión interna y producir la energía para generar el movimiento, va dirigido preferentemente aquellos cuyo consumo de gasolina fósil sea magna.



4.5. Consideraciones de la evaluación del proyecto

Como se mencionó anteriormente, se deben de plantear dos escenarios; el primero hace referencia a las condiciones actuales, sin la operación de la planta de biogás y manteniendo a la gasolina como elemento para dicho análisis, y el segundo es un escenario supuesto, en el que dicha planta ya cuente con la operación, distribución y utilización de biogás en vehículos terrestres.

4.5.1. Análisis de emisiones generadas

Para el análisis de los costos y los beneficios que traerá consigo la ejecución y operación del proyecto para la utilización de biogás como combustible alternativo, es fundamental realizar un comparativo con el combustible comúnmente empleado, para tal fin, a continuación, se presenta en la tabla 24 la equivalencia energética de diferentes fuentes de energía con respecto al biogás tratado y sin tratar (Durán, 2014).

Tabla 24. Equivalencia energética

Fuente de energía	Equivalente a 1 m ³ de biogás sin tratar	Equivalente a 1 m ³ de biogás purificado	Valor calorífico
Gasolina	0.53 – 0.73 L	1.10 L	45,417 kJ/kg*
Gas LP	0.48 – 0.65 L	1.00 L	97,260 kJ/m ³
Gas natural	0.45 – 0.61 m ³	0.93 m ³	35,441 kJ/m ³

Fuente: Durán et al. (2014)

*Biogás (65%CH₄, 35% CO₂)

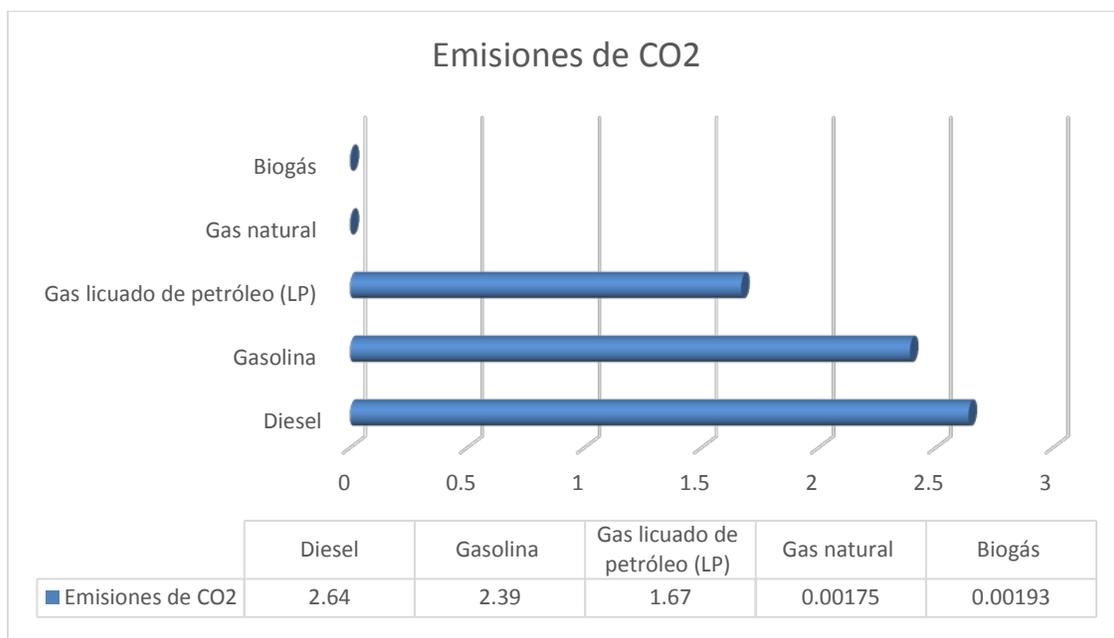
Adicionalmente, se presenta la tabla 25 y la ilustración 22 donde se reflejan los kilogramos de dióxido de carbono por litro que emiten los combustibles más empleados; es importante destacar las cantidades obtenidas por concepto de reducción de este compuesto y como impactaría en el entorno que las emisiones de CO₂ se disminuyeran (Durán, 2014).

Tabla 25. Emisiones de CO₂ de diferentes combustibles

Combustible	Emisiones de CO ₂
Diesel	2.64 kg _{co2} /L
Gasolina	2.39 kg _{co2} /L
Gas licuado de petróleo (LP)	1.67 kg _{co2} /L
Gas natural	0.00175 kg _{co2} /L
Biogás	0.00193 kg _{co2} /L

Fuente: Durán et al. (2014)

Ilustración 22. Emisiones de CO₂ de diferentes combustibles



Fuente: elaboración propia a partir del análisis de emisiones de CO₂

Enseguida se presenta en la tabla 26 el cálculo de las emisiones que se generan de CO₂ teniendo como marco de referencia los litros de combustible que en promedio pueden almacenar los vehículos, así como la parametrización de emisiones respecto al volumen de la planta.



Tabla 26. Emisiones de CO₂ totales por vehículo y por los que se cubrirían con la planta

Combustible	Emisiones de CO₂ por litro	Emisiones por vehículo (kgCO₂)	**Emisiones de CO₂ en kg por vehículo en un mes
Diesel	2.64	132	528
Gasolina	2.39	119.5	478
Gas licuado de petróleo (LP)	1.67	83.5	334
Gas natural	0.00175	0.0875	0.35
Biogás	0.00193	0.0965	0.39

Fuente: elaboración propia a partir de las emisiones de CO₂

*Considerando que 50 litros por tanque

**Considerando 60 vehículos diarios que se pueden abastecer

La emisión de CO₂ que resulta de la quema de biogás como combustible de vehículos producirá 478 kilogramos de dióxido de carbono por cada 200 litros de gas quemado lo cual representa un 99.92% menor al que se produce con la quema de biogás con este mismo volumen de gasolina que es de 0.39 kilogramos de CO₂.



4.5.2. Análisis del costo de la gasolina y del biogás

Complementariamente a la información previa, se tiene el costo de los combustibles en el tercer trimestre del año 2017, lo que permitirá el desarrollo del análisis costo beneficio, en la tabla 27 se presenta. (MILENIO, S.A. DE C.V., 2017)

Tabla 27. Precio de los principales combustibles

Combustible	\$
Magna	\$16.21
Premium	\$17.93
Diesel	\$17.02
Biogás*	\$5.00

Fuente: Milenio Noticias (2017).

*Valor estimado a partir del costo de producción para los primeros 5 años de operación.

Si se considera el precio de la gasolina magna para este análisis y se hace un comparativo con el costo por del biogás por cada vehículo, se tienen los dos escenarios, en la tabla 28 y en la ilustración 23 se muestran los resultados.

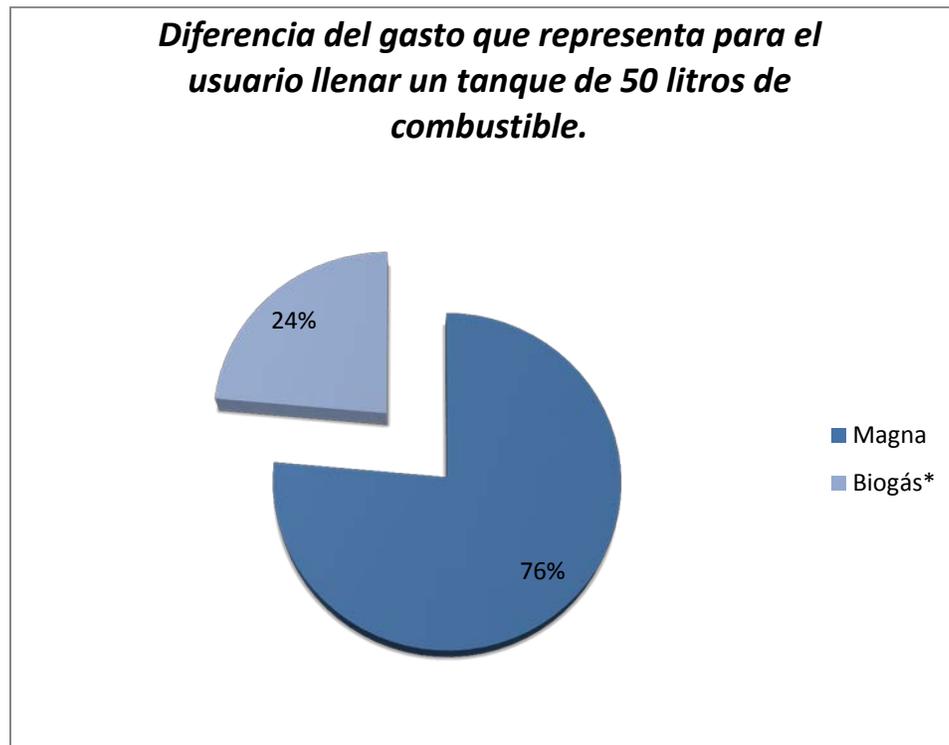
Tabla 28. Comparativo entre gasolina magna y biogás

Combustible	Precio por litro	Precio del tanque lleno	Precio mensual para el abasto de combustible
Magna	\$16.21	\$810.50	\$3,242.00
Biogás*	\$5.00	\$250.00	\$1,000.00

Fuente: Elaboración propia a partir del costo de gasolina magna de Milenio noticias.

*Valor estimado a partir del costo de producción.

Ilustración 23. Porcentaje comparativo de combustibles



Fuente: Elaboración propia a partir del análisis comparativo entre costos de combustibles.

4.5.3. Análisis social: Salud

Aunque el análisis costo beneficio (ACB) es relativamente sencillo, se presentan dificultades prácticas que limitan la aplicación del mismo, como la asignación de valores medibles a los activos ambientales, recursos culturales, humanos y sociales u oportunidades de conservación, para los cuales no existen mercados.

Como los beneficios ambientales y sociales no tienen un valor establecido en el mercado es necesario identificar y determinar su costo; para tal fin en el análisis se utilizará el método de costes evitados o inducidos para realizar la estimación y llevar a cabo el método costo beneficio.



Para lograr lo anterior se definen los beneficios ambientales debidos a la mejora en la erosión del suelo y de agua, y los beneficios de reducir la contaminación del aire en la Ciudad de México, usando información de funciones dosis - respuesta y costos de tratamiento médico.

“Dado que existen bienes ambientales que están relacionados con bienes que si tienen mercado. Se presenta el caso en el que el bien ambiental forma parte de la función de producción del bien o servicio intercambiable en el mercado, con el insumo. Otra situación es cuando el bien ambiental entra a formar parte, junto con otros bienes privados de la función de producción de utilidad de una persona o familia” (Azqueta Oyarzun , 1994).

Los cambios que se producen en el ambiente se ven reflejados en los gastos de las familias como son los gastos médicos generados por las enfermedades causadas derivadas de la contaminación ambiental.

De acuerdo con especialistas ambientales la contaminación de la Ciudad de México representa un factor de riesgo, señalaron que en el año 2010 se registraron 20, 500 muertes prematuras relacionadas con la contaminación; adicionalmente, el Sistema Nacional de Salud apunta que las enfermedades respiratorias corresponden a la tercera causa de muerte entre los recién nacidos y niños menores a cuatro años de edad.

El Instituto Mexicano de la Competitividad (Imco) desarrolló el estudio Calculadora del Aire en donde reportan los gastos en salud que se estimaron en la Ciudad de México en el periodo 2012 fueron equivalentes a \$ 214, 001, 868 millones de pesos; de los cuales, se dieron 1,723 muertes prematuras, 103,629 hospitalizaciones y 6, 059, 118 consultas (Instituto Mexicano para la Competitividad A.C., 2013); lo anterior, es resultado de considerar lo que se muestra en la tabla 29.



Tabla 29. Consideraciones para el cálculo de los gastos de salud

Concepto	Valor
Población que cuenta con algún tipo de seguridad social	46%
Costo de hospitalización el IMSS por día	\$3,867 a \$5,156
Días promedio que dura una infección respiratoria	4.96 días
Días promedio por enfermedad cardiovascular	4.52 días
Costo por consulta con un médico familiar	\$505
Pérdida en productividad por hospitalizaciones y consultas	\$164*
Familias con dos miembros trabajadores	39%
Productividad por muertes prematuras	50 años**
Salario anual promedio	\$59,040*

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Instituto Mexicano de la Competitividad (Imco)

*Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo, cifras 2010.

**Años de vida productiva de 15 a 65 años de edad.



Las enfermedades causadas por la contaminación ambiental generada de la quema de combustibles fósiles por parte de las fuentes móviles consideran los datos de la OMS sobre mortalidad de 2012 y en las pruebas de que la exposición a la contaminación atmosférica supone un riesgo para la salud, dichas enfermedades que se engloban en el análisis se muestran en la tabla 30 (Organización Mundial de la Salud, 2012).

Tabla 30. Porcentaje de muertes por contaminación atmosférica

Muertes debidas a la contaminación atmosférica	
Enfermedad	Porcentaje
Cardiopatía isquémica	40%
Accidente cerebrovascular	40%
Neuropatía obstructiva crónica	11%
Cáncer de pulmón	6%
Infección aguda de las vías respiratorias inferiores en los niños	3%

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Organización Mundial de la Salud (2012)

Con base en lo anterior se considera que el costo a la salud por la quema de gasolina es de \$214,001,868 millones de pesos de manera anual; por lo tanto, esta cifra equivale a \$17,833,489.50 mil pesos de manera mensual. Con la implementación del biogás se espera que se mitigar esta cantidad en proporción al porcentaje establecido anteriormente que es del 99.92%, lo que dará como resultado \$14,266.80 mil pesos de gastos en salud producidos únicamente por la quema del biogás.



4.5.4. Análisis ambiental

La población en general se ve impactada directamente con la quema de combustibles fósiles debido a la contaminación atmosférica, Rodolfo Lacy Tamayo mencionó a la revista de Ingeniería Civil (IC) que los niveles de toxicidad de los contaminantes que provienen de los autos son muy altos, actualmente se distribuyen 27 millones de litros de gasolina y por cada litro surtido se evapora un gramo, por lo tanto se puede observar la cantidad de gasolina no quemada que contiene, entre otros, elementos cancerígenos como el benceno. Como consecuencia de lo anterior a diario respiramos vapores de estas emisiones de hidrocarburos; asimismo, el entorno está también expuesto a 300 compuestos orgánicos volátiles contaminantes de una manera crónica (Lacy Tamayo, 2016).

Otro impacto de la contaminación atmosférica es la acidificación del medio ambiente, la pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y del agua; provocando lluvia ácida y en consecuencia daños principalmente en las coníferas más sensibles y organismos de agua dulce.

Las afectaciones también impactan a los materiales; en este sentido se tienen los daños irreparables a monumentos de alto valor histórico – artísticos lo cual se observa como sedimentación de partículas en sus superficies y corrosión del acero, zinc, níquel, aluminio y componentes de cobre. Finalmente se tiene el incremento al efecto invernadero debido a la generación de CO₂ que incrementa la temperatura de la tierra ya que este elemento transporta la radiación solar.



Como resultado de la investigación anterior, se ponderan los costos que tendría cada uno de los problemas antes mencionados y se considera al 2012 como el año de evaluación; cabe mencionar, que los conceptos utilizados para este análisis representan una parte significativa de los factores que pueden verse alterados por la contaminación del ambiente a consecuencia de la quema de gasolina; sin embargo, a estos conceptos se pueden sumar otros que se consideren necesarios según el escenario que se presente, enseguida se muestran los resultados obtenidos en la tabla 31.

Tabla 31. Costo total ambiental

Concepto	Costo mensual (millones de pesos)
Costos totales por agotamiento y degradación ambiental (CTADA)	\$2,652,172.04 ¹
Factores ambientales	\$2,942,962.37 ²
Efecto invernadero	\$122,583.35 ³
Total	\$5,717,717,80

Fuente: Elaboración propia.

¹ Se considera \$986, 608,000.00 anual para el país de México (INEGI, 2012).

² El cálculo de esta cifra surge de la tabla 31

³ Se considera \$1, 471,000.00 anual en la CDMX (Greenpeace, 2010)



INEGI en 2012 reportó indicadores en miles de pesos para México referentes a los costos en los que incurre el país en materia de contaminación atmosférica causadas por las fuentes móviles, con la finalidad de obtener el valor que tiene cada concepto de manera mensual en la Ciudad de México se llevó a cabo el análisis que se muestra en la tabla 32 (INEGI, 2012).

Tabla 32. Factores ambientales

Concepto	Costo anual país (millones de pesos)	Costo anual CDMX (millones de pesos)	Costo mensual CDMX (millones de pesos)
Costo ambiental	\$ 723,444,000.00	\$ 23,336,903.23	\$ 1,944,741.94
Agotamiento de hidrocarburos	\$ 217,968,000.00	\$ 7,031,225.81	\$ 585,935.48
Degradación del suelo	\$ 74,564,000.00	\$ 2,405,290.32	\$ 200,440.86
Contaminación del agua	\$ 64,632,000.00	\$ 2 084,903.23	\$ 173,741.94
Disminución de recursos forestales	\$ 14,174,000.00	\$ 457,225.81	\$ 38,102.15
Total			\$ 2,942,962.37

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de INEGI (2012)

Finalmente, se aplica el porcentaje que se estableció anteriormente del 99.92% para obtener el costo mensual estimado para la Ciudad de México con la quema de biogás sustituyendo a la gasolina magna; en este sentido, se tiene que sería de \$4,574.20.



4.6. Evaluación financiera del proyecto

“El biogás no solamente es equiparable con los combustibles fósiles, si no también se pueden observar ventajas de este valioso combustible sobre otros biocombustibles, así como aceite de semilla de colza y biodiesel, entre otros. El biogás purificado es considerado por tener el más alto potencial como combustible vehicular comparado con otros biocombustibles” (Durán et al., 2014).

La inversión que se requiere para la puesta en marcha del proyecto de una planta de generación de biogás como combustible vehicular, se obtuvo mediante una estimación paramétrica de plantas de DA que manejan volúmenes de producción de biogás semejantes a la diseñada en este proyecto; por lo que el costo de inversión para la planta de DA será de \$128,145,985.77 ver anexo 1.

Asimismo, se consideró que la planta no operará al 100% de su capacidad desde el primer año, si no que tendrá un crecimiento a lo largo de los años de horizonte de evaluación, lo que repercutirá en la demanda de materia prima y de su producción de biogás, ver anexo 2.

Para el caso de la operación y mantenimiento de la planta se consideró que la operación de la planta es por 24 horas por día y 365 días por año, tomando como referencia una planta con producción de biogás similar; en la cual, el Ingeniero José Lucas Pérez Pardo del Centro de Investigación e Ingeniería obtuvo 17 650 mil euros anualmente y considerando que el tipo de cambio de Euro a Peso mexicano corresponde a \$23.10 se tiene el un costo de mantenimiento y operación anual de \$405,636.00 pesos mexicanos.

Por otra parte el cálculo del salario de la plantilla necesaria para la operación de la planta de biogás, se tomó como referencia la planta reportada por Centro de Investigación e Ingeniería, con ello se define que para que la planta opere requiere de 13 personas con los



siguientes perfiles: un gerente para la planta, dos supervisores y diez operadores; asimismo, se estableció el salario mínimo de \$80 pesos diarios para operadores, \$160 pesos diarios para el supervisor y \$240 pesos para el gerente, con jornadas laborales de seis días a la semana, otra de las consideraciones hechas fueron las prestaciones sociales y los aportes a la seguridad social, con lo cual se obtuvo lo que se presenta en la tabla 33.

Tabla 33. Salario de la plantilla para la operación de la planta de biogás

Prestaciones sociales		Operadores	Supervisor	Gerente
Salario mensual		\$ 2,240.00	\$ 3,840.00	\$5,760.00
Prima de servicios 8.33%		\$ 186.592	\$ 319.872	479.808
Cesantías 8.33%		\$ 186.592	\$ 319.872	479.808
Interés de cesantías 1.00%		\$ 22.400	\$ 38.400	57.600
Vacaciones 4.17%		\$ 93.408	\$ 160.128	240.192
Total		\$ 488.99	\$ 838.27	\$1,257.41
Aportes de seguridad social		Operadores	Supervisor	Gerente
Salud 8.5		\$ 190.400	\$ 326.400	\$ 479.808
Pensión 12%		\$ 268.800	\$ 460.800	\$ 479.808
Riesgos profesionales 0.5%		\$ 11.200	\$ 19.200	\$ 57.600
Suma		\$ 470.40	\$ 806.40	\$ 1,017.22
Personal	Cantidad	Salario semanal	Salario mensual	Salario anual
Gerente	1	\$ 1,440.00	\$ 5,760.00	\$ 69,120.00
Supervisor	2	\$ 960.00	\$ 7,680.00	\$ 92,160.00
Operadores	10	\$ 560.00	\$ 22,400.00	\$ 268,800.00
Prestaciones sociales	13	-	\$ 7,824.00	\$ 93,888.00
Aportes de seguridad	13	-	\$ 7,335.00	\$ 88,020.00
Total			\$ 50,999.00	\$ 611,988.00

Fuente: Elaboración propia considerando el salario mínimo y la Ley Federal del Trabajo.



Además, se considera un periodo de vida útil de la planta de DA de 20 años con una tasa de inversión fija del 20% anual; cabe señalar que se tomaron los factores actuales de precio del dólar y gasolina; adicionalmente, el valor estimado del biogás a partir del costo de producción en los primeros cinco años de operación de la planta; asimismo, el salario mínimo establecido por la Ley General del Trabajo (LGT), en el tercer trimestre del 2017 que fue de \$80.00 pesos diarios.

Con la finalidad de facilitar la visualización de los costos obtenidos en este análisis, a continuación, se presentan en la tabla 34.

Tabla 34. Resumen de los costos intangibles

MENSUAL	Factor Ambiental			Factor Social	
	**Emisiones de CO ₂ en kg por vehículo en un mes	Emisiones de CO ₂ en kg por flotilla de vehículos 2012 en un mes	Costo mensual	Precio mensual para el abasto de combustible	Costo mensual en el ámbito de salud
Gasolina Magna	478.00	\$ 2,206,101,928.00	\$5,717,718.00	\$ 3,242.00	\$ 17,833,489.00
Biogás	0.39	\$ 1,7821,497.00	\$4,618.00	\$ 1,000.00	\$ 14,402.00

Fuente: Elaboración propia a partir de las emisiones de CO₂ de Durán et al. (2014).



4.7. Proyecciones financieras

Se realiza una proyección financiera a 20 años que es el periodo de vida útil como se muestra en la tabla 35, donde se contemplan tres periodos de producción con una inversión inicial de \$128,145,985.77.

El primer periodo abarca del año 1 al 5 se tendrá una capacidad de operación del 50% tomando en cuenta la capacidad de abastecimiento y la demanda del combustible, lo cual repercutirá en el flujo de efectivo. En el segundo periodo que toma en cuenta del año 6 al 10 tendrá una capacidad estimada del 80% según el comportamiento de los mercados en este sector. Por último, el tercer periodo tomará en cuenta del año 11 al 20, contando con una producción del 100% de biocombustible ver anexo 2.



Tabla 35. Proyecciones financieras

Proyecciones Financieras (1:4)						
Año	0	1	2	3	4	5
Ventas	-	\$ 40,007,274.44	\$ 40,007,274.44	\$ 40,007,274.44	\$ 40,007,274.44	\$ 40,007,274.44
Costo de Ventas	-	\$ 4,949,233.91	\$ 4,949,233.91	\$ 4,949,233.91	\$ 4,949,233.91	\$ 4,949,233.91
Utilidad Bruta	-	\$ 35,058,040.54	\$ 35,058,040.54	\$ 35,058,040.54	\$ 35,058,040.54	\$ 35,058,040.54
Gastos de Operación	-	\$ 6,633,938.17	\$ 6,633,938.17	\$ 6,633,938.17	\$ 6,633,938.17	\$ 6,633,938.17
Utilidad de operación	-	\$ 28,424,102.37	\$ 28,424,102.37	\$ 28,424,102.37	\$ 28,424,102.37	\$ 28,424,102.37
Impuesto	-	30%	30%	30%	30%	30%
Utilidad después de impuesto	-	\$ 19,896,871.66	\$ 19,896,871.66	\$ 19,896,871.66	\$ 19,896,871.66	\$ 19,896,871.66
Partidas virtuales	-	\$ 6,228,302.17	\$ 6,228,302.17	\$ 6,228,302.17	\$ 6,228,302.17	\$ 6,228,302.17
Flujo de efectivo	-	\$ 26,125,173.83	\$ 26,125,173.83	\$ 26,125,173.83	\$ 26,125,173.83	\$ 26,125,173.83

Fuente: Elaboración propia.

Proyecciones Financieras (2:4)					
Año	6	7	8	9	10
Ventas	\$ 89,616,294.76	\$ 89,616,294.76	\$ 89,616,294.76	\$ 89,616,294.76	\$ 89,616,294.76
Costo de Ventas	\$ 7,551,581.45	\$ 7,551,581.45	\$ 7,551,581.45	\$ 7,551,581.45	\$ 7,551,581.45
Utilidad Bruta	\$ 82,064,713.31	\$ 82,064,713.31	\$ 82,064,713.31	\$ 82,064,713.31	\$ 82,064,713.31
Gastos de Operación	\$ 6,633,938.17	\$ 6,633,938.17	\$ 6,633,938.17	\$ 6,633,938.17	\$ 6,633,938.17
Utilidad de operación	\$ 75,430,775.13	\$ 75,430,775.13	\$ 75,430,775.13	\$ 75,430,775.13	\$ 75,430,775.13
Impuesto	30%	30%	30%	30%	30%
Utilidad después de impuesto	\$ 52,801,542.59	\$ 52,801,542.59	\$ 52,801,542.59	\$ 52,801,542.59	\$ 52,801,542.59
Partidas virtuales	\$ 6,228,302.17	\$ 6,228,302.17	\$ 6,228,302.17	\$ 6,228,302.17	\$ 6,228,302.17
Flujo de efectivo	\$ 59,029,844.77	\$ 59,029,844.77	\$ 59,029,844.77	\$ 59,029,844.77	\$ 59,029,844.77

Fuente: Elaboración propia.



Proyecciones Financieras (3:4)

Año	11	12	13	14	15
Ventas	\$ 144,026,188.00	\$ 144,026,188.00	\$ 144,026,188.00	\$ 144,026,188.00	\$ 144,026,188.00
Costo de Ventas	\$ 9,286,479.81	\$ 9,286,479.81	\$ 9,286,479.81	\$ 9,286,479.81	\$ 9,286,479.81
Utilidad Bruta	\$ 134,739,708.19	\$ 134,739,708.19	\$ 134,739,708.19	\$ 134,739,708.19	\$ 134,739,708.19
Gastos de Operación	\$ 6,633,938.17	\$ 6,633,938.17	\$ 6,633,938.17	\$ 6,633,938.17	\$ 6,633,938.17
Utilidad de operación	\$ 128,105,770.02	\$ 128,105,770.02	\$ 128,105,770.02	\$ 128,105,770.02	\$ 128,105,770.02
Impuesto	30%	30%	30%	30%	30%
Utilidad después de impuesto	\$ 89,674,039.01	\$ 89,674,039.01	\$ 89,674,039.01	\$ 89,674,039.01	\$ 89,674,039.01
Partidas virtuales	\$ 6,228,302.17	\$ 6,228,302.17	\$ 6,228,302.17	\$ 6,228,302.17	\$ 6,228,302.17
Flujo de efectivo	\$ 95,902,341.18	\$ 95,902,341.18	\$ 95,902,341.18	\$ 95,902,341.18	\$ 95,902,341.18

Fuente: Elaboración propia.

Proyecciones Financieras (4:4)

Año	16	17	18	19	20
Ventas	\$ 144,026,188.00	\$ 144,026,188.00	\$ 144,026,188.00	\$ 144,026,188.00	\$ 144,026,188.00
Costo de Ventas	\$ 9,286,479.81	\$ 144,026,188.00	\$ 144,026,188.00	\$ 144,026,188.00	\$ 144,026,188.00
Utilidad Bruta	\$ 134,739,708.19	\$ 9,286,479.81	\$ 9,286,479.81	\$ 9,286,479.81	\$ 9,286,479.81
Gastos de Operación	\$ 6,633,938.17	\$ 134,739,708.19	\$ 134,739,708.19	\$ 134,739,708.19	\$ 134,739,708.19
Utilidad de operación	\$ 128,105,770.02	\$ 6,633,938.17	\$ 6,633,938.17	\$ 6,633,938.17	\$ 6,633,938.17
Impuesto	30%	30%	30%	30%	30%
Utilidad después de impuesto	\$ 89,674,039.01	\$ 89,674,039.01	\$ 89,674,039.01	\$ 89,674,039.01	\$ 89,674,039.01
Partidas virtuales	\$ 6,228,302.17	\$ 6,228,302.17	\$ 6,228,302.17	\$ 6,228,302.17	\$ 6,228,302.17
Flujo de efectivo	\$ 95,902,341.18	\$ 95,902,341.18	\$ 95,902,341.18	\$ 95,902,341.18	\$ 95,902,341.18

Fuente: Elaboración propia.



Cálculo de indicadores financieros.

La tasa mínima atractiva de retorno empleada es del 20% anteponiéndose a los riesgos asociados al proyecto que puedan surgir. Con dicha información se calcula el Valor Presente Neto (VPN) que se tendrá del proyecto utilizando la siguiente ecuación:

$$VPN = \sum_{t=0}^{t=n} \frac{B_t - C_t}{(1 + r)^t}$$

A manera de ejemplo se desarrolla la ecuación para el primer año; cabe mencionar que la forma de aplicarla es igual para cada año, aplicando a t el valor correspondiente de cada año a calcular.

$$VP_1 = \frac{\$26,125,173.83}{(1 + 0.20)^1} = \$21,770,978.19$$

Posteriormente, se realiza la sumatoria de los flujos de efectivo descontado obtenidos del horizonte de evaluación como se muestra en la tabla 36.

Tabla 36. Flujos de efectivo

Año	Flujo de efectivo descontado
0	-
1	\$ 21,770,978.19
2	\$ 18,142,481.83
3	\$ 15,118,734.85
4	\$ 12,598,945.71
5	\$ 10,499,121.43
6	\$ 19,768,975.58
7	\$ 16,474,146.31
8	\$ 13,728,455.26
9	\$ 11,440,379.38



Año	Flujo de efectivo descontado
10	\$ 9,533,649.49
11	\$ 12,907,302.93
12	\$ 10,756,085.77
13	\$ 8,963,404.81
14	\$ 7,469,504.01
15	\$ 6,224,586.67
16	\$ 5,187,155.56
17	\$ 4,322,629.63
18	\$ 3,602,191.36
19	\$ 3,001,826.14
20	\$ 2,501,521.78
Σ	\$ 214,012,076.70

Fuente: Elaboración propia.

$$VPN = -\$128,145,985.77 + \$214,012,076.70 = \$ 85,866,090.93$$

$$VPN = \$ 85,866,090.93$$

Para el cálculo de la Tasa Interna de Retorno se tiene la siguiente ecuación:

$$VPN = \sum_{t=0}^{t=n} \frac{B_t - C_t}{(1 + TIR)^t} = 0$$

En la cual se observa la parte del flujo de efectivo descontado y condiciona a que el Valor Presente Neto sea igual a cero; a través del método de prueba y error o del cálculo de la variable interna se realizar la identificación de la TIR.

$$TIR = 29.27\%$$

Finalmente se lleva a cabo el Análisis Costo Beneficio en donde se considera la sumatoria del flujo de efectivo descontado como beneficios, y la inversión inicial será el costo.



$$\frac{B}{C} = \frac{\$214,012,076.70}{\$128,145,985.77} = 1.67$$

Por último en la tabla 37 se muestra el resumen de los criterios de evaluación por el cual el proyecto es viable económicamente.

Tabla 37. Resumen del análisis financiero

Criterio	Resultado	Cumple	Conclusión
VPN	\$85,866,090.93	✓	El valor del VPN es alto y mayor a 1.
i	20%	✓	La tasa de descuento es atractiva a inversionistas en este tipo de proyectos.
TIR	29.27%	✓	La TIR es mayor a la tasa de descuento, lo que indica que el proyecto aun soporta 9.27 puntos porcentuales y sigue siendo viable.
B/C	1.67	✓	La relación B/C positiva y mayor a 1 indica que se obtendrá una ganancia del 67% por cada peso invertido.

Fuente: Elaboración propia



5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como resultado de este trabajo, se identificaron hallazgos que a través del análisis permiten generar propuestas de mejora que ayuden a los responsables de la toma de decisiones para puedan contar con información y evidencia que les permita implementar acciones que impacten en el ámbito de la generación de empleos a través de la puesta en marcha de la planta de biogás, el mejoramiento de la calidad del aire derivado de la disminución de gases liberados de los rellenos sanitarios y de la quema de combustibles fósiles por parte de fuentes móviles; asimismo, la disminución de enfermedades causadas por la contaminación atmosférica.

Con el objetivo de lograr lo anterior, a continuación, se enlistan una serie de recomendaciones propuestas:

Desarrollar políticas:

- a. Que incentiven la utilización de vehículos con motores que trabajen con biogás, de tal forma que existan subsidios en los primeros años de operación de la planta para la compra de flotilla.
 - b. Que fomenten la inversión de empresas para la generación de combustibles para fuentes móviles a partir de fuentes de energía renovable y limpia.
2. Dar a conocer los beneficios económicos, de salud y ambientales que trae consigo la generación controlada del biogás.
- a. Incremento en el poder adquisitivo de combustibles para vehículos, derivado del menor costo que tiene el biogás con respecto a la gasolina
 - b. Disminución del mal olor y fauna nociva que los rellenos sanitarios producen



-
- c. Reducción de peligro de migración y explosión del metano que ahí se produce
 - d. Mitigación del problema de cambio climático procedente del efecto invernadero
 - e. Disminución de emisiones carcinogénicas, que incrementan la probabilidad de producir alteraciones en la salud de la población
 - f. Promoción del cuidado de los ecosistemas
 - g. Disposición de menos recursos económicos federales y estatales para el mantenimiento del patrimonio histórico de la nación por factores relacionados a la contaminación de la quema de combustibles fósiles
3. Fortalecer el sistema de gestión integral de los residuos sólidos urbanos, favoreciendo la educación de todos los sectores de la población que los generan, con el fin de que esta gestión no concluya en la disposición final de los residuos, sino con su aprovechamiento.
 4. Establecer como medida ambiental indispensable que cada relleno sanitario cuente un sistema eficiente que mitigue la emisión de gases a la atmósfera; así como prohibir la quema de RSU que los rellenos reciben.
 5. Promover el desarrollo de infraestructura para la distribución de biogás con la finalidad de incrementar la oferta al mercado; asimismo, reducir los costos por transporte de este energético.

Es importante resaltar que el análisis realizado en este trabajo para la producción de biogás en un relleno sanitario surge de datos teóricos y de la parametrización con



proyectos similares a nivel mundial, lo cual da como resultado información muy cercanas a la real; sin embargo, se recomienda:

6. Instalar un sistema de control, supervisión y monitoreo de las variables que intervienen en el proceso de producción de biogás como son la temperatura, la presión y el pH para poder estimar el volumen de gas generado y su calidad.



Anexo 1

Estimación de los costos de una Planta de DA.

Los costos de la Planta de DA se obtuvieron mediante una estimación paramétrica con datos de plantas con características semejantes.

Producción de biogás y metano de la Planta de DA diseñada.

Biogás		Metano	
m ³ /d	m ³ /año	m ³ /d	m ³ /año
15,973.33	5,830,263.96	11,299.89	4,124,461.28
	m ³		
Biodigestor	10,824.57	Porcentaje de metano	
Digestato	815.12	71%	

Fuente: Elaboración propia

Planta de Biogás Werlte, Alemania.

Biogás		Metano	
m ³ /d	m ³ /año	m ³ /d	m ³ /año
22,904.11	8,360,000.00	13,753.42	5,020,000.00
Características			
Digestores	m ³	Inversión	
2	3,200.00	Euros	Pesos
Post digestores		6,600,000.00	144,578,052.96
2	2,370.00		
Digestato		Porcentaje de metano	
2	4,960.00	60%	

Fuente: Elaboración propia



Planta de biogás Niedersachsen, Alemania.

Biogás		Metano	
m³/d	m³/año	m³/d	m³/año
5,260.27	1,920,000.00	2,893.15	1,056,000.00
Características			
Digestores	m³	Inversión	
2	1,050.00	Euros	Pesos
Digestato	1,000.00	692,000.00	15,158,789.80
Porcentaje de metano		55%	

Fuente: Elaboración propia

Planta de biogás de Niederbaren, Alemania.

Biogás		Metano	
m³/d	m³/año	m³/d	m³/año
2,602.74	950,000.00	1,506.85	550,000.00
Características			
Digestores	m³	Inversión	
2	230.00	Euros	Pesos
Post digestores		845,000.00	18,510,371.93
2	800.00	Porcentaje de metano	
Digestato		58%	
1	1,800.00		

Fuente: Elaboración propia



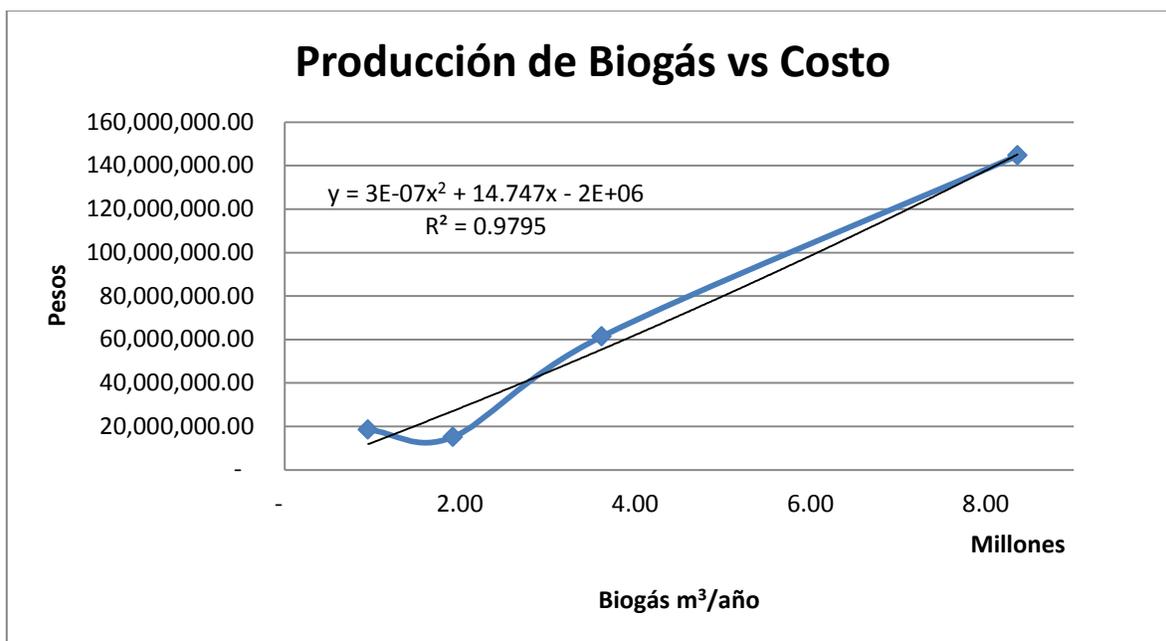
Planta de biogás Los Ángeles, Chile.

Biogás		Metano	
m ³ /d	m ³ /año	m ³ /d	m ³ /año
9,904.11	3,615,000.00	5,150.68	1,880,000.00
Digestores	m³	Inversión	
2	450.00	Euros	Pesos
Post digestores		2,800,000.00	61,336,143.68
1	2,600.00	Porcentaje de metano	
Digestato		52%	
1	5,600.00		

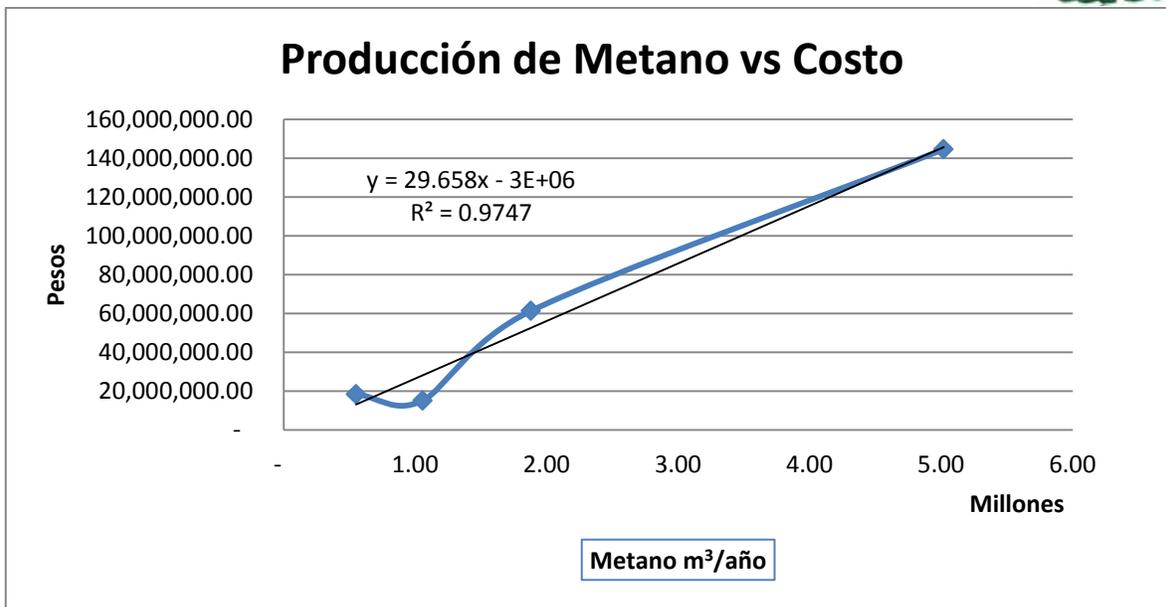
Fuente: Elaboración propia

*Tipo de cambio a octubre 2017.

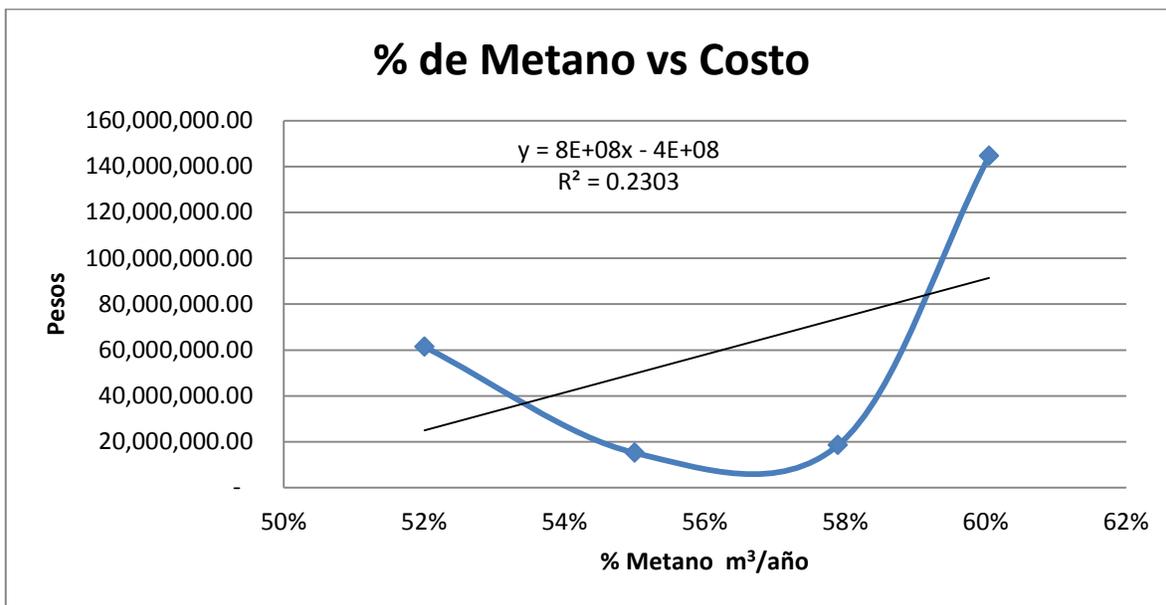
Posteriormente se elaboran gráficas comparando el costo contra la producción de biogás, la producción de metano y el porcentaje de metano del biogás.



Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia



Para finalizar se sustituyen los valores de producción de biogás, metano y el porcentaje de metano para cada ecuación obtenida, de tal manera que se obtendrán tres valores que se promediarán para obtener la estimación de la planta diseñada.

Costo Promedio
\$128,145,985.77

Fuente: Elaboración propia

(Huanchuang, 2017), (Kaifeng Huanghe Air Separation Group Co., Ltd., 2017), (Chengdu Amoco Architecture Technology Co., Ltd., 2017), (CYPE Ingenieros, S.A., 2017)



Anexo 2 Operación de la Planta de DA

Años	% operación	Litros/ día	Litros /año	Precio Biogás	Ventas al año	Autos/año	Basura ton/día	Costo basura año
1	50%	21,921.79	8,001,454.89	\$ 5.00	\$40,007,274.44	22,828.00	38.90	4,259,550.00
2	50%	21,921.79	8,001,454.89	\$ 5.00	\$40,007,274.44	22,828.00	38.90	4,259,550.00
3	50%	21,921.79	8,001,454.89	\$ 5.00	\$40,007,274.44	22,828.00	38.90	4,259,550.00
4	50%	21,921.79	8,001,454.89	\$ 5.00	\$40,007,274.44	22,828.00	38.90	4,259,550.00
5	50%	21,921.79	8,001,454.89	\$ 5.00	\$40,007,274.44	22,828.00	38.90	4,259,550.00
6	80%	35,074.87	12,802,327.82	\$ 7.00	\$89,616,294.76	36,504.00	62.24	6,815,280.00
7	80%	35,074.87	12,802,327.82	\$ 7.00	\$89,616,294.76	36,504.00	62.24	6,815,280.00
8	80%	35,074.87	12,802,327.82	\$ 7.00	\$89,616,294.76	36,504.00	62.24	6,815,280.00
9	80%	35,074.87	12,802,327.82	\$ 7.00	\$89,616,294.76	36,504.00	62.24	6,815,280.00
10	80%	35,074.87	12,802,327.82	\$ 7.00	\$89,616,294.76	36,504.00	62.24	6,815,280.00
11	100%	43,843.59	16,002,909.78	\$ 9.00	\$144,026,188.00	45,604.00	77.80	8,519,100.00
12	100%	43,843.59	16,002,909.78	\$ 9.00	\$144,026,188.00	45,604.00	77.80	8,519,100.00
13	100%	43,843.59	16,002,909.78	\$ 9.00	\$144,026,188.00	45,604.00	77.80	8,519,100.00
14	100%	43,843.59	16,002,909.78	\$ 9.00	\$144,026,188.00	45,604.00	77.80	8,519,100.00
15	100%	43,843.59	16,002,909.78	\$ 9.00	\$144,026,188.00	45,604.00	77.80	8,519,100.00
16	100%	43,843.59	16,002,909.78	\$ 10.00	\$144,026,188.00	45,604.00	77.80	8,519,100.00
17	100%	43,843.59	16,002,909.78	\$ 10.00	\$144,026,188.00	45,604.00	77.80	8,519,100.00
18	100%	43,843.59	16,002,909.78	\$ 10.00	\$144,026,188.00	45,604.00	77.80	8,519,100.00
19	100%	43,843.59	16,002,909.78	\$ 10.00	\$144,026,188.00	45,604.00	77.80	8,519,100.00
20	100%	43,843.59	16,002,909.78	\$ 10.00	\$144,026,188.00	45,604.00	77.80	8,519,100.00

Fuente: Elaboración propia



Anexo: Norma Oficial Mexicana

En cuanto a los residuos sólidos urbanos, la Ciudad de México cuenta con normatividad que establece el correcto manejo de estos:

- NOM-083-SEMANRTAT-2003 Requisitos que deben reunir los sitios que se destinaran para un confinamiento controlado de residuos peligrosos previamente estabilizados.
- NOM-052-SEMANRTAT-2005 Caracterización, procedimiento e identificación, clasificación y listado de los residuos peligrosos.
- NOM-083-SEMARNAT-2003 Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.

El gobierno federal es el responsable de establecer los estándares para la protección de la salud pública y vigilar su cumplimiento. Estos estándares se encuentran publicados en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y son de observación obligatoria en todo el país. Las NOM describen los límites permisibles para los contaminantes. Estas normas están condicionadas a una revisión periódica para reflejar la información reciente sobre los efectos en la salud y la gestión de la calidad del aire.

En el monitoreo de la calidad del aire se emplean dos tipos de normas: las NOM de salud ambiental que establecen los límites permisibles para los contaminantes, y las NOM técnicas que definen los métodos de medición de los contaminantes.



Las NOM en materia de salud vigente son las que se presentan en la siguiente tabla.

Contaminante	NOM	Publicación	Descripción
Dióxido de azufre (SO₂)	NOM-022-SSA1-2010	8 de septiembre de 2010	0.110ppm, máximo promedio de 24 horas 0.200 ppm, segundo máximo anual como promedio móvil de 8 horas 0.025 ppm, promedio anual
Monóxido de carbono (CO)	NOM-021-SSA1-1993	23 de diciembre de 1994	11.0 ppm, máximo anual como promedio móvil de 8 horas
Dióxido de nitrógeno (NO₂)	NOM-023-SSA1-1993	23 de diciembre de 1994	0.210 ppm, promedio horario
Ozono (O₃)	NOM-020-SSA1-2014	19 de agosto de 2014	0.095 ppm, promedio diario 0.070 ppm, máximo anual del promedio móvil de 8 horas
Partículas menores a 10 micrómetros (PM₁₀)	NOM-025-SSA1-2014	20 de agosto de 2014	75 µg/m ³ , promedio de 24 horas 40 µg/m ³ , promedio anual
Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5})	NOM-025-SSA1-2014	20 de agosto de 2014	45 µg/m ³ , promedio de 24 horas 12 µg/m ³ , promedio anual
Plomo (Pb)	NOM-026-SSA1-1993	23 de diciembre de 2014	15 µg/m ³ , en un promedio de tres meses como promedio aritmético



REFERENCIAS

- SEMARNAT, INE, Western Governor's Association . (2005). *Guía de Elaboración y Usos de Inventarios de Emisiones*. México.
- Aire de la Ciudad de México*. (octubre de 2016). Recuperado el octubre de 2016, de El monitoreo de la calidad del aire: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnml=%27>
- Arzabe, J. (2015). *Tiradero al cielo abierto "Bicentenario", Mexico*. Obtenido de Environmental Justice Atlas: <https://ejatlas.org/conflict/tiradero-al-cielo-abierto-bicentenario-de-la-independencia-de-mexico-a-cargo-de-la-empresa-tersa-del-golfo>
- Ávila, S. (2009). *Biogás: Opción real de seguridad energética para México*. Ciudad de México: IPN.
- Azqueta Oyarzun , D. (1994). *Valoración Económica de la Calidad del aire*. Madrid: Mc Graw Hill.
- Bacchetta, V. (2013). Geopolítica del fracking, impactos y riesgos ambientales. *Revista Nueva Sociedad No. 244*.
- Banco Interamericano de Desarrollo. (1997). BID-OPS, Diagnóstico de la Situación del Manejo de Residuos Sólidos Municipales en América Latina y el Caribe. Washington, D.C.
- Castells, X., Flotats, X., & Campos, E. (2012). Procesos biológicos la digestión anaerobia y el compostaje. En X. E. Castells, *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Madrid: Díasde Santos.
- Chengdu Amoco Architecture Technology Co., Ltd. (2017). *Membrana biogas house, Tanque de almacenamiento de biogas, Sistema de almacenamiento de biogas*. Obtenido de alibaba.com: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/membrane-biogas-house-biogas-storage-tank-biogas-storage-system-882113960.html>
- Cohen E, F. (1996). *Evaluación de Proyectos Sociales* .
- Consultora BESEL , S.A. (Noviembre de 2008). Nuevos Combustibles y Tecnologías de Propulsión: Situación y Perspectivas para Automoción. *AHORRO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA*.
- Coss, B. (2005). *Análisis y evaluación de proyectos de inversión*. México: LIMUSA .
- Costa, C. (2013). *Biogás as an energy option: an overview*. Alemania: IEA Bioenergy.



- Cruz, M., & Herмосilla, G. (2008). *Fisiología microbiana*. Obtenido de Fisiología bacteriana:
https://microbiologiabasica.files.wordpress.com/2008/03/fisiologia_microbiana.pdf
- CYPE Ingenieros, S.A. (2017). *Generador de Precios México*. Obtenido de Generador de Precios México:
http://www.mexico.generadordeprecios.info/obra_nueva/calculaprecio.asp?Valor=1|1_0_0_0_0|EHM010|ehm_010_imagen:_0|hormigon%20muro:_0_0_0_0_0_1_2_0_0_1_1_1_0_5|ehm_cues:_49000|acero%20muros_sotano:_0_0_0_0_0_0|che_ehm_011%20muro:c3_0_1_16c4_0_50_0_100c5_0_10|ehm_paso_inst:_0_1_0|hor_separad_distanciad_acc:_0_0
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2011). *Biogas from qwaste and renewable resources: An Introduction*. Alemania: Wiley VCH Verlag.
- Deublein, S. (2008). *Biogas from Waste and Renovable Resources*. Germany: WILEY-VCH .
- DIM WATER SOLUTIONS, S.L. (s.f.). *DIM WATER SOLUTIONS*. Obtenido de DIM WATER SOLUTIONS energía, agua, residuos y tecnologías:
<http://www.dimamex.com/PDF/EQUIPOS%20BIOGAS.pdf>
- Durán Moreno, A., Casas Gutiérrez, D., Rojas Zamora, U., Vázquez Cuevas , G., Roa Luna, M., & Alcántara Hernández, R. (2014). *Fundamentos de Digestión Anaerobia de Residuos Sólidos Orgánicos Urbanos*. México.
- Durán, A. (2014). *Bases de diseño del proceso de digestión anaerobia*. Ciudad de México: FOC, S.A. de C.V.
- Durán, A., Casas, D. N., Rojas, U., Vázquez, G. M., Roa, M., & Alcántara, R. J. (2014). *Fundamentos de Digestión Anaerobia de Residuos Sólidos Orgánicos Urbanos*. México: CONACYT.
- Duran, A., Casas, D., & Rojas, U. (2014). *Fundamentos de la digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos*. México: UNAM.
- Eaton, A., Díaz-López, N. M., & Lokey, E. (2014). *Manual para la implementación de proyectos de captura de metano emitido por la agricultura en Mexico*.
- Ecoscore. (2012).
- Elias, X. (2005). *Tratamiento y Valoración energética de residuos*. Madrid: Díaz de Santos S.A.
- Fernández Espinoza, S. (2007). *Los proyectos de inversión*. Costa Rica: Tecnológica de Costa Rica.



- Fraume. (2007). *Diccionario Ambiental*. ECOE.
- Gerardi, M. (2003). *The microbiology of anaerobic digesters*. New Jersey: Interscience.
- Gobierno del Estado de México. (2011). NORMA TÉCNICA ESTATAL AMBIENTAL NTEA-013-SMA-RS-2011, QUE ESTABLECE LAS ESPECIFICACIONES PARA LA SEPARACIÓN EN LA FUENTE DE ORIGEN, ALMACENAMIENTO SEPARADO Y ENTREGA SEPARADA AL SERVICIO DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y DE MANEJO ESPECIAL, PARA EL ESTADO DE MÉXICO. *Gaceta del Gobierno*.
- Gomez, L., Clare, S.-K., & McQueen-Manson, S. (2008). Sustainable liquid biofuels from biomass: the writing's on the walls. *New Phytologist Trust*, 473-485.
- Greenpeace. (2010). Evidencias, impactos, vulnerabilidad y adaptación. *México ante el cambio climático*, 72.
- Gutiérrez Avedoy, V. (2006). *Diagnóstico básico para la digestión integral de residuos*. México: Editorial del deporte mexicano.
- Hibert, J. A. (s.f.). *Manual para la Producción de Biogás*. Instituto de Ingeniería Rural.
- Hinojosa, J. (2005). *Evaluación económico - financiera de proyectos de inversión*. México : Trillas.
- Huanchuang. (2017). *La nueva condición industrial de pellets de plástico trituradoras*. Obtenido de Alibaba global trades starts here: <https://spanish.alibaba.com/p-detail/la-nueva-condici%C3%B3n-industrial-de-pellets-de-pl%C3%A1stico-trituradoras-300004442359.html?spm=a2700.7787056.a372l.4.iNdO0H>
- INEGI. (2012). *POSTA*. Recuperado el ENERO de 2017, de <http://www.posta.com.mx/inegi-el-costos-ambiental-representa-53-del-pib>
- Instituto Mexicano para la Competitividad A.C. (2013). *¿Cuánto nos cuesta la contaminación del aire? Calculadora de impactos en salud y en productividad*. México: IMCO.
- Kaifeng Huanghe Air Separation Group Co., Ltd. (2017). *10000Nm³/d ~ 50000Nm³/d de Biogás planta de purificación (Bio-GNC)*. Obtenido de Alibaba global trade starts here: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/10000nm3-d-50000nm3-d-biogas-purification-plant-bio-cng--60595819053.html>



- Kok Sin Woon, I. M. (26 de February de 2016). Environmental assessment of food waste valorization in producing biogas for various types of energy use based on LCA approach. *Waste Management*(50), 290-299.
- Koolman, J., & Rohm, K.-H. (2004). *Bioquímica. Texto y Atlas*. Madrid: Médica Panamericana.
- la Ley de Gestión Ambiental y del Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental . (2002). *Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: recurso agua*. Obtenido de Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: recurso agua: <https://www.dspace.espol.edu.ec/.../LIBRO%20VI%20Anexo%201%20Normas%20Re...>
- Lacy Tamayo, R. (Agosto de 2016). Ingeniería Civil .
- Mandujano Sánchez , P. (2001). Digestión anaerobia de sólidos en alta concentración. España.
- Maquinaria de BMC de Shanghai de Minería y Construcción Co., Ltd. (5 de Febrero de 2017). *PE series de trituradora de mandíbula*. Obtenido de BMC: <http://www.medikavital.com.mx/products/trituradora/trituradora-de-jaw.html>
- Marten Larrsson, S. G. (13 de August de 2015). Upgraded biogas for transport in Sweden - effects of policy instruments on production, infrastructure deployment and vehicle sales. *Journal of Cleaner Production*(112), 3774-3784.
- Martínez, H., Böttinger, S., Oechsner, H., & Schlegel, M. (2008). *Instalaciones de biogás a mediana y gran escala en Alemania*. Obtenido de <http://www.engormix.com/MA-porcicultura/manejo/articulos/instalaciones-biogas.mediana-gran-t1886/124-p0.htm>
- MILENIO, S.A. DE C.V. (25 de Julio de 2017). Precio de la gasolina hoy: martes 25 de julio .
- MINENERGIA, PNUD, FAO, GEF. (2011). MANUAL DE BIOGÁS. *MANUAL DE BIOGÁS*.
- Muyllaert. (2001).
- Organización Mundial de la Salud. (2012).
- Padilla, C. (Abril de 2007). Transporte y Contaminación del aire en la Ciudad de México (1950-2005). Ciudad de México, México.
- PGDU. (2017). *Iniciativa de programa general de desarrollo urbano*.



- Puma, A., Armijo, C., Nelly, C., Juana, L., & Ojeda, S. (2011). *Instrumento de Evaluación para los Programas de Manejo de Residuos Domiciliarios*. Obtenido de inecc: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/gacetitas/649/instrumento.pdf>
- Ramos, D. (2012). Trituración de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos urbanos de la Ciudad de México y producción anaerobia de biogás. Ciudad de México, Ciudad de México, México.
- Robles, M. (2014). *Impacto social y ambiental del fracking*.
- SCHRIEWER BIOGAS CONSULTING. (2010). *SCHRIEWER BIOGAS CONSULTING*. Obtenido de <http://www.schriewer-biogas-consulting.com/SBC2010es/index.php/biogas/ventajas-del-biogas.html>
- SEDESOL. (2005). *El Manejo de los Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial en México*. Recuperado el diciembre de 2016, de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/495/residuos.html>
- Seinfeld, J., & Pandis, S. (2006). *Atmospheric Chemistry and Physics*. Wiley.
- SEMARNAT. (2011). Residuos. Ciudad de México: SNIARN.
- SEMARNAT. (2013). Obtenido de Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos y su reglamento: <http://itculiacan.edu.mx/wp-content/uploads/2013/08/LGPGIR.pdf>
- SEMARNAT. (2014). *SEMARNAT*. Obtenido de Residuos sólidos y urbanos de manejo especial: <http://www.semarnat.gob.mx/temas/residuos-solidos-urbanos>
- SNIARN. (2010). Medio Ambiente . Ciudad de México.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (1994). *Gestión integral de los residuos sólidos* (Vol. 1). Madrid, España: McGraw-Hill.
- Van Kessel, J., & Russell, J. (1996). *The effect of pH on ruminal methanogenesis*. FEMS.
- Villaseñor, F. E., Soto, P., Delgado, A. R., Herrera, G. P., Gómez-Mont, U. E., Martínez, F. J., . . . Vázquez, M. (2013). *Guía para el aprovechamiento de Biogás en Rellenos Sanitarios Municipales*.