



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA QUÍMICA – INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN DE PROYECTOS

EVALUACIÓN DE PREFACTIBILIDAD DE UNA PLANTA DE DIGESTIÓN
ANAEROBIA PARA EL PROCESAMIENTO DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE
LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JUAN MIGUEL MENDOZA ROJAS

TUTOR PRINCIPAL:
Dr. ALFONSO DURÁN MORENO
FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM

CIUDAD DE MÉXICO, JULIO 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: MBA. Elisa Elvira Guinea Corres

Secretario: Dr. Modesto Javier Cruz Gómez

Vocal: Dr. Alfonso Durán Moreno

1er. Suplente: Dr. Víctor Manuel Luna Pabello

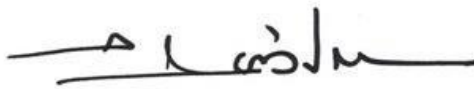
2do. Suplente: M. en I. José Antonio Ortiz Ramírez

Lugar donde se realizó la tesis:

UNIDAD DE PROYECTOS Y DE INVESTIGACIÓN DE INGENIERÍA AMBIENTAL,
CONJUNTO E, LABORATORIO 301, FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM

TUTOR DE TESIS:

DR. ALFONSO DURÁN MORENO



FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Química, por la formación de alto nivel y calidad que me han brindado, soy muy afortunado de pertenecer a esta institución.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo con la beca de maestría otorgada No. 92634.

A mis padres Isabel y Juan, con todo mi amor, admiración y respeto y a quienes expreso mi gratitud por su apoyo y cariño incondicional, siempre serán mi guía.

A mis hermanos, Marco (Polo), Kevin y Alan, por soportarme siempre y por su compañía en los momentos felices y en las adversidades.

A Paula, por alentarme, por apoyarme en cada decisión que tomaba, por su compañía, paciencia y amor que me han ayudado mucho a crecer.

A todos mis amigos y colegas por su amistad y comprensión durante este proceso, especialmente a Omar, Daniel, Oscar y Misael con quienes he vivido grandes momentos.

Al Dr. Alfonso Durán por aceptarme en su grupo de investigación y ser mi tutor, por sus enseñanzas, paciencia, apoyo y atención conmigo.

A los miembros de mi jurado, MBA. Elisa Guinea, Dr. Javier Cruz, Dr. Víctor Luna y M.I. Antonio Ortiz, por todo su tiempo, disposición y comentarios para mejorar a lo largo de esta tesis.

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	10
1.1	Planteamiento del problema	11
1.2	Justificación.....	13
1.3	Preguntas de investigación.....	14
1.4	Objetivo General.....	15
1.5	Objetivos Específicos	15
2.	ANTECEDENTES.....	16
2.1	Digestión Anaerobia	16
2.1.1	Ruta biológica de la Digestión Anaerobia	16
2.2	Parámetros que influyen en la Digestión Anaerobia	18
2.2.1	Definiciones.....	18
2.2.2	Temperatura.....	19
2.2.3	Potencial de hidrógeno (pH)	20
2.2.4	Tiempo de retención.....	20
2.2.5	Carga Orgánica	21
2.2.6	Relación C/N	21
2.2.7	Tamaño de Partícula	22
2.2.8	Resumen de parámetros ideales	22
2.3	Tipos de procesos anaerobios para la FORSU.....	22
2.3.1	Tecnologías de Pretratamiento.....	23
2.3.2	Digestión húmeda y seca	24
2.3.2.1	Régimen de alimentación del sustra	25
2.3.2.2	Régimen Continuo	25
2.3.2.3	Régimen discontinuo.....	27
2.3.2.4	Etapas del Proceso.....	27
2.3.2.5	Temperatura de operación	27
2.4	Subproductos de la Digestión Anaerobia.....	28
2.4.1	Biogás	28
2.4.2	Energía asociada al biogás	29
2.4.3	Producción de Metano (CH ₄)	30
2.4.4	Tratamiento del biogás	30
2.4.5	Digestato	31
2.5	Procesos Comerciales de Digestión Anaerobia	32

2.5.1	Tecnología BTA.....	34
2.5.2	Tecnología WAASA.....	35
2.5.3	Tecnología DRANCO	36
2.5.4	Tecnología VALORGA.....	37
2.6	Residuos Sólidos Urbanos.....	37
2.6.1	Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU).....	39
2.6.2	Generación de residuos.....	39
2.6.3	Composición de los residuos sólidos urbanos	40
2.6.4	Recolección de residuos y su disposición final	43
2.6.5	Costos por el manejo de residuos.....	43
2.7	Aspectos Ambientales de la Digestión Anaerobia.....	44
2.7.1	Reducción del volumen de residuos	44
2.7.2	Reducción de lixiviados.	45
2.7.3	Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.....	45
2.7.4	Recuperación de nutrientes.....	46
2.8	Mapa de Ruta Tecnológica del Biogás	46
2.9	Proyecto	48
2.9.1	Ciclo de Vida de un Proyecto.....	49
2.9.2	Evaluación de Proyectos	50
2.9.3	Estudios de preinversión	51
2.9.4	Evaluación a nivel de perfil	51
2.9.5	Evaluación a nivel de prefactibilidad	52
2.10	Caso de Negocio	52
2.10.1	Propósito	52
2.10.2	Descripción.....	53
2.11	Estudio de mercado.....	53
2.12	Estudio Técnico	54
2.12.1	Aspectos técnicos del proceso	55
2.13	FRONT-END LOADING (FEL).....	55
2.14	Estimado de costos	56
2.14.1	Clases del estimado de costo	57
2.14.2	Exactitud del estimado de costo	58
2.15	Indicadores Financieros.....	58
2.15.1	Valor Presente Neto	58
2.15.2	Tasa Interna de Retorno (TIR).....	60
2.15.3	Costo Anual Equivalente (CAE).....	60
2.16	Método de Evaluación Multicriterio	61

2.16.1	Método PROMETHEE	61
3.	METODOLOGÍA.....	64
3.1	Recopilación de información.....	64
3.2	Caso de Negocio	64
3.3	Estudio de Mercado de los Residuos en la Ciudad de México.....	67
3.4	Estudio técnico del potencial de la digestión anaerobia.....	70
3.4.1	Pretratamiento.....	71
3.4.2	Digestión	72
3.4.3	Volumen de digestión	72
3.4.4	Tratamiento de biogás.....	73
3.4.5	Estimación de Recuperación de Energía del Biogás	73
3.4.6	Digestato	74
3.4.7	Comparación del modelo.....	75
3.5	ANÁLISIS AMBIENTAL	76
3.5.1	Reducción del volumen de residuos	76
3.5.2	Reducción de los lixiviados.....	76
3.5.3	Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.....	76
3.5.4	Recuperación de nutrientes	78
3.6	EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	80
3.6.1	Situación sin Proyecto	81
3.6.2	Situación con proyecto de digestión anaerobia.....	81
3.6.3	INDICADORES FINANCIEROS	83
4.	CASO DE NEGOCIO: PLANTA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA	86
4.1	Resumen ejecutivo	86
4.2	Problemática y situación actual	86
4.3	Justificación de la alternativa elegida.....	88
4.4	Selección de tecnología.....	89
4.5	Selección de Sitio	93
4.6	Aspectos a Evaluar de la alternativa de solución	96
4.6.1	Beneficios del tratamiento de la FORSU vía Digestión Anaerobia	96
4.6.2	Estimado de inversión para el proyecto	96
4.6.3	Configuración de la alternativa.	97
4.7	Lista de Supuestos	97
4.8	Identificación de las personas interesadas.	98
5.	ESTUDIO DE MERCADO.....	102
5.1	Generación de Residuos Sólidos Urbanos en la Ciudad de México.....	102
5.2	Generación per cápita	103

5.3	Recopilación de la información histórica sobre la cantidad de residuos generados	104
5.3.1	Generación de Residuos en la Central de Abastos.....	105
5.4	Estimación de la demanda de servicios de recolección	106
5.5	Oferta actual de los servicios de manejo de residuos	108
5.6	Mercado eléctrico	112
6.	ESTUDIO TÉCNICO DEL POTENCIAL DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	114
6.1	Localización.....	114
6.1.1.	Descripción del sitio propuesto	114
6.2	Descripción general del proceso.....	115
6.3	Evaluación de la materia Prima	116
6.4	Resultados de la Evaluación Técnica	117
6.4.1	Entradas al Modelo.....	118
6.4.2	Pretratamiento.....	118
6.4.3	Digestión Anaerobia	119
6.4.4	Estimación de Recuperación de Energía del Biogás	120
6.4.5	Digestato	120
6.4.6	Resumen de los Resultados del Modelo.....	121
6.4.7	Comparación del Modelo.....	122
6.4.8	Análisis Ambiental	125
7.	EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA	129
7.1	Situación sin Proyecto	129
7.2	Situación Con Proyecto	130
7.3	Comparación de la situación con proyecto y sin proyecto.....	135
8.	CONCLUSIONES.....	136
9.	RECOMENDACIONES.....	138
10.	REFERENCIAS	140
	ANEXO 1. ASPECTOS ECONÓMICOS (Cifras en dólares)	151

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de parámetros ideales para digestión anaerobia.	22
Tabla 2. Tipos de Digestión Anaerobia	25
Tabla 3. Características del Biogás	29
Tabla 4. Producción de metano en FORSU.	30
Tabla 5. Nutrientes presentes en el digestato.	31
Tabla 6. Tecnologías de Digestión Anaerobia Comerciales.	33
Tabla 7. Composición de los Residuos Sólidos Urbanos en México.	42
Tabla 8. Costos promedio por el manejo de residuos.	44
Tabla 9. Retos para el desarrollo de la industria de biogás hacia el 2030.	47
Tabla 10. Barreras no-técnicas para el desarrollo del biogás.	48
Tabla 11. Objetivo de las Etapas FEL	56
Tabla 12. Definición de las clases de estimado de costos	57
Tabla 13. Clases y exactitud del estimado de costo.	58
Tabla 14. Metodología del caso de negocio.	65
Tabla 15. Criterios empleados para la selección de tecnología.	66
Tabla 16. Emisiones de fuentes de energía eléctrica.	78
Tabla 17. Grupos de criterios de evaluación.	90
Tabla 18. Flujos de preferencia parcial.	90
Tabla 19. Alternativas de Sitio.	93
Tabla 20. Costos de inversión y de operación de plantas de Digestión Anaerobia Húmeda.	97
Tabla 21. Datos importantes del proyecto.	97
Tabla 22. Clasificación del nivel de influencia de los grupos de interesados.	99
Tabla 23. Lista de los principales grupos de interesados en el proyecto de Digestión Anaerobia.	100
Tabla 24. Datos históricos de generación diaria de residuos en la CDMX.	104
Tabla 25. Generación diaria de RSU en la Central de Abastos.	106
Tabla 26. Proyección de la generación diaria de RSU.	107
Tabla 27. Infraestructura actual para el manejo de los RSU en la Ciudad de México.	111
Tabla 28. Histórico de tarifas eléctricas por sector.	113
Tabla 29. Características principales del sitio propuesto.	114
Tabla 30. Composición de los RSU de la CEDA	117
Tabla 31. Características fisicoquímicas de los residuos de la CEDA	117
Tabla 32. Datos de entrada para el desarrollo del modelo.	118
Tabla 33. Resumen del modelo.	122
Tabla 34. Comparación de los resultados del modelo.	122
Tabla 35. Mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero.	126
Tabla 36. Cantidad de nitrógeno y potasio en el digestato.	127
Tabla 37. Cantidad de Fertilizante equivalente.	127
Tabla 38. Resumen de los resultados del análisis ambiental.	128
Tabla 39. Proyección de Costos de manejo de residuos (Situación Actual).	129
Tabla 40. Indicadores Financieros de la situación sin proyecto.	130
Tabla 41. Valores de referencia para el cálculo económico de la situación sin proyecto.	130
Tabla 42. Entradas para los cálculos del modelo financiero.	131
Tabla 43. Indicadores Financieros de la situación con proyecto.	133
Tabla 44. Flujo de efectivo situación con proyecto (Cifras en USD).	134
Tabla 45. Comparación de escenarios (Cifras en USD)	135

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de digestión anaerobia.....	18
Figura 2. Descripción de sustrato.....	19
Figura 3. Reactor tipo CSTR para digestión anaerobia.....	26
Figura 4. Esquema del proceso BTA.....	34
Figura 5. Esquema del proceso WAASA.....	35
Figura 6. Diagrama del proceso Valorga.....	37
Figura 7. Generación de residuos sólidos urbanos por región (SEMARNAT, 2016).....	40
Figura 8. Composición de los residuos en México.....	41
Figura 9. Nivel de análisis de los estudios para la evaluación de proyectos (Sapag-Chain, 2008).....	51
Figura 10. Procedimiento del método PROMETHEE.....	61
Figura 11. Etapas del proceso.....	71
Figura 12. CAPEX y OPEX por capacidad de procesamiento.....	83
Figura 13. Generación de residuos por tipo de fuente.....	87
Figura 14. Flujos de preferencia parciales.....	91
Figura 15. Flujo de preferencia total.....	92
Figura 16. Ubicación de las plantas de composta.....	95
Figura 17. Generación por tipo de fuente.....	103
Figura 18. Datos históricos de generación de RSU en la Ciudad de México.....	105
Figura 19. Proyección de la generación diaria de residuos al 2040.....	108
Figura 20. Destino de los residuos generados en la Ciudad.....	109
Figura 21. Ubicación de la Infraestructura para el manejo de los residuos.....	112
Figura 22. Precios históricos de energía eléctrica por sector.....	114
Figura 23. Localización del sitio propuesto.....	115
Figura 24. Pretratamiento húmedo.....	119
Figura 25. Modelo de Digestión Anaerobia.....	119
Figura 26. Estimación de la recuperación de energía asociada al biogás.....	120
Figura 27. Tratamiento del digestato y producción de composta.....	121
Figura 28. Comparación de los resultados del modelo.....	123
Figura 29. Esquema del proceso de Digestión Anaerobia.....	124
Figura 30. Flujos de efectivo acumulado del proyecto.....	132

LISTA DE ABREVIATURAS

CAE	Costo Anual Equivalente
CDMX	Ciudad De México
CEDA	Central De Abastos
CSTR	Continuous Stirred Tank Reactor
DA	Digestión Anaerobia
DAH	Digestión Anaerobia Húmeda
FEL	Front-End Loading
FORSU	Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos
LGPGIR	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos
MARR	Tasa Mínima Aceptable de Retorno
MXN	Peso Mexicano
pH	Potencial de Hidrógeno
ppm	Partes por millón
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
SEDEMA	Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
ST	Sólidos Totales
SV	Sólidos Volátiles
t	Toneladas
TIR	Tasa Interna de Retorno
TRH	Tiempo de Retención Hidráulico
USD	Dólar Estadounidense
VCM	Valor Calorífico Mínimo
VPN	Valor Presente Neto
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México

1. INTRODUCCIÓN

La Ciudad de México se ubica dentro de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), siendo uno de los más grandes asentamientos urbanos en México. El crecimiento de la población ha derivado en la integración de áreas metropolitanas que debido a una estructura desigual de acceso a servicios ha generado problemas sociales, ambientales y políticos, además trae como consecuencia un aumento en la demanda de productos y servicios que a su vez demandan más recursos, entre los cuales se encuentran los energéticos. Uno de los principales problemas históricos de la Ciudad de México ha sido la escasa planeación hacia la sustentabilidad, lo que ha generado afectaciones importantes en el ambiente local y un uso ineficiente de recursos energéticos.

En cuanto al tema de los residuos, las alcaldías de la Ciudad de México y los mayores municipios integrantes de la ZMVM generan el 30% de los desechos del país. En este sentido, la falta de coordinación entre las entidades involucradas hace muy ineficiente el manejo de los residuos, por lo que se pierden oportunidades de aprovechar nuevas tecnologías para poder utilizar los desechos en proyectos tanto de reciclaje como de fuentes de energía alternativa (Baz, 2015).

De acuerdo con datos reportados en el inventario de los residuos sólidos urbanos de la Ciudad de México 2019, se generan en promedio 13,149 toneladas de residuos diarias, con una gestión de residuos conformada por 12 estaciones de transferencia, 8 plantas de composta, 2 plantas de reciclaje, 2 plantas compactadoras y 5 sitios de disposición final en los que se depositan más del 60% de los residuos recolectados (SEDEMA , 2019).

De los residuos generados en México, cerca del 50% corresponden a residuos orgánicos (Durán et al., 2013). De los cuales una gran cantidad tiene su origen en el desperdicio de alimentos, esto ocurre cuando son desechados alimentos preparados para consumo, principalmente provenientes de los hogares (Kaza et al., 2018).

La demanda de energía, productos de consumo y por lo tanto servicios como la gestión de los residuos se proyecta que seguirá incrementando debido al crecimiento

poblacional, por lo tanto es importante implementar proyectos que contribuyan al manejo de enormes cantidades de residuos dispuestos en rellenos sanitarios, que generan gases de efecto invernadero y lixiviados. Esta situación ya se ha manifestado en la gestión de los residuos de la Ciudad de México, en donde la sobre dependencia de los rellenos sanitarios como principal práctica para el tratamiento final de los residuos causó que el relleno sanitario Bordo poniente cerrara sus operaciones en el año 2011 y enviará los residuos a rellenos sanitarios ubicados en el Estado de México y Morelos (Tsydenova et al., 2019).

De acuerdo con Wid & Horan (2018), la tecnología de digestión anaerobia ofrece ventajas significativas incluyendo consumo mínimo de recursos, huella de carbono baja, reduce el volumen de los residuos orgánicos y los convierte en subproductos estabilizados al mismo tiempo que genera energía y un suministro de material digerido (digestato) que puede ser utilizado como fertilizante o acondicionador de suelos para producción agrícola.

1.1 Planteamiento del problema

Uno de los principales problemas ambientales en las metrópolis mexicanas, como la ZMVM, es el mal manejo de los residuos sólidos sobre todo en la disposición final, que suele ocurrir en lugares inadecuados y sin utilizar tecnologías que reduzcan sus impactos ambientales o que permitan su aprovechamiento para la generación de energía o como insumos para procesos productivos. El conjunto de retos ambientales de las metrópolis mexicanas se asocia también con aspectos energéticos, porque 82.6% de la energía eléctrica se genera con combustibles fósiles (52.2% gas natural, 18.8% petróleo y 11.5% carbón) que son los principales generadores de gases de efecto invernadero (GEI) (Iracheta, 2016).

El escenario actual de la generación de residuos en México coloca a la Ciudad de México como una de las principales generadoras de desechos en el país, dentro de este panorama, también debe mencionarse que el manejo de los residuos en la capital es de condiciones especiales, debido a que la población es del orden de 8.918

millones de habitantes¹, por lo que una mala gestión de los residuos desataría problemas sociales y ambientales de gran complejidad.

La gestión de los residuos sólidos se inicia en la generación, la cual de acuerdo con el Inventario de Residuos Sólidos de la Ciudad de México, se estima en **13,149 t/día**, estos residuos son provenientes de diversas fuentes y se caracterizan por su composición, ya que un poco más del **50%** de estos corresponden a la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (Kaza et al., 2018). Con la finalidad de mejorar el manejo de los residuos, en el año 2017, se inició un programa para realizar la separación de los residuos desde las fuentes generadoras, esto ayudó a entender mejor las características de los residuos y a tener control sobre ellos, en este sentido, se reporta una eficiencia promedio de recolección de 42% de residuos orgánicos, lo que indica un área de oportunidad para seguir mejorando en la recolección selectiva de estos.

En cuanto al tratamiento de los residuos sólidos, se estima que el 64% de los residuos recolectados son enviados a estaciones de transferencia, de este porcentaje 1673 t/día se trasladan a plantas de selección, en las que se efectúa la recuperación manual de materiales que sean susceptibles de ser aprovechados, como cartón, PET, papel, vidrio, metales, entre otros; por otra parte 1,383 t/día de residuos orgánicos son provenientes de estaciones de transferencia y de recolección dentro de las alcaldías son enviados a plantas de composta de residuos, para posteriormente ser empleados en suelos agrícolas o parques, jardines y áreas verdes de la ciudad (SEDEMA , 2019).

¹ Encuesta Intercensal, INEGI 2015

1.2 Justificación

El manejo de los residuos sólidos urbanos se ha convertido en un tema de gran tendencia y preocupación, tal situación obedece a la creciente expansión de los centros urbanos, consecuente a la generación de residuos y de efectos adversos a la salud pública y al ambiente (Kumar-Tyagi et al., 2018).

Diversos autores aseguran que la tecnología de digestión anaerobia se presenta como una buena opción de tratamiento de los residuos orgánicos en asentamientos urbanos para no sólo contribuir a la gestión de los residuos, sino también para contribuir a la generación de energía (Kumar & Samadder, 2020).

La digestión anaerobia cuenta con un amplio respaldo científico para su aplicación en la generación de biogás, y es una tecnología que es empleada a gran escala en países desarrollados. Sin embargo, en países en vías de desarrollo aún no está ampliamente establecida, pero con un gran potencial para su implementación (Vögeli et al., 2014).

De acuerdo con los datos reportados por la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México, se entiende que la situación de los residuos representa un gran reto, por las características, por el volumen de generación y por las condiciones de estos.

Actualmente no se cuenta con un sistema integral para el tratamiento de los residuos, las acciones que se llevan a cabo están enfocadas en la separación diferenciada de orgánicos e inorgánicos; el traslado a plantas compactadoras para reducir su volumen y facilitar su manejo, en plantas de composta y principalmente los residuos recolectados se envían a rellenos sanitarios para su disposición final.

Las tendencias mundiales implementadas principalmente en países desarrollados indican una reducción en el uso de rellenos sanitarios como medida de mitigación de impactos ambientales principalmente debido a la generación de gases de efecto invernadero, la afectación de los suelos, lixiviados, olores, fauna nociva. Su uso se ha limitado solamente a aquellos residuos que no tienen un potencial de aprovechamiento (Campuzano & González-Martínez, 2015).

Ante este panorama, se han entregado propuestas, como el programa “Basura Cero”, que plantea un aprovechamiento de 10,700 t/día para el año 2030 (SEDEMA, 2019), mediante el reciclaje, composta, valorización y la generación de combustibles alternos. Esto con el fin de aprovechar los recursos financieros que actualmente están destinados para el manejo y la disposición final y convertirlos en inversión de infraestructura para el tratamiento.

Además, el Mapa de Ruta Tecnológica del Biogás (CEMIE-Bio, 2017), identifica entre los retos el diseñar e implementar un programa para la instalación de plantas de biogás en alguna ciudad del país, con dimensiones industriales como un programa piloto para desarrollar y fortalecer el mercado del biogás en México.

1.3 Preguntas de investigación

- ¿Una planta de digestión anaerobia que procese la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos en la Ciudad de México, es una opción viable técnica, ambiental y económicamente para contribuir al manejo de los residuos y aprovechar su potencial energético asociado?
- ¿Cuáles son las condiciones para la implementación de una planta de digestión anaerobia con una capacidad de 50,000 toneladas anuales y cuál es su potencial de aprovechamiento?
- ¿Cuál es el potencial técnico para la producción de biogás?

1.4 Objetivo General

Realizar un estudio de prefactibilidad de un proyecto de inversión para la generación de biogás mediante la tecnología de digestión anaerobia de 50,000 toneladas anuales de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos generados en la Ciudad de México.

1.5 Objetivos Específicos

- Elaborar un análisis de la situación de los residuos en la Ciudad de México para determinar el potencial de contribución del procesamiento de 50,000 toneladas al año de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos urbanos en una planta de Digestión Anaerobia.
- Realizar un análisis técnico mediante el cual se establezcan las características propuestas para la planta tal como selección de tecnología, capacidad, y localización que resulte más conveniente.
- Elaborar un análisis económico-financiero a partir de la identificación de las áreas de oportunidad y la información técnica, que será reflejado con un estimado de costos de inversión clase V.

2. ANTECEDENTES

2.1 Digestión Anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso biológico en el que la materia orgánica se degrada mediante un proceso complejo de reacciones bioquímicas las cuales requieren de ciertas condiciones para llevarse a cabo (ausencia de oxígeno, temperatura y pH adecuados) y que da como producto una mezcla de gases llamada biogás. El biogás que se obtiene está conformado en mayor proporción por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), entre otros productos (Wang & Bo, 2014).

El desarrollo de esta tecnología estuvo enfocado en un principio a la aplicación en sistemas de tratamiento de aguas residuales, este desarrollo permitió llevar a cabo mejoras en el proceso y al diseño y aplicación de reactores completamente agitados (CSTR) con calentamiento, tales como los que se emplean actualmente (Abbasi et al., 2012). La aplicación los sistemas de digestión anaerobia para el tratamiento de aguas residuales estuvo estimulada por los drásticos aumentos en los precios de los combustibles fósiles en la década de 1970, además de los crecientes controles ambientales (Abbasi et al., 2012).

Los beneficios que brinda este proceso son diversos, entre ellos se encuentran la sanitización de los desechos orgánicos mediante el cual se tiene un impacto significativo al ambiente y salud pública, además, aborda el problema de la contaminación causado por la emisión de gases de efecto invernadero; el digestato que resulta de este proceso contiene nutrientes para la fertilización de suelos, y principalmente la digestión anaerobia genera biogás como una fuente de energía renovable (Manyi-Lo, 2019).

2.1.1 Ruta biológica de la Digestión Anaerobia

Este proceso de biometanización, como también es conocido, consta principalmente de cuatro etapas: Hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Es un proceso complejo que requiere de condiciones controladas para la producción de

biogás: pH, Temperatura, Tiempo de retención hidráulica, velocidad de carga orgánica (Mizanur & Yeoh, 2018).

Hidrólisis: En esta etapa se llevan a cabo procesos de solubilización y despolimerización, en los cuales, complejos compuestos orgánicos poliméricos (como carbohidratos, lípidos y proteínas) se degradan en monómeros solubles (azúcares, aminoácidos); para efectos de diseño de procesos, esta etapa determina el tiempo de retención requerido en un reactor, por lo que se le considera una etapa limitante dentro del proceso de digestión anaerobia (Angelidaki & Karakashev, 2011).

Acidogénesis: Los compuestos formados durante la primera etapa, son degradados por bacterias fermentativas durante la segunda etapa que es la acidogénesis, en la que se forman ácidos grasos de cadena larga, ácido acético, dióxido de carbono (CO_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S) y amoníaco (NH_3) (Angelidaki & Karakashev, 2011).

Acetogénesis: La tercera etapa del proceso es la acetogénesis, en la que los ácidos orgánicos de cadena larga se convierten en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, los cuales dan paso a la última etapa que es la metanogénesis (Angelidaki & Karakashev, 2011).

Metanogénesis: Es la etapa final del proceso de Digestión Anaerobia, en la que se produce metano mediante dos grupos de microorganismos (arqueas), el primer grupo separa al acetato en metano y dióxido de carbono, y el segundo grupo utiliza al hidrógeno como donador de electrones y al dióxido de carbono como aceptor de electrones para producir metano (Wang & Bo, 2014).

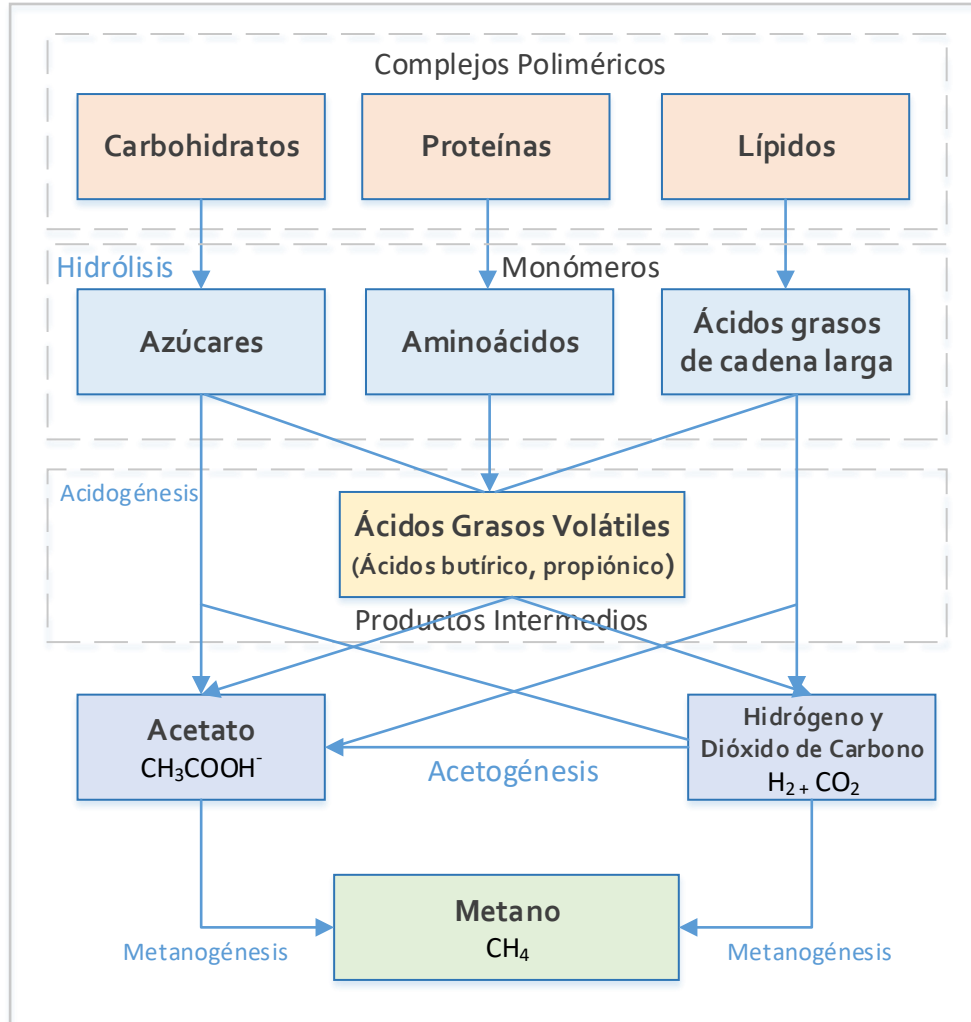


Figura 1. Proceso de digestión anaerobia.

(Wang & Bo, 2014)

2.2 Parámetros que influyen en la Digestión Anaerobia

La eficiencia de la digestión anaerobia es sensible a algunos parámetros críticos, es por esto por lo que es crucial que las condiciones para los microorganismos anaerobios sean apropiadas (Al-Seadi, 2012).

2.2.1 Definiciones

En principio, un digestor es el contenedor en el que se lleva a cabo la digestión anaerobia. Dentro de este, se encuentran presentes, residuos, agua y

microorganismos, a esto se le llama *sustrato*. La fracción sólida que resulta como un subproducto de la digestión anaerobia, se le conoce como *digestato*.

Para que el sustrato orgánico pueda ser susceptible del proceso de digestión anaerobia, se requiere controlar parámetros como: Temperatura, potencial de hidrógeno (pH), tiempo de retención y velocidad de carga orgánica.

El sustrato, se puede caracterizar de acuerdo con la Figura 2. Los sólidos totales (ST) se pueden dividir entre materia orgánica seca (sólidos volátiles "SV") y materia inorgánica seca. La materia orgánica seca es la que se degrada durante el proceso de digestión anaerobia.

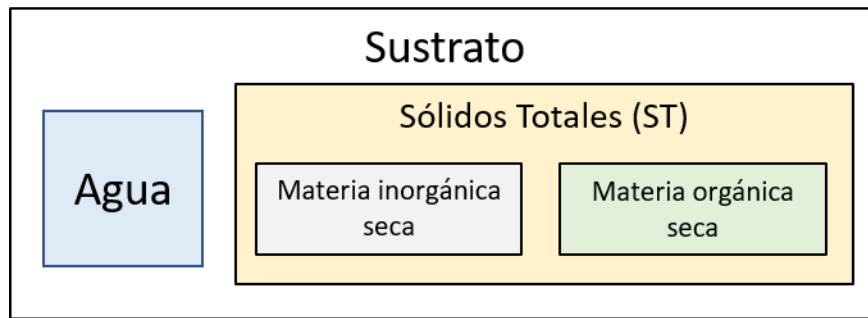


Figura 2. Descripción de sustrato.

2.2.2 Temperatura

La temperatura es uno de los parámetros más importantes en este proceso. La producción de metano está altamente influenciada por la temperatura, se relaciona con el próspero desarrollo de los microorganismos y el desempeño general de la digestión anaerobia dentro del reactor (Pramanik et al., 2019). Existen intervalos de temperatura en los que la digestión anaerobia puede llevarse a cabo:

Mesófila: 25-40°C

Termófila: 50-65°C

El intervalo de temperatura termófila tiene una ventaja en el rendimiento debido a las altas tasas de reacción, esto comparado con la mesófila para la etapa de hidrólisis. Sin embargo, para las etapas posteriores al proceso de digestión anaerobia, la operación en este intervalo de temperatura puede inhibir la producción de biogás (Mao

et al., 2015). Por lo tanto, los autores argumentan que las condiciones de temperatura óptimas para la digestión anaerobia serían en el intervalo termófilo para la etapa hidrólisis-acidogénesis y en el intervalo mesófilo para la etapa acetogénesis-metanogénesis, lo que consideran consistente con un proceso de digestión anaerobia de dos fases.

Por otro lado, (Ahmad-Mir et al., 2016), mencionan que la operación en condiciones de temperatura mesófilas tiene una tolerancia mayor a los cambios en el ambiente, brindando consorcios microbianos robustos y biodigestores estables, fáciles de operar y mantener y con bajos costos de inversión, lo que tiene atractivo en escala comercial.

2.2.3 Potencial de hidrógeno (pH)

El valor del pH es un indicador del funcionamiento del proceso dentro del reactor, el valor en el digestor no sólo determina la producción de biogás, sino también su composición (Manual del biogás, 2012). Durante el periodo inicial de la digestión, se producen grandes cantidades de ácidos orgánicos y el valor del pH disminuye, debido a estos cambios en el pH, a veces se requiere de una solución amortiguadora que estabilice el pH a un valor más neutral (Mizanur & Yeoh, 2018). El intervalo de pH óptimo de la etapa en la que actúan los microorganismos que producen el metano se encuentra en valores de pH= 6.5-7.5, con el fin de operar en valores neutros (Deublein & Steinhauser, 2008).

2.2.4 Tiempo de retención

Este parámetro se refiere a la duración en la que la materia orgánica (sustrato) y los microorganismos deben permanecer juntos en el biodigestor para completar la degradación del sustrato. Está relacionado con la tasa de crecimiento microbiana, la temperatura del proceso y la composición del sustrato. Existen tiempos de retención óptimos para una conversión biológica completa, estos son de 12-24 días para una operación en temperatura termófila, y de 15-30 días para un digestor mesófilo (Ahmad-Mir et al., 2016).

2.2.5 Carga Orgánica

El tiempo de retención y la carga orgánica, son los principales parámetros de diseño ya que definen el volumen del biodigestor. La carga orgánica, representa la cantidad de sólidos volátiles (SV) que son alimentados al biodigestor bajo condiciones de régimen permanente (Abbasi et al., 2012). La eficiencia en la generación de biogás se determina expresando el volumen de biogás producido por unidad de peso de Sólidos Volátiles (FAO, 2012).

Es importante controlar este parámetro, especialmente cuando la operación se realiza en régimen permanente, ya que una sobrecarga puede causar una falla en el sistema de digestión, debido a un incremento sustancial en la concentración de ácidos grasos volátiles, provocando una disminución en el pH y por lo tanto inhibiendo la etapa de formación del metano (Abbasi et al., 2012).

La Carga Orgánica (CO) describe la cantidad de sólidos volátiles introducidos en el digestor, expresada en kilogramos de SV por día y por metro cúbico del digestor ($\text{kgSV}/\text{m}^3\text{día}$).

Para reactores tipo CSTR (continuos agitados) la carga orgánica se encuentra en intervalos de 2-5 $\text{kgSV}/\text{m}^3\text{día}$, sin embargo, a valores más altos de CO el sistema se vuelve más sensible y requiere mayor monitoreo y control (Bachman, 2013). La Velocidad de Carga Orgánica se calcula con la siguiente ecuación:

Ecuación 1. Carga Orgánica en el Digestor.

$$CO \left(\frac{\text{kgSV}}{\text{m}^3\text{día}} \right) = \frac{\text{Sustrato alimentado} \left(\frac{\text{kg}}{\text{día}} \right) * ST(\%) * SV(\%)}{\text{Volumen del Digestor} (\text{m}^3)}$$

2.2.6 Relación C/N

La disponibilidad de nutrientes es de gran importancia para el crecimiento microbiano dentro de los digestores y la relación Carbono/Nitrógeno es un indicador que debe ser controlado y monitoreado para asegurar el mayor porcentaje de degradación de la materia orgánica (Tabatabaei et al., 2018). Autores como (Rehman et al., 2019) y (Abbasi et al., 2012) mencionan que la relación C/N óptima se encuentra en 20:1 C/N.

2.2.7 Tamaño de Partícula

El tamaño de partícula tiene un efecto en la digestión anaerobia, ya que, si el sustrato tiene un alto contenido fibroso y baja biodegradabilidad, la trituración de este incrementaría la producción de gas, por otro lado, esto puede hacer que la digestión sea más rápida. A tamaños de partícula menores, el área disponible para los microorganismos incrementa, dando como resultado un aumento en el alimento disponible para las bacterias, de esta manera la degradación anaerobia incrementa (Izumi et al., 2010)

2.2.8 Resumen de parámetros ideales

Los parámetros mencionados anteriormente están resumidos en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Resumen de parámetros ideales para digestión anaerobia.

Parámetro	Intervalo ideal	Valor óptimo	Referencia
Temperatura mesófila (°C)	25 – 40	37	(Pramanik et al., 2019)
Temperatura termófila (°C)	45- 60	55	(Pramanik et al., 2019)
pH	6.5 – 7.5	6.5	(Mizanur & Yeoh, 2018)
Relación C/N	20 - 20	Depende del sistema	Abbasi et al., 2012); (Laiq Ur Rehman et al., 2019)
Carga orgánica	2-8 kgSV/m3día	Depende del sistema	(Bachman, 2013); Abbasi et al., 2012)
Tiempo de retención	15 – 40	Depende del sistema	(Ahmad-Mir, Hussain, & Vermma, 2016)

2.3 Tipos de procesos anaerobios para la FORSU

En tanto que las características de los residuos determinan la tasa de biodegradabilidad y el potencial de producción de biogás, el diseño del proceso de la

digestión anaerobia tiene una gran influencia en el rendimiento práctico de la producción de biogás.

Los distintos tipos de procesos de digestión anaerobia llevados a cabo en los biodigestores se caracterizan principalmente por lo siguiente (Global Methane Initiative, 2016):

- Contenido de Sólidos Totales
- Régimen de alimentación
- Etapas del Proceso
- Temperatura

2.3.1 Tecnologías de Pretratamiento

Las características del sustrato es un criterio importante para la selección de la tecnología de pretratamiento, además de conocer el tipo de proceso de Digestión Anaerobia que se llevará a cabo (húmeda, o seca), ya que los sistemas de pretratamiento para digestión anaerobia húmeda comúnmente requieren de la eliminación de contaminantes antes de la digestión (Jürgen, 2018).

2.3.1.1 Sistemas de Pretratamiento Mecánicos

La principal función de estos pretratamientos es la trituración de los residuos orgánicos mediante martillos trituradores, generalmente estos equipos tienen la capacidad de remover los contaminantes plásticos que pueden estar presente en los residuos (Jürgen, 2018). Este es uno de los pretratamientos más simples y que tienen un efecto en el rendimiento del proceso (Bochmann & Montgomery, 2013)

2.3.1.2 Sistemas de Pretratamiento Térmicos

Seguido del pretratamiento mecánico el cual se emplea para homogenizar la materia orgánica, se puede realizar un pretratamiento térmico, el cual entre otras cosas sirve para aumentar la eficiencia de la primera etapa de la digestión anaerobia (Hidrólisis) y además conseguir la eliminación de microorganismos patógenos que inhiben el proceso (Jürgen, 2018).

2.3.1.3 Sistemas de Pretratamiento biológicos

La adición de enzimas se emplea para la descomposición de polímeros en el sustrato, particularmente los compuestos lignocelulosas, estas enzimas se pueden agregar directamente al reactor, o en una etapa previa a la alimentación al digestor (Bochmann & Montgomery, 2013)

2.3.1.4 Dilución

En algunos casos, dependiendo de las características del sustrato, específicamente el contenido de humedad de estos es necesario la adición de agua con la finalidad de homogenizarla y de disminuir la concentración de sólidos que se alimentan al digestor (Durán-Moreno et al., 2014)

2.3.2 Digestión húmeda y seca

Es posible hacer una distinción de las tecnologías de digestión anaerobia a partir del contenido de sólidos totales (ST), esto es una medida de la fracción sólida que está presente en la materia orgánica junto con agua (Pramanik et al., 2019). Dependiendo del contenido de humedad y por lo tanto de la concentración de sólidos totales contenidos en el sustrato de alimentación, el proceso de digestión se divide en dos grupos (Talia, 2018).

Tabla 2. Tipos de Digestión Anaerobia

Tipo de Digestión	Características	Ventajas	Desventajas
<p>Seca (>20% ST)</p>	<p>Sistemas típicamente con menos de 80% de contenido de humedad, la materia orgánica comúnmente se bombea dentro del reactor como residuo con alto valor de ST (Li, 2015). Comúnmente su operación es discontinua con reactores tipo Batch</p> <p>Las dos tecnologías más representativas del sistema húmedo son Valorga y DRANCO (Jenkins et al., 2008).</p>	<p>No se requiere de grandes cantidades de agua. Pretratamiento simple.</p>	<p>La operación en sistemas Batch requiere de mantenimiento constante No todo el material es digerido</p>
<p>Húmeda (<15% ST)</p>	<p>Estos sistemas requieren un contenido de humedad superior al 80%. Su operación comúnmente se lleva a cabo en reactores tipo CSTR (Li, 2015). Las dos tecnologías más representativas del sistema húmedo son BTA y WELTEC (Li, 2015).</p>	<p>El mezclado dentro del reactor favorece la digestión. La producción de biogás es más estable.</p>	<p>Requieren de pretratamiento de la materia orgánica Produce un mayor efluente</p>

2.3.2.1 Régimen de alimentación del sustrato

Otra distinción se puede hacer con base en el método de alimentación, de los cuales se desprenden dos tipos principalmente: Continuo y discontinuo (batch o por lotes) (Siddarth et al., 2015).

2.3.2.2 Régimen Continuo

En el proceso continuo, el sustrato es alimentado constantemente y como consecuencia se tiene una producción de biogás estable. Para este proceso destacan distintos reactores entre los cuales se encuentran:

a. Reactor de flujo pistón (Plug Flow)

Este sistema consiste en un reactor comúnmente de concreto, sin sistemas de mezclado para tratar principalmente efluentes líquidos. En los reactores flujo pistón, el contenido de sólidos totales es menor al 10%. (Talia, 2018)

b. Reactor continuo agitado (Continuous Stirred Tank Reactor CSTR)

Este es el tipo de reactor más comúnmente utilizado bajo condiciones de operación húmedas. Este reactor es adecuado para la digestión de una variedad de sustratos desde agrícolas, animales y residuos sólidos urbanos. Es normalmente de estructura cilíndrica con un sistema de mezclado y puede ser operado en intervalos de diferentes temperaturas. (Talia, 2018)

Generalmente se compone de un digestor en el cual, la materia prima es alimentada regularmente y de la misma manera el digestato es retirado del biodigestor una vez que ha cumplido el tiempo de retención hidráulico, el proceso continúa sin interrupción, a excepción de paros por mantenimiento o limpieza. Es posible que exista un proceso continuo en una etapa simple o en dos etapas separadas (Siddarth et al., 2015).

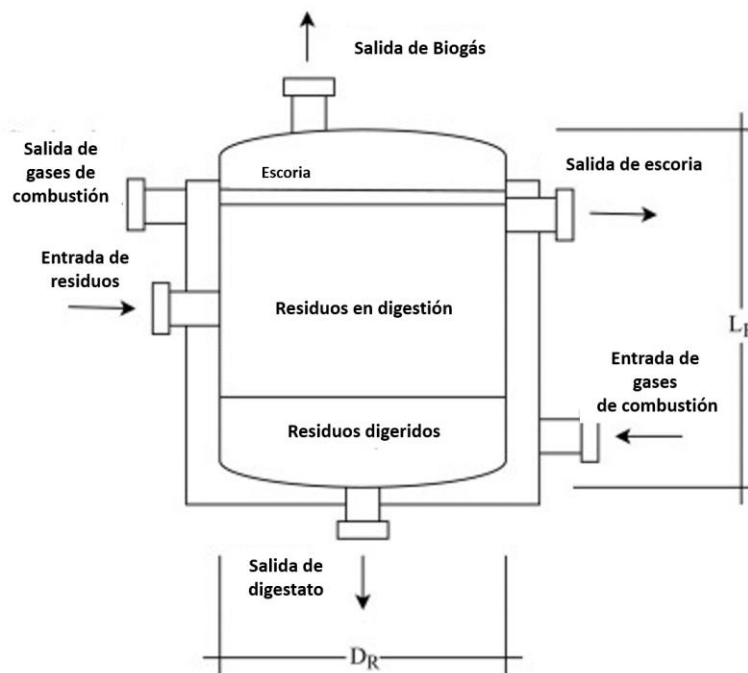


Figura 3. Reactor tipo CSTR para digestión anaerobia.

Fuente: (Arango-Osorio et al., 2019)

2.3.2.3 Régimen discontinuo

En este tipo de proceso, la alimentación se realiza por intervalos, el reactor es cargado una vez y el digestato formado durante la digestión es recirculado hasta que termina el ciclo, una vez que se ha completado el tiempo de retención requerido, el reactor es vaciado para comenzar un nuevo ciclo. (Vögeli et al., 2014)

Un proceso por lotes requiere menos equipo de mezclado y pretratamiento en comparación con el proceso continuo, sin embargo, este proceso produce 20% menos metano que el proceso continuo, además requiere un volumen de reactor mayor. (Goossensen, 2017)

2.3.2.4 Etapas del Proceso

Otra distinción del proceso puede hacerse entre las fases de digestión, la lógica detrás de esta separación de etapas es para secuenciar las reacciones bioquímicas que no necesariamente comparten las mismas condiciones óptimas de operación generalmente entre una etapa, dos etapas o multietapas. En los procesos de una sola etapa, los cuatro procesos que componen la digestión anaerobia son llevados a cabo en el mismo reactor, el cual debe contener las condiciones adecuadas para todas las fases. En un proceso de dos etapas, el primer reactor cuenta con las condiciones óptimas para desarrollar la hidrólisis, acidogénesis y acetogénesis, mientras que el segundo reactor se encarga de la formación de metano, ambos reactores proveen de las condiciones de temperatura adecuadas para cada etapa (Li C. , 2015).

2.3.2.5 Temperatura de operación

La temperatura tiene una influencia muy importante en el proceso de digestión anaerobia, debido a que los microorganismos son muy sensibles al cambio de temperatura es importante mantenerla en un valor óptimo para el desempeño de la digestión. Los procesos mesófilos se llevan a una temperatura de entre 30-38 °C, comparado con las temperaturas termófilas, este proceso requiere menos energía para su operación. Por otro lado, los procesos termófilos, cuya temperatura de operación de encuentre entre 50-60°C, requieren mayor energía para su desempeño y por lo tanto la producción de biogás es más rápida, sin embargo, los procesos

mesófilos tienen la ventaja de ser más resistentes a las fluctuaciones en las condiciones ambientales, como la temperatura (Li C. , 2015).

2.4 Subproductos de la Digestión Anaerobia.

El proceso de Digestión anaerobia ha sido descrito previamente, a continuación, se presentan los productos que pueden ser obtenidos de este proceso.

2.4.1 Biogás

De una forma general el biogás es un gas combustible derivado de la descomposición biológica de residuos orgánicos bajo condiciones anaerobias. Este producto consiste principalmente de 55-70% de metano (CH_4), de 30-45% de dióxido de carbono (CO_2), mezclado con trazas de otros gases como: nitrógeno (N_2) hidrógeno (H_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S), amoníaco (NH_3) así como vapor de agua (Ghasemi et al., 2018). La composición del biogás en el proceso de digestión anaerobia dependerá de las características del material digerido y del funcionamiento del proceso.

La generación de biogás a partir de biomasa proveniente de la FORSU está relacionada con la composición de esta última, la parte aprovechable del biogás es el metano contenido en el biogás, el cual debe contener una composición superior al 45% de CH_4 para que sea inflamable y susceptible de ser aprovechado (Deublein & Steinhauser, 2008). El biogás tiene características específicas que pueden variar dependiendo del sustrato del que se obtenga.

En la **Tabla 3**, se muestra la composición típica del biogás. Bajo condiciones normales de presión y temperatura (20°C y 1 atm), el biogás es un gas incoloro e inodoro. El dióxido de carbono contenido en el biogás no tiene algún valor calorífico ya que no es combustible, por lo tanto, el contenido energético del biogás va de los 6-6.5 kWh/m³ dependiendo del contenido de metano.

Tabla 3. Características del Biogás

Composición	55-75% metano (CH₄) 25-45% dióxido de carbono (CO₂)
Contenido energético	5.5 – 7.5 kWh/m ³
Equivalente de combustible	0.60 – 65 L petróleo/m ³ biogás
Temperatura de ignición	650 – 750°C
Densidad normal	1.2 kg/m ³
Olor	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa Molar	16.043 kg/kmol

Fuente: Elaboración propia con datos de (Deublein & Steinhauser, 2008), (Akunna, 2019) & (Olivard, 2017)

2.4.2 Energía asociada al biogás

La energía asociada al biogás puede ser cuantificada utilizando el valor calorífico inferior del metano. Se considera que el gas se encuentra en valores normales de presión, representando la unidad como metros cúbicos normales (Nm³).

Ecuación 2. Valor Calorífico Inferior del Biogás.

$$\text{Valor Calorífico Inferior (Biogás)} = h_{fCH_4}^0(g) - h_{fCO_2}^0(g) - 2h_{fH_2O}^0(g)$$

Ecuación 3. Valor Calorífico Inferior del metano.

$$VCI (CH_4) = 35.9 \text{ MJ/Nm}^3 = 10 \text{ kWh/Nm}^3$$

La energía contenida en el biogás está principalmente asociada con el metano. Es decir, si una corriente de biogás contiene 70% de metano y 30% de CO₂, entonces tendremos la misma energía asociada a 0.7 litros de metano y a un litro de biogás. Por lo tanto, la energía de un determinado volumen de biogás se calcula de acuerdo con su composición de metano (Olivard, 2017)

Ecuación 4. Energía asociada al biogás.

$$5.5 \text{ kWh/Nm}^3 \leq VCM (\text{Biogás}) \leq 7.5 \text{ kWh/Nm}^3$$

2.4.3 Producción de Metano (CH₄)

Una vez definidas las características del biogás, el enfoque estará en la energía asociada al metano. Se debe tener presente que, por cada litro de biogás, existen al menos 0.3 litros de CO₂ y otros gases residuales. Sin embargo, se considera que esto no tiene un impacto en cuestiones energéticas, aunque se debe considerar este volumen al realizar el dimensionamiento de equipos (Olivard, 2017).

Se han realizado diversos estudios para medir la cantidad de metano obtenido mediante Digestión Anaerobia de diferentes tipos de residuos. Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 4. Producción de metano en FORSU.

Sustrato	Co-Sustrato/Tipo de Reactor	Producción de metano (Nm ³ /T SV)	Referencias
FORSU	CSTR	320	(Zhang & Banks, 2013)
FORSU	CSTR	530	(Zahedi et al., 2013)
FORSU	Batch	528	(Browne et al., 2013)
FORSU	Batch	634	(Durán-Moreno et al., 2018)
FORSU	Semicontinuo	545	(Campuzano & González-Martínez, 2015)
FORSU	Batch/Residuos ganaderos	310	(Durán-Moreno & Peña-Vargas, 2019)
FORSU	Batch	345	(Effenberger et al., 2016)

2.4.4 Tratamiento del biogás

Se ha mencionado anteriormente, que además de metano, el biogás contiene proporciones importantes de CO₂. Además de los gases mencionados anteriormente, contiene H₂S el cual tiene propiedades corrosivas importantes para tuberías y máquinas, así como también vapor de agua, el cual tiene el mismo efecto corrosivo. Existen diversas opciones de tratamiento para reducir la cantidad de gases corrosivos, estos tratamientos se requieren antes del uso final del biogás (Olivard, 2017). El mejoramiento del biogás consiste en la eliminación del CO₂, para alcanzar al menos un 96% de contenido de metano en el biogás, esto si su uso está destinado para almacenar o para usar como combustible.

El tratamiento del biogás necesario para su combustión y generación de energía eléctrica es la **desulfuración**. El sulfuro de hidrógeno (H_2S), debe ser removido debido a que es altamente corrosivo y puede dañar los equipos y tuberías.

2.4.5 Digestato

El digestato es el material restante después del proceso de Digestión Anaerobia. Su volumen se compone de aproximadamente el 90% de lo que inicialmente se alimenta al biodigestor, y usualmente es líquido. Además, presenta altas concentraciones de contaminantes orgánicos debido a que no toda la materia orgánica se degrada durante el proceso, además pueden contaminar el ambiente si no se disponen adecuadamente (Mata-Alvarez et al., 2000).

2.4.5.1 Tratamiento del digestato

La estabilización del digestato requiere de un tratamiento aerobio, mediante el cual los microorganismos aerobios procesarán la materia orgánica contaminante que resta y de esta manera, el digestato estabilizado puede usarse como fertilizante o como mejorador de suelos (Wang & Bo, 2014).

Cuando el digestato se estabiliza y se considera apto para su uso como fertilizante tiene gran valor. Los nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio no son removidos durante el proceso de DA, y están presentes en el digestato estabilizado en diferentes proporciones:

Tabla 5. Nutrientes presentes en el digestato.

Sustancia	Proporción
Nitrógeno	2.3 – 4.2 kg/t
Fósforo	0.2 – 1.5 kg/t
Potasio	1.3 – 5.2 kg/t

Fuente: (Olivard, 2017)

Estos nutrientes están fácilmente accesibles para las plantas, cuando se aplica en suelos. El uso del digestato como fertilizante ha sido probado y ha mostrado resultados favorables incluso en producción agrícola (Grigatti et al., 2020).

2.5 Procesos Comerciales de Digestión Anaerobia

Los diferentes procesos tecnológicos para la digestión anaerobia pueden ser configurados dependiendo de la combinación de las características mencionadas anteriormente, de esta manera los parámetros para la obtención de patentes de las diferentes compañías radican en los arreglos que estas proponen para sus procesos. En los países desarrollados, principalmente en Europa, existen procesos de alta tecnología para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos.

Existen una variedad de procesos comerciales disponibles con referencias de plantas exitosas, las cuales varían en sus condiciones de diseño y operación: digestión anaerobia húmeda y seca, temperatura (mesófila, termófila), tiempo de retención hidráulico, porcentaje de sólidos totales y capacidades de tratamiento (Rapport et al., 2012).

Actualmente, existen cerca de 540 plantas de biogás operando en Europa, la mayoría de ellas se encuentran en Alemania (195), Reino Unido (92) y Francia (44). Fuera de Europa, en Estados Unidos existen 50 plantas de este tipo, 25 en China, 20 en Canadá y algunas en el resto de Asia y América, se estima que existen cerca de 700 plantas de biogás alrededor del mundo (Jain, 2019).

En la **Tabla 6** se muestran los sistemas de digestión anaerobia más populares alrededor del mundo, así como algunos de sus parámetros de desempeño y costos de inversión.

Tabla 6. Tecnologías de Digestión Anaerobia Comerciales.

Tecnología	Planta de Referencia	Capacidad (t/año)	Biogás (Nm ³ /t)	Metano (Nm ³ /t)	Generación Energía eléctrica (kWh/t)	Consumo Energía eléctrica (kWh/t)	TRH (días)	%ST	T(°C)	Inversión (USD/t/año)	Referencias
BTA	Ontario, Canadá	150,000	105	71	220	33	15	12	37	-	(Arsova, 2010)
	Barcelona, España	250,000	80	44	175	25	14	10	37	512	(Arsova, 2010)
	Castellone, Italia	100,000	85	56	215	31	15	10	38	550	(Biotec, 2011)
Ros Roca	Vasteras, Suecia	23,000	100	55	195	15	20	12	37	375	(Monson et al., 2006)
	Alicante, España	52,000	125	70	220	12	19	10	38	535	(Korz, 2009)
	Ávila, España	72,000	120	65	190	20	20	15	38	557	(Korz, 2009)
STRABAG	Lille, Francia	108,600	92	58	220	17	20	10	37	455	(STRABAG, 2017)
	Bielorrusia	100,000	105	63	255	24	21	10	37	451	(STRABAG, 2017)
	Midenmeer, Holanda	80,000	103	66	245	24	21	12	36	431	(STRABAG, 2017)
WELTEC	Kettering, England	40,000	120	72	208	13	17	10	55	325	(WELTEC, 2020)
VALORGA	Hannover, Alemania	100,000	90	55	347	65	22	45	38	472	(VALORGA, 2020)
	Amiens, Francia	85,000	130	69	339	62	27	45	37	397	(Verma, 2002)
	Barcelona, España	218,000	135	75	357	77	25	42.5	35	446	(Ecoparc, 2020)
DRANCO	Victoria, España	134,250	134	76	328	62	26	45	55	226	(OWS, 2020)
	Brench, Bélgica	26,000	108	61	344	67	23	40	55	508	(OWS, 2020)
	Polsche, Alemania	100,000	113	64	370	74	25	48	53	583	(OWS, 2020)
KOMPOGAS	Villeneuve, Suiza	20,000	105	68	232	49	14	26	57	585	(Rapport J et al., 2012)
	Lenzburg, Suiza	5,000	105	58	226	36	14	28	58	550	(Rapport J et al., 2012)
	Oftelfingen, Suiza	13,800	120	72	251	68	16	28	55	575	(Rapport J et al., 2012)
BEKON	RendsBurg, Alemania	30,000	125	75	206	10	19	50	37	476	(BEKON, 2016)

A continuación, se realiza una breve descripción de las tecnologías de digestión anaerobia húmeda, BTA (continua, una etapa), WAASA (continua, una etapa), y de digestión anaerobia seca: Dranco (continua, una etapa).

2.5.1 Tecnología BTA

El proceso BTA desarrollado en Alemania y con plantas localizadas en Europa, Canadá y Japón, se enfoca en el tratamiento de los residuos sólidos urbanos y su fracción orgánica, consiste en dos etapas principales, la primera que se encarga del pretratamiento de los residuos y la segunda que es el proceso de digestión anaerobia. En la etapa de pretratamiento los residuos se diluyen en hidrotrituradoras con agua de proceso de recirculación con la finalidad de conseguir un contenido de sólidos totales de entre 10-12%, además de conseguir la separación de materiales que no son adecuados para la digestión anaerobia como plásticos, textiles, madera o fracciones más pesadas como rocas o huesos. Una vez que la materia orgánica que será degradada está acondicionada, se lleva a cabo el proceso de digestión anaerobia generalmente bajo condiciones mesófilas de entre 35-38 °C (BTA International GmbH, 2021)

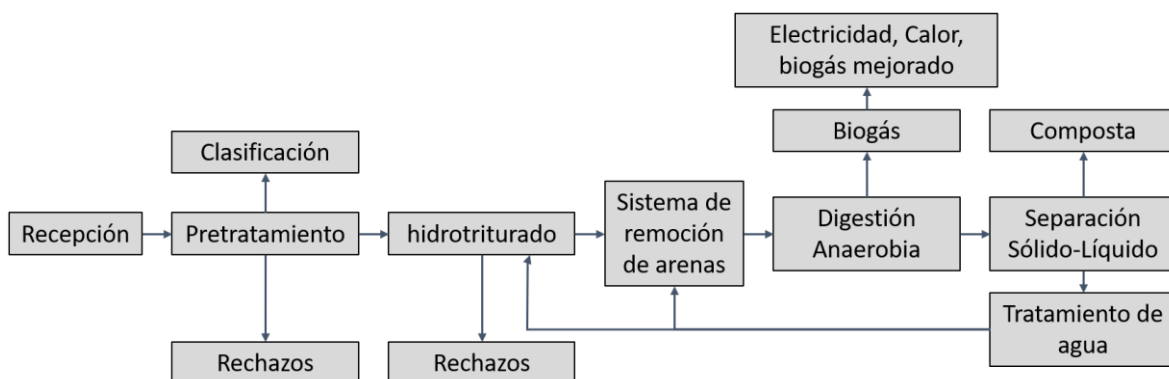


Figura 4. Esquema del proceso BTA

Fuente: Elaboración propia con información de (BTA International GmbH, 2021)

2.5.2 Tecnología WAASA

Este proceso, desarrollado en Finlandia en 1989, consiste en un sistema de digestión anaerobia húmeda de una etapa. La fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos es triturada, homogenizada y diluida en una hidrotrituradora con agua de proceso recirculada, para alcanzar la concentración de sólidos totales deseada (10-15%). Se inyecta vapor a la hidrotrituradora con la finalidad de pasteurizar la materia orgánica, una vez concluido este proceso, se realiza la digestión anaerobia en un reactor agitado mediante impulsores mecánicos y la inyección del propio biogás generado. El biodigestor contiene una precámara la cual ayuda a la inoculación ya que parte de la materia digerida es recirculada e introducida al sustrato nuevo con la finalidad de minimizar la formación de ácidos (Rapport J. , Zhang, Jenkins, & Williams, 2009).

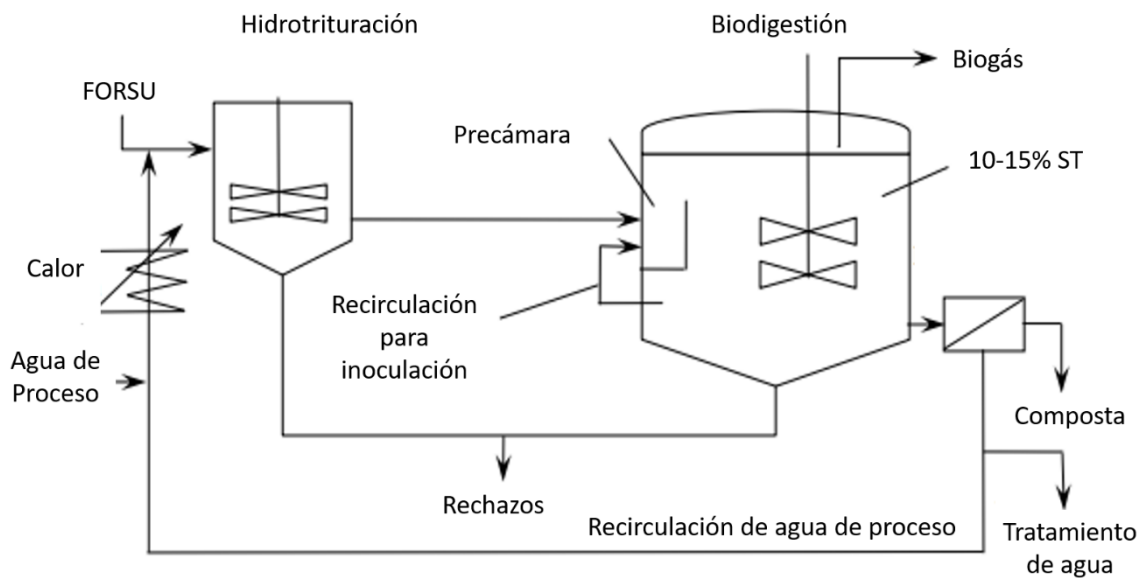


Figura 5. Esquema del proceso WAASA

Fuente: Adaptado de (Rapport et al., 2009)

2.5.3 Tecnología DRANCO

El proceso DRANCO (Dry Anaerobic Composting) fue desarrollado por Organic Waste Systems (OWS) en Bélgica en 1988. Es un proceso de alto contenido de sólidos totales, de una etapa de digestión anaerobia que opera en condiciones termófilas. La materia orgánica es introducida en la parte superior del reactor, desplazándose hacia el fondo cónico del mismo en donde el digestato es removido. Una fracción del digestato es transferida a la bomba de mezclado con la finalidad de inocular el nuevo material mientras que una corriente de vapor se encarga de llevar la carga de alimentación a la temperatura de operación. El resto del digestato es secado para recuperar agua de proceso. No existe agitación en el reactor, únicamente la generada por el movimiento de la materia hacia la parte inferior. El digestato seco es estabilizado aerobiamente para su uso como composta (Rapport et al., 2009).

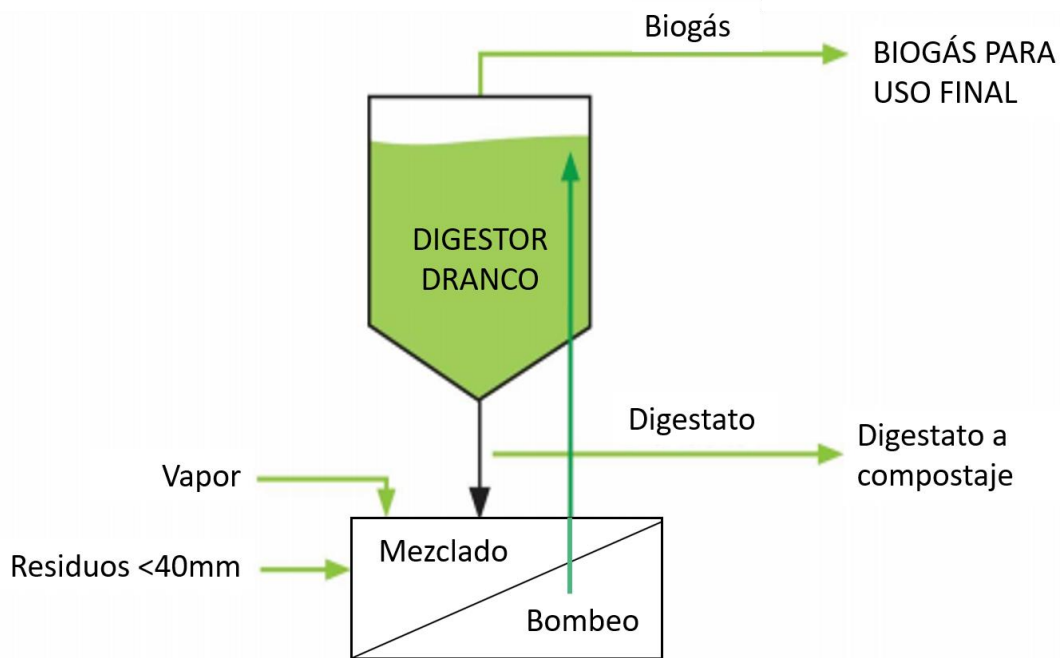


Figura 4.5. Esquema del proceso DRANCO.

Fuente: Adaptado de (De Baere L. , 2012)

2.5.4 Tecnología VALORGA

Este proceso consta de un digestor seco, de una sola etapa que trata residuos sólidos orgánicos con un porcentaje de sólidos totales de entre 25-30% ST, el sistema de mezclado es a través de biogás a presión, esto ayuda a eliminar la recirculación para inocular el digestor. El digestor con una geometría cilíndrica contiene una partición en 1/3 del diámetro, en esta partición se alimentan los residuos por la parte de abajo lo que genera que el material entrante fluya alrededor de la pared antes de salir. Los residuos con menos de 20% ST no tienen buen desempeño en esta tecnología, debido a que tapan las entradas de biogás para mezclado. El tiempo de retención hidráulico es del orden de 21 días y los rendimientos de biogás reportados son de 220-270 m³/t de SV (Rapport et al., 2012). En la **Figura 6** se muestra un diagrama del digestor.

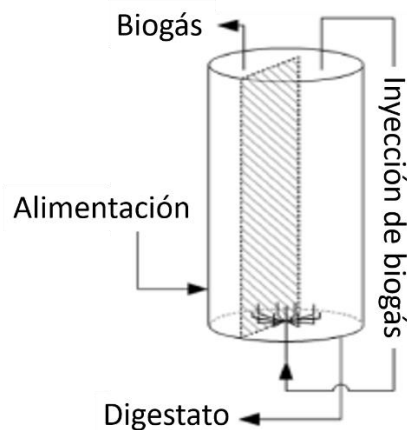


Figura 6. Diagrama del proceso Valorga.

Fuente: Adaptado de (Rapport et al., 2012)

2.6 Residuos Sólidos Urbanos

Los residuos sólidos urbanos generados por las actividades humanas y otros procesos productivos, son una forma de energía renovable indirecta, toda vez que se consideran flujos de energía potencial constante en nuestro ambiente; estos surgen tanto de actividades económicas, como de desechos domiciliarios y urbanos (incluyendo aguas residuales), el potencial de generación de energía de este tipo de fuente, es principalmente debido al contenido de biomasa (Twidell & Weir, 2015).

De acuerdo a la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) los RSU son: “Los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados por esta Ley como residuos de otra índole”.

Las características de los residuos sólidos urbanos (RSU), dependen de las características del lugar donde se recolecten y de los propios residuos como:

- Composición: Esta es una de las características más importantes, ya que de ella depende la disposición y el potencial aprovechamiento energético. La composición varía de una comunidad a otra.
- Humedad: El contenido de humedad varía entre el 15 y 30%.
- Tamaño de partícula: Esta característica es particularmente importante para el procesamiento y para la recuperación de los materiales que son potencialmente utilizables.
- Composición Química: Típicamente los residuos contienen un alto contenido de humedad en comparación con otros componentes como pueden ser materia volátil, compuestos de carbono, hidrógeno, oxígeno y sulfuros.
- Densidad: La densidad de los residuos varía dependiendo de la ubicación, la temporada, el clima, la humedad, entre otros factores².

Una parte importante de la situación de los residuos es su disposición final, en la que los residuos son confinados en lugares en los que tiene un menor impacto en la sociedad y el ambiente. Existen diversos métodos de gestión de residuos, entre los cuales se encuentran la disposición en rellenos sanitarios o tiraderos a cielo abierto, este método es el más común en México debido a sus bajos costos, es posible el aprovechamiento del metano generado naturalmente y a través de digestores

² Capítulo 12, Environmental Engineering, Matthews, R, Weiner, R.

anaerobios, de este método de disposición, aunque es importante que los residuos sólidos orgánicos hayan sido previamente separados en la fuente.

2.6.1 Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU)

La Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos, es la materia orgánica susceptible de ser degradada la cual representa cerca del 50% de los residuos sólidos urbanos, está conformada principalmente de residuos de comida entre otros compuestos orgánicos (Kaza et al., 2018). Está constituida por lípidos, carbohidratos y proteínas y material lignocelulósico, lo que permite que bajo ciertas condiciones se lleve a cabo el proceso de digestión anaerobia.

2.6.2 Generación de residuos

La generación de residuos es producto de la urbanización, el desarrollo económico y el crecimiento poblacional. A medida que las ciudades crecen y se desarrollan se requieren más productos y servicios para satisfacer las necesidades de la población, esto provoca que las ciudades se enfrenten a los retos que representan las grandes cantidades de residuos y la gestión que requieren, desde su generación, recolección, tratamiento y disposición (Kaza et al., 2018).

De acuerdo a un reporte publicado por el Banco Mundial, la relación que existe entre el crecimiento poblacional, el estilo de vida, la ubicación y el desarrollo de las ciudades provocará que la generación de residuos incremente considerablemente, para el caso de América Latina, se reporta que, en 2016, se generaron 231 millones de toneladas de residuos, y se proyecta que para el año 2030 esa cifra aumente un 25%, y para el año 2050 un incremento del 60% con respecto al año 2016.

En México, la generación de residuos sólidos urbanos se sitúa en 120,128 t/día, con un peso volumétrico promedio de 140.4 kg/m³, de acuerdo con los datos publicados en el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos (SEMARNAT, 2020). Los datos de generación dentro del país varían geográficamente, esto es principalmente por las diferencias en la distribución de la población en las diferentes regiones del país, los mayores volúmenes de residuos se producen en zonas con

mayor concentración de población, en este sentido, en la región centro del país excluyendo a la Ciudad de México, se generaron el 51% de los residuos, las condiciones que presenta la Ciudad de México son de condiciones especiales, ya que en esta entidad se generaron el 12% de los residuos de todo el país (SEMARNAT, 2016).

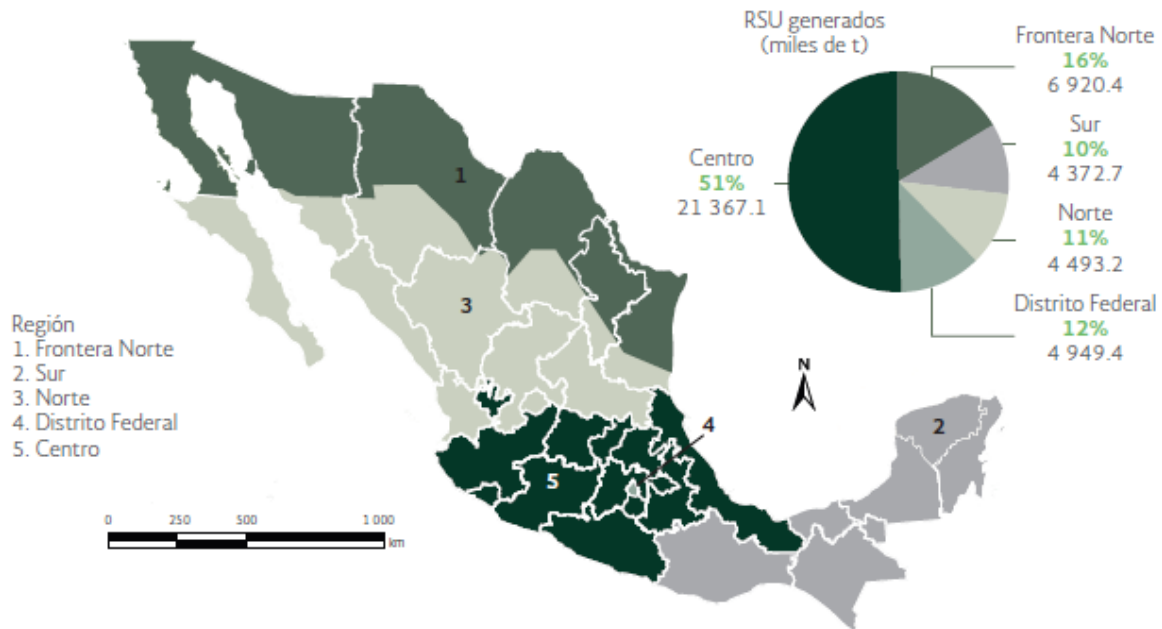


Figura 7. Generación de residuos sólidos urbanos por región (SEMARNAT, 2016)

2.6.3 Composición de los residuos sólidos urbanos

La composición de los residuos consiste en la categorización de los tipos de materiales de los residuos sólidos urbanos, generalmente se determina mediante una inspección estandarizada, en la que se toman muestras de los desechos provenientes de las fuentes generadoras o de sitios de disposición, y son clasificadas y pesadas en categorías predefinidas.

Así como la generación de residuos varía dependiendo de la zona o del estilo de vida de la población de cada región, la composición también muestra estas variaciones. A nivel mundial la categoría que presenta la mayor proporción de los residuos corresponde a materia orgánica y desechos de comida principalmente. En la región de Latinoamérica, alrededor del 50% de los residuos generados corresponden a desechos de comida y materia orgánica, en México, anualmente se desperdician

cerca de 28 toneladas de alimentos, la pérdida de alimentos y generación de residuos orgánicos se observa en toda la cadena de suministro, ya sea por la producción excesiva, daño en productos, o falta de infraestructura (SEMARNAT, 2019). En la Figura 8 se muestra la composición de los residuos sólidos urbanos en México.

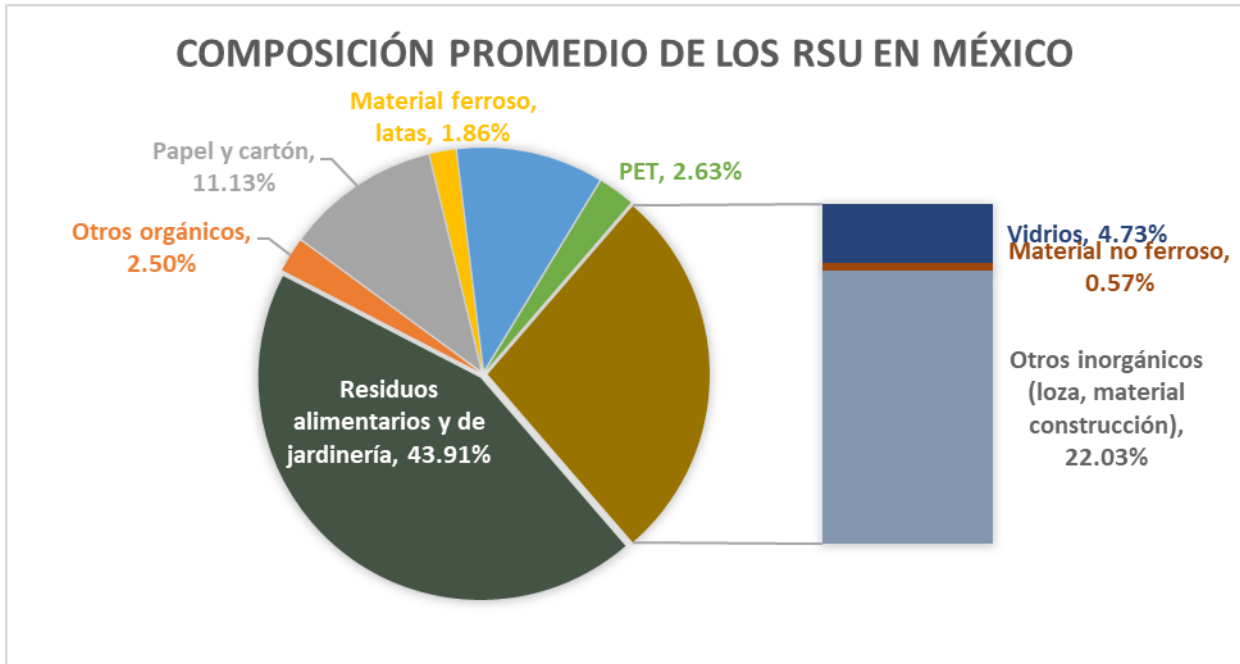


Figura 8. Composición de los residuos en México.

Fuente: (SEMARNAT, 2020)

En la siguiente tabla, se muestran los subproductos que corresponden a los Residuos Sólidos Urbanos en México. Se dividen en tres grandes categorías, de las cuales, los orgánicos corresponden al mayor porcentaje (46.42%), seguida por los inorgánicos susceptibles de aprovechamiento (31.55%) y finalmente los inorgánicos que no son susceptibles de aprovechamiento (22.03%). Existen algunas diferencias en estos porcentajes, dependiendo de la región del país en donde se generen. Sin embargo, la generación de residuos orgánicos es la que predomina en el país, con casi el 50% de contribución (SEMARNAT, 2020).

Tabla 7. Composición de los Residuos Sólidos Urbanos en México.

Categoría	Subproductos	Porcentaje
Orgánicos (46.42%)	Residuos alimentarios	33.07%
	Residuos de jardinería	10.84%
	Madera	0.79%
	Fibra dura vegetal	0.73%
	Hueso	0.52%
	Cuero	0.46%
Inorgánicos susceptibles de aprovechamiento (31.55%)	Cartón	4.55%
	Envase de cartón encerado	1.51%
	Fibras sintéticas	0.34%
	Hule	0.54%
	Lata	0.98%
	Material ferroso	0.88%
	Material no ferroso	0.57%
	Papel	5.07%
	PET	2.63%
	Plástico rígido y de película	7.66%
	Poliestireno expandido	1.55%
	Poliuretano	0.55%
	Vidrio de color	1.60%
Vidrio transparente	3.13%	
Inorgánicos no susceptibles de aprovechamiento (22.03%)	Algodón	0.15%
	Loza y cerámica	0.46%
	Material de construcción	0.70%
	Pañal desechable	6.75%
	Residuo fino	2.25%
	Trapo	2.82%
	Otros	8.90%
Total		100%

Fuente: (SEMARNAT, 2020)

2.6.4 Recolección de residuos y su disposición final

La recolección es un servicio público que comprende la colecta de los RSU en el sitio donde se produce (casas, comercios, industrias) y su traslado hasta el sitio donde se tratan o disponen. El nivel y eficiencia de recolección difiere entre regiones, de acuerdo con datos de (SEMARNAT, 2016), en México la recolección se sitúa en 93.4% del total de residuos generados.

La disposición final de los residuos tiene que ver con su depósito o confinamiento permanente en sitios e instalaciones que permitan evitar su diseminación y las posibles afectaciones a los ecosistemas y a la salud de la población.

En México la solución más utilizada para la disposición final de los residuos sólidos urbanos son los rellenos sanitarios. La infraestructura de los rellenos sanitarios debe incorporar obras de ingeniería particulares y métodos que permitan el control de los lixiviados y el manejo de los biogases generados. En 2020 a nivel nacional, la disposición final en rellenos sanitarios y sitios controlados se sitúa en 86,352 t/día de residuos (SEMARNAT, 2020).

En la actualidad todas las entidades, excepto la Ciudad de México, cuentan con rellenos sanitarios para disponer sus residuos. Los residuos de la Ciudad de México se disponen en cuatro rellenos sanitarios en el Estado de México: La Cañada, Cuautitlán, El Milagro y Tepoztlán; y uno más en el estado de Morelos, en Cuautla (SEMARNAT, 2016).

2.6.5 Costos por el manejo de residuos.

Sin duda, el problema de la gestión de los RSU no sólo tiene implicaciones ambientales o sociales, sino también económicas, en el actual esquema de manejo de residuos la mayoría se recolecta para ser depositados en rellenos sanitarios o sitios de disposición final. Los costos asociados se resumen en la tabla, estos muestran los costos promedio por tonelada recolectada, el cual es de \$434.03, mientras que en la disposición el costo promedio por tonelada es de \$121.58, para dar un total de \$551.61. En la Ciudad de México, estos costos son un poco más elevados, de acuerdo

con lo reportado por la SEDEMA, el costo total de manejo de residuos es de \$586 por tonelada (SEMARNAT, 2020).

Tabla 8. Costos promedio por el manejo de residuos.

Entidad	Costo por tonelada recolectada	Costo por tonelada dispuesta	Total
Promedio Nacional	\$434.03	\$121.58	\$555.61
Ciudad de México	\$394.00	\$192.00	\$586.00

Fuente: (SEMARNAT, 2020).

2.7 Aspectos Ambientales de la Digestión Anaerobia.

La recuperación de biogás a través de residuos orgánicos está asociada con algunos beneficios ambientales. (Wid & Horan, 2018) consideran que debido a que los recursos mundiales cada vez son más escasos, los residuos orgánicos ya no son vistos como desechos sino como una fuente para recuperar metano como fuente de energía, al mismo tiempo que se disminuyen los impactos al ambiente como la emisión de gases de efecto invernadero, los grandes volúmenes de residuos para disposición final y los lixiviados que estos residuos generan en estos sitios.

Entre los aspectos considerados que brindan estos beneficios se encuentran los descritos a continuación.

2.7.1 Reducción del volumen de residuos

Como se mencionó en el apartado 2.6.1, la FORSU representa cerca del 50% del total de residuos generados para los cuales la única opción de tratamiento es la composta de residuos orgánicos para remediación de suelos y del total de residuos generados, un porcentaje de 60% de estos se traslada a sitios de disposición final (SEDEMA, 2020).

El impacto de la digestión anaerobia sobre el volumen de residuos llevados a disposición final está relacionado con el contenido de materia orgánica susceptible de degradación (Olivard, 2017). Entre más se reduce el volumen de los residuos, los requerimientos de los rellenos sanitarios se reducen, así como el espacio requerido, se generan menos lixiviados, gases de efecto invernadero entre otros.

2.7.2 Reducción de lixiviados.

El lixiviado es un líquido con cierta concentración de sólidos el cual surge después del paso de una corriente líquida por los residuos. En los rellenos sanitarios, los lixiviados provienen de las precipitaciones sobre el sitio donde se encuentra la materia en disposición final y presenta valores altos de demanda química de oxígeno (DQO), pH, amoníaco, nitrógeno y concentraciones de metales pesados los cuales contaminan los suelos (Raghab, Meguid, & Hegazi, 2013).

2.7.3 Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero

El impacto de los rellenos sanitarios sobre el cambio climático se deriva de las emisiones de metano y dióxido de carbono principalmente, en conjunto con otros compuestos gaseosos, los cuales son un subproducto de la descomposición anaerobia de la materia orgánica en los rellenos sanitarios (Lou & Nair, 2009).

Los sitios de disposición final de residuos en operación emiten mayor cantidad de metano que aquellos fuera de operación, esto es debido a que la mayor parte de la degradación de la materia orgánica causante de la emisión de estos gases se da en los primeros años después de su disposición final, las tasas de emisiones de estos gases disminuyen con el tiempo, aunque después se mantienen constantes por un periodo de hasta 100 años (Singh et al., 2016).

Los gases emitidos por rellenos sanitarios están constituidos principalmente por metano (CH₄: 55-60% v/v) y dióxido de carbono (CO₂: 40-45% v/v), estos sitios contribuyen al calentamiento global principalmente por el efecto que tiene el metano en este, ya que tiene un potencial de calentamiento global 28 veces mayor al del CO₂ (Scheutz, Aghdam, & Kjeldsen, 2018).

Para entender este potencial de calentamiento global (Trottier, 2015) explica que se debe a que el metano tiene la capacidad de absorber una cantidad significativamente mayor de energía, su tiempo de vida media es de aproximadamente 12 años y es un precursor del ozono, el cual es en sí mismo otro gas de efecto invernadero.

El sector de los residuos sólidos urbanos contribuye significativamente en las emisiones de gases de efecto invernadero, de acuerdo con autores como (Scheutz et al., 2018), (Singh et al., 2016) y (Broun & Sattler, 2015) estos sitios son una de las mayores fuentes antropogénicas de metano, emitiendo cerca del 18% del total mundial.

Por otra parte, los beneficios que presenta la digestión anaerobia recaen en evitar las emisiones de metano a la atmósfera, capturando el metano para su aprovechamiento energético a través de la generación de electricidad. Adicionalmente, el impacto que tiene el CO₂ se considera mínimo ya que de acuerdo con (Lou & Nair, 2009) se tiene como consenso general el considerarlo como de origen biogénico y por lo tanto no contribuye a las emisiones de GEI que provocan el calentamiento global.

2.7.4 Recuperación de nutrientes

Otro indicador de los beneficios ambientales de la digestión anaerobia es la habilidad de esta tecnología de facilitar la recuperación, reutilización y reciclaje de nutrientes, ya que el digestato es considerado como una importante fuente de nutrientes y un sustituto sustentable a los fertilizantes convencionales (Vaneckhaute et al., 2013).

Los fertilizantes químicos comúnmente comercializados usualmente contienen nitrógeno, fósforo y potasio en proporciones variadas, en el caso de la digestión anaerobia estos nutrientes se encuentran presentes en el sustrato y no son removidos durante el proceso, por lo que estarán presentes una vez estabilizado el digestato.

De acuerdo con (Abdullahi, Suleiman, & Akunna, 2011) el uso del digestato como fertilizante ha demostrado el incremento en la producción agrícola, la composición del fertilizante se describe a continuación:

Nitrógeno: 2.3 - 4.2 kg/t

Fósforo: 0.2 – 1.5 kg/t

Potasio: 1.3 – 5.2 kg/t

2.8 Mapa de Ruta Tecnológica del Biogás

El mapa de ruta tecnológica del biogás es un instrumento que permite identificar los retos, las barreras y las propuestas para el uso de biogás como fuente de energía.

Este mapa de ruta plantea una visión al 2030, en la que se pretende alcanzar la meta de una capacidad instalada para biogás de 200 a 250 millones de m³ al año, con la finalidad de diversificar la matriz energética actual (CEMIE-Bio, 2017).

En la **Tabla 9** se muestran los principales retos técnicos identificados, los cuales comprenden las distintas etapas en la cadena de valor del biogás.

Tabla 9. Retos para el desarrollo de la industria de biogás hacia el 2030.

Retos	Resultados esperados	Acciones
-Desarrollar un catálogo de tecnologías de biogás aplicables a nivel nacional.	-Contar con información para la toma de decisiones a los interesados en bioenergía y generadores de residuos	-Recopilar casos nacionales e internacionales por tecnología, por materia prima y por beneficios, así como datos sobre costos y eficiencias
-Diseñar e implementar un programa para la instalación de plantas de biogás en diferentes ciudades del país	-Aumentar las capacidades tecnológicas nacionales con relación al diseño, construcción y operación de plantas de biogás.	- Diseñar, construir y operar una planta de biogás en una ciudad del país, con dimensiones industriales.
-Mejorar las especificaciones nacionales de diseño, construcción y operación de plantas de digestión anaerobia.	-Generar especificaciones y prácticas recomendadas para el manejo del biogás	- Analizar y adaptar la normatividad aplicable de seguridad para la operación de plantas de biogás.
- Promover el aprovechamiento de subproductos en la producción de biogás.	- Desarrollar proyectos demostrativos para aprovechar el digestato.	- Capacitar al sector agrícola sobre los beneficios económicos de la aplicación de los digestatos como fertilizantes.
- Impulsar el desarrollo del mercado de biometano	- Mejorar y difundir la aplicación de modelos que permitan evaluar técnica y económicamente los proyectos de biogás.	- Desarrollar estrategias de mercado en función de la capacidad de las plantas de biogás y de los límites inferiores de generación de energía.

Fuente: (CEMIE-Bio, 2017)

De manera general, en el mapa de ruta se identifican las principales barreras de carácter no-técnico para la implementación de proyectos de biogás, entre las que destacan las mencionadas en la **Tabla 10**.

Tabla 10. Barreras no-técnicas para el desarrollo del biogás.

Factor	Limitantes	Acciones sugeridas
Económico	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de esquemas de financiamiento. - Limitado desarrollo del mercado de biometano 	<ul style="list-style-type: none"> - Identificar los esquemas de financiamiento disponibles para proyectos de producción de biogás.
Recursos Humanos	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de grupos de especialistas que participen en proyectos de este tipo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Definir el perfil de especialistas requeridos en el desarrollo de proyectos de biogás.
Social	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de sensibilidad hacia el problema ambiental que ocasiona no disponer los residuos adecuadamente. - Falta de conocimiento de los beneficios sociales del aprovechamiento del biogás. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fomentar la sensibilidad hacia el problema ambiental. Implementar campañas de información sobre el uso de biogás
Regulatorio	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de cooperación entre los generadores para mejorar la calidad de la materia prima. 	<ul style="list-style-type: none"> - Implementar incentivos que impulsen a los generadores de desechos a una cooperación con la producción de biogás.

Fuente: (CEMIE-Bio, 2017)

2.9 Proyecto

La Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (Project Management Institute, 2017), define un proyecto como un esfuerzo temporal que se lleva a cabo para crear un producto, servicio o resultado único.

Producto, servicio o resultado único. Los proyectos se llevan a cabo para cumplir objetivos mediante la producción de entregables. Un objetivo se define como una meta hacia la cual se debe dirigir el trabajo, una posición estratégica que se quiere lograr, un fin que se desea alcanzar, un resultado a obtener, un producto a producir o un servicio a prestar. Un entregable se define como cualquier producto, resultado o capacidad única y verificable para ejecutar un servicio que se produce para completar un proceso, una fase o un proyecto. Los entregables pueden ser tangibles o intangibles.

El cumplimiento de los objetivos del proyecto puede producir uno o más de los siguientes entregables:

- Un producto único, que puede ser un componente de otro elemento, una mejora o corrección de un elemento
- Un servicio único o la capacidad de realizar un servicio
- Un resultado único, tal como una conclusión o un documento (como ejemplo un proyecto de investigación que desarrolla conocimientos que se pueden emplear para determinar si existe una tendencia o si un nuevo proceso beneficiara a la sociedad)
- Una combinación única de uno o más productos, servicios o resultados

2.9.1 Ciclo de Vida de un Proyecto

Dentro del marco de referencia para la dirección de proyectos, destacan las etapas del ciclo de vida de un proyecto, estos estándares describen los procesos de la dirección de proyectos empleados para cumplir con los objetivos del proyecto. Los procesos de la dirección de proyectos se agrupan en cinco Grupos de Procesos de la Dirección de Proyectos (Project Management Institute, 2017):

- **INICIACIÓN:** Proceso realizado para definir un nuevo proyecto o nueva fase de un proyecto existente al obtener la autorización para iniciar el proyecto o fase.
- **PLANIFICACIÓN:** Proceso requerido para establecer el alcance del proyecto, refinar los objetivos y definir el curso de acción requerido para alcanzar los objetivos propuestos del proyecto.
- **EJECUCIÓN:** Proceso realizado para completar el trabajo definido en el plan para la dirección del proyecto a fin de satisfacer los requisitos del proyecto.
- **MONITOREO Y CONTROL:** Proceso requerido para hacer seguimiento, analizar y regular el progreso y el desempeño del proyecto, para identificar áreas en las que el plan requiera cambios y para iniciar los cambios correspondientes.

- **CIERRE:** Proceso llevado a cabo para completar o cerrar formalmente un proyecto, fase o contrato.

2.9.2 Evaluación de Proyectos

La evaluación de un proyecto es el proceso de identificar, cuantificar y valorar los costos y los beneficios que se generen de este, en un determinado periodo de tiempo, teniendo como objetivo, determinar si la ejecución del proyecto es conveniente para su implementación o no (Meixueiro & Pérez-Cruz, 2008). De una forma general la evaluación de proyectos es un instrumento que permite la asignación de recursos para implementar iniciativas de inversión, el cual tiene como objetivo la recopilación, creación y análisis en forma sistemática de un conjunto de antecedentes justificativos para determinar cuantitativa y cualitativamente las ventajas y desventajas de una inversión, para asignar en forma racional los recursos a la alternativa más viable con la finalidad de apoyar en la toma de decisiones (Sapag-Chain & Sapag-Chain, 2008).

El proceso de evaluación de proyectos consta de las siguientes fases:

- **Identificación de oportunidades:** Se analiza la información que pone en evidencia la necesidad u oportunidad de inversión
- **Formulación y preparación del proyecto:** Consiste en la obtención de información con la finalidad de dar mayor definición al proyecto, mediante el estudio de mercado, el estudio técnico y el estudio de la organización
- **Evaluación Financiera:** Este análisis se realiza tomando como punto de referencia el dinero.
- **Evaluación Económica:** Este análisis se realiza tomando en consideración los costos y beneficios del proyecto.
- **Conclusiones:** Tomando en cuenta los análisis anteriores, se realiza una recomendación.

El alcance y la profundidad de los estudios para la evaluación dependerá de la fase en la que se desarrolla el proyecto, es decir, existe una relación entre la información obtenida y disponible que será tomada en cuenta para realizar la evaluación y el nivel de análisis de los estudios, de esta manera, en fases tempranas de un proyecto, la

incertidumbre debida a la disponibilidad y profundidad de la información es mayor que en fases avanzadas de un proyecto.

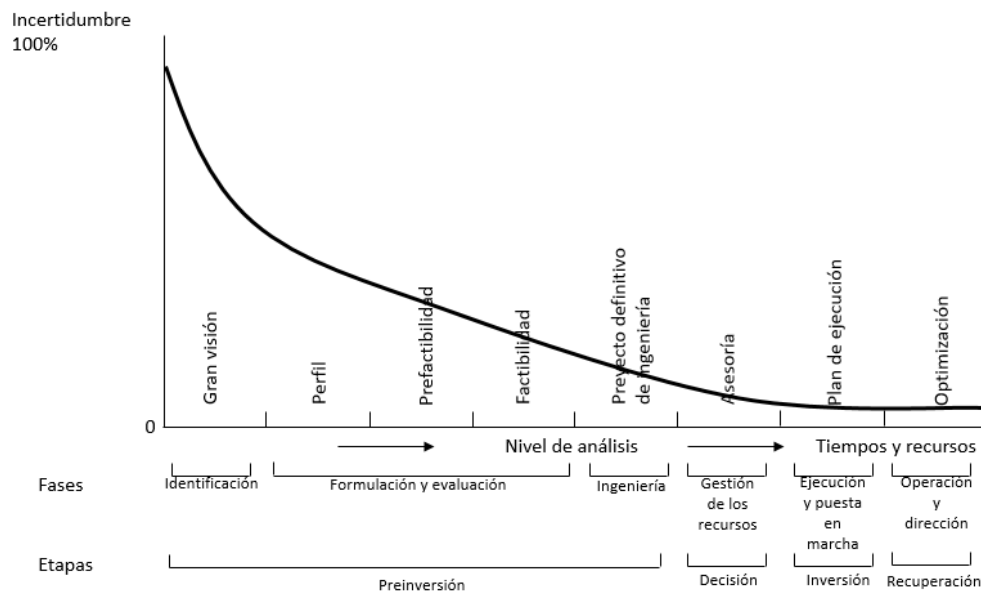


Figura 9. Nivel de análisis de los estudios para la evaluación de proyectos (Sapag-Chain, 2008).

2.9.3 Estudios de preinversión

Los estudios de preinversión son aquellos que se llevan a cabo para determinar la factibilidad de llevar a cabo un proyecto, el objetivo de estos estudios es reducir el riesgo de realizar un proyecto que no cumplirá con un objetivo de atención al asunto de interés para el que fue realizado.

Los estudios de preinversión pueden atender diferentes aspectos relacionados con los proyectos: de mercado, técnicos, legales, ambientales, económicos, financieros, institucionales o sociales (Morín et al., 2017)

2.9.4 Evaluación a nivel de perfil

Es la fase de formulación y evaluación de un proyecto que se encuentra dentro de la etapa de preinversión, en la que se incorpora información específica referente a la cuantificación del mercado y tamaño del proyecto, análisis de alternativas técnicas, estimación de los montos de cada componente de la inversión, de los costos

operativos y de los beneficios. A partir de esta información se realiza una evaluación preliminar del proyecto.

Se utiliza la información disponible con que cuenta la dependencia o entidad, tomando en cuenta la experiencia derivada de proyectos realizados y el criterio profesional de los evaluadores. También se puede utilizar información proveniente de revistas especializadas, libros en la materia, artículos contenidos en revistas arbitradas, estudios similares, estadísticas e información histórica y paramétrica, así como experiencias de otros países y gobiernos (SHCP, 2013)

2.9.5 Evaluación a nivel de prefactibilidad

Evaluación de un programa o proyecto de inversión en la que se utiliza, además de los elementos considerados en la evaluación a nivel de perfil, información de estudios técnicos, cotizaciones y encuestas, elaborados especialmente para llevar a cabo la evaluación de dicho programa o proyecto. La información utilizada para este tipo de evaluación debe ser más detallada y precisa, especialmente por lo que se refiere a la cuantificación y valoración de los costos y beneficios.

La información utilizada para el análisis a nivel de prefactibilidad deberá ser verificable e incluir las fuentes de información de esta en la sección de bibliografía del análisis (SHCP, 2013).

2.10 Caso de Negocio

Parte del trabajo desarrollado dentro de la evaluación es el identificar el problema a resolver o la oportunidad que necesita abordarse. Para evitar enfocarse en la solución desde el principio, el énfasis se coloca en el entendimiento del escenario actual y analizando la información encontrada.

2.10.1 Propósito

El propósito del caso de negocio es proveer una justificación de las acciones basada en los beneficios a obtener mediante la implementación de la solución propuesta.

2.10.2 Descripción

De acuerdo con (IIBA, 2015), el caso de negocio captura los elementos justificativos para llevar a cabo un cambio. Frecuentemente se presenta en un documento formal, pero también puede ser presentado mediante métodos informales. El tiempo y los recursos empleados en el caso de negocio debe ser proporcional a su valor e importancia.

El caso de negocio provee detalles suficientes para informar sin proporcionar complejidades específicas acerca del método o enfoque de la implementación; es también un catalizador para las iniciativas de cambio.

En términos generales, un caso de negocio se utiliza para:

Definir la necesidad: La necesidad es el impulsor del cambio en el caso de negocio. Es el objetivo relevante o la meta que debe alcanzarse, los cuales están ligados de manera estratégica. Definir la necesidad se enfoca en la identificación del problema o de la oportunidad potencial.

Determinar los resultados deseados: Los resultados describen el estado que debe obtenerse si la necesidad es cubierta.

Evaluar las suposiciones y limitantes: Estas suposiciones o limitantes están relacionadas con cualquier situación técnica o de recursos que sea posible encontrarse al implementar una solución potencial.

Recomendar una solución: Es común que exista más de una propuesta o alternativas de solución, estas pueden diferenciarse por la tecnología aplicada, el proceso o el modelo de negocio. Es por eso por lo que la solución recomendada deberá describir la manera deseable en que se enfrentará la oportunidad. También provee información acerca de cómo se llevará a cabo la evaluación de esta alternativa de solución.

2.11 Estudio de mercado

Consiste en analizar el comportamiento histórico de la oferta, la demanda y los precios, estimar la demanda actual y potencial para los bienes y/o servicios que serán

provistos por el proyecto frente a la oferta actual y potencial que se podría tener con el proyecto en operación (Morín, et al., 2017).

Este estudio mide el número de individuos o entidades que bajo ciertas condiciones determinan la demanda, que a su vez justifica el volumen de producción, las especificaciones del producto o servicio, este dimensionamiento del mercado es la base para identificar la información que puede definir aspectos como el tamaño de la planta o la localización, además de proveer datos importantes sobre el entorno en el que el proyecto ha de desarrollarse y al que debe adaptarse.

Un estudio de mercado deberá contener los siguientes puntos:

-Situación Actual

-Producto en el mercado: producto principal y subproductos

-Área del mercado

-Demanda: Cantidad de bienes o servicios que en una cierta área geográfica requiere

-Oferta: Cantidad de bienes o servicios que en una cierta área geográfica se puede cubrir

-Localización: cuáles son las condiciones de la ubicación propuesta

-Posibilidades del proyecto: En qué condiciones se puede cubrir o enfrentar esa demanda (Anaya-Durand et al., 2015).

2.12 Estudio Técnico

Los estudios de ingeniería del proyecto deben llegar a determinar la función de producción óptima para la utilización eficiente y eficaz de los recursos disponibles para la producción del bien o servicio. Para ello deberán analizarse las distintas alternativas y condiciones en que se pueden combinar los factores productivos, identificando, a través de la cuantificación y proyección en el tiempo de los montos de inversiones de capital, los costos y los ingresos de operación asociados con cada una de las alternativas de producción.

De la selección del proceso productivo óptimo se derivarán las necesidades de equipo y maquinaria; de la determinación de su disposición en planta (layout) y de los estudios

de los requerimientos del personal que los operen, así como de su movilidad, podrían definirse las necesidades de espacio y obras físicas.

El objetivo general del estudio técnico es demostrar si el proyecto de inversión es factible técnicamente en su tamaño, localización y proceso productivo de acuerdo con factores como la materia prima y su fuente de abastecimiento, las alternativas tecnológicas y los recursos financieros (Sapag-Chain, 2008).

2.12.1 Aspectos técnicos del proceso

Estos consideran las características de la tecnología desde el punto de vista del proceso. Esto se realiza a través del análisis comparativo entre las alternativas que se ofrecen, estableciendo sus ventajas y desventajas y tomando en cuenta los aspectos tecnológicos.

Las principales especificaciones que se deben cubrir son las siguientes:

- Función del proceso: en qué consiste y cuál es
- Capacidad de procesamiento
- Materias primas: Deberá definirse las principales materias primas disponibles y sus especificaciones
- Productos: Deberá establecerse las especificaciones deseadas del producto
- Información técnica del proceso

2.13 FRONT-END LOADING (FEL)

La metodología FEL es un proceso de planeación de proyectos de tres etapas cuyo propósito es medir e incrementar el nivel de definición de un proyecto.

Esta metodología se desarrolla principalmente en 3 etapas secuenciales, establecidas lógicamente para garantizar una adecuada definición del objetivo, alcance, plazo, y costo del proyecto (Passalacqua & Saputelli, 2013).

Tabla 11. Objetivo de las Etapas FEL

Etapa	Objetivo
FEL 1 Visualización	Validar la oportunidad de negocio y elegir las alternativas que serán analizadas durante FEL II. Asegurar la alineación estratégica y evaluar la factibilidad técnica y económica de las oportunidades de inversión.
FEL 2 Conceptualización	Estudiar opciones identificadas y encauzar el proyecto a una opción, refinar premisas, actualizar indicadores económicos e iniciar el proceso de definición. Seleccionar la alternativa / escenario de proyecto más viable y detallar su alcance.
FEL 3 Definición	Desarrollar el alcance detallado, el plan de ejecución y el estimado de costo para la alternativa seleccionada en FEL II. Determinar el alcance, plazo y costo definitivo del proyecto, y establecer los compromisos de ejecución.

(PEMEX, 2012)

Las etapas FEL se caracterizan por presentar entregables tangibles que sirven como base para identificar áreas de mejora en el proyecto y decidir si este debe cancelarse, continuar o reevaluarse. La importancia de esta metodología radica en que permite la definición del proyecto a medida que se consigue información y establece compuertas entre cada etapa de FEL para la validación del proyecto.

2.14 Estimado de costos

El estimado de costos constituye uno de los elementos fundamentales para la toma de decisiones en los proyectos de inversión. Para los proyectos de inversión, el estimado de costo permite tomar decisiones de tipo económico, ya que es la base para el análisis de indicadores tales como la Tasa Interna de Retorno (TIR) y Valor Presente Neto (VPN).

2.14.1 Clases del estimado de costo

Durante la vida de un proyecto se producen distintas clases de estimado de costo. El estimado de costo se clasifica en función de la cantidad y calidad de la información técnica con que se cuente; el grado de avance de ingeniería determina el intervalo de precisión en el Estimado de Costo.

Las clases del estimado de costo y su propósito dentro del proceso son los siguientes:

Tabla 12. Definición de las clases de estimado de costos

Clase del Estimado	Definición
Clase V Estimado de Orden de Magnitud.	Elaborado en la Etapa FEL I. Este tipo de estimado se utiliza para la planeación estratégica de negocios, estudios de mercado, evaluación de prefactibilidad, evaluación de esquemas alternativos para el proyecto, investigación y localización de sitio.
Clase IV Estimado preliminar.	Se realiza en la Etapa FEL II. Este tipo de estimado se utiliza para la planeación estratégica, el análisis de esquemas alternativos para la evaluación, selección y adquisición de tecnologías y la confirmación de la factibilidad técnico-económica.
Clase III Estimado presupuestal.	Elaborado en la Etapa FEL II o FEL III. Es realizado una vez que se cuenta con la ingeniería básica y es usado como presupuesto del proyecto. Debido al grado de definición del proyecto en el que se sustenta, el Estimado de Costo Clase III deberá asumirse como el requerimiento de aplicación general para la obtención de fondos para la ejecución del proyecto.
Clase II Estimado de control.	Este estimado de costo se podrá elaborar en FEL III, siempre y cuando en la ingeniería básica extendida se incluya la estimación de conceptos y volúmenes de obra.
Clase I Estimado definitivo.	Este tipo de estimado se prepara una vez que se dispone de la ingeniería de detalle; se deriva de la preparación de propuestas de las empresas contratistas, y es utilizado para el control del proyecto durante su ejecución.

Fuente: (PEMEX, 2012)

2.14.2 Exactitud del estimado de costo

Para dar una idea de la precisión en los estimados de costo, se puede considerar los valores de desviación límite esperados, de acuerdo con los siguientes lineamientos de estimación (PEMEX, 2012):

Tabla 13. Clases y exactitud del estimado de costo.

Clase del Estimado	Exactitud del Estimado
Clase V Estimado de Orden de Magnitud. FEL I	+50% / -30%
Clase IV Estimado preliminar. FEL II	+35% / -20%
Clase III Estimado presupuestal. FEL III	+25% / -15%
Clase II Estimado de control. Procura	+15% / -10%
Clase I Estimado definitivo. Construcción	+10% / -5%

Fuente: (PEMEX, 2012)

2.15 Indicadores Financieros

2.15.1 Valor Presente Neto

El Valor Presente Neto (VPN) o Valor Actual Neto (VAN) de un proyecto es la suma de los beneficios netos futuros esperados del proyecto y actualizados a un año común a una tasa de descuento relevante. En el caso de una evaluación privada será considerada la tasa de mercado (Morín, Alvarado, Torres, & Orozco, 2017). En otras palabras, el VPN indica el valor del proyecto al día de hoy, se calcula considerando el costo de inversión inicial (I_0), y la suma del valor presente de los ingresos y gastos de cada año (I_k), durante el periodo de tiempo considerado (n años).

La fórmula para estimar el VPN es la siguiente:

Ecuación 5. Valor Presente Neto (VPN)

$$VPN = -I_0 + \sum_{k=1}^n \frac{I_k}{(1 + r_D)^k}$$

El valor presente de estos flujos de efectivo se debe evaluar utilizando la tasa de descuento (r_D), se puede considerar, por ejemplo, como el costo de capital de la empresa que está realizando la inversión.

Otra manera de expresar el Valor Presente Neto es mediante la diferencia del valor presente de los beneficios del proyecto y el valor presente de los costos del proyecto, como se muestra en la siguiente ecuación:

Ecuación 6. Valor Presente Neto

$$VPN = -I_0 + \sum_{k=1}^n \frac{B_n}{(1 + r_D)^k} - \sum_{k=1}^n \frac{C_n}{(1 + r_D)^k}$$

Donde:

VPN = Valor Presente Neto

I_0 = Inversión inicial

k = horizonte de tiempo (años)

r_D = Tasa de descuento

I_k = Flujo de efectivo de cada año

B_n = Beneficios directos

C_n = costos directos

EL VPN está relacionado con la rentabilidad de un proyecto, tomando los flujos de cada año al día de hoy, por lo que el análisis del VPN se hace de la siguiente manera:

VPN < 0. El proyecto presenta pérdidas. La inversión no es favorable

VPN = 0. El proyecto no tiene pérdidas ni ganancias. El proyecto no tendrá valor económico, sin embargo, puede tener un impacto en otras áreas, como la ambiental o la social

VPN > 0. El proyecto tiene ganancias. Se recomienda la inversión

2.15.2 Tasa Interna de Retorno (TIR)

La Tasa Interna de Retorno (TIR), indica la rentabilidad que se puede esperar de un proyecto de inversión después de un tiempo determinado. Por definición, la Tasa Interna de Retorno, es aquella que al utilizarse como tasa de referencia en el cálculo del VPN lo vuelve igual a cero (Morín, Alvarado, Torres, & Orozco, 2017). En otras palabras, al ser utilizada como tasa de descuento, iguala el valor de los beneficios con el valor de los costos.

La TIR es un buen indicador financiero de rentabilidad de un proyecto. Si es mayor que el costo de capital de una empresa, el proyecto puede considerarse favorable.

La TIR es la tasa máxima que soportaría el proyecto para ser rentable, cualquier tasa de descuento mayor que la TIR ocasionaría que el VPN del proyecto sea negativo, por lo tanto, el proyecto deberá ser rechazado. Cualquier tasa de descuento inferior a la TIR garantizará una rentabilidad positiva para el proyecto, por lo tanto, será conveniente realizarlo.

2.15.3 Costo Anual Equivalente (CAE)

El Costo Anual Equivalente (CAE) se utiliza para seleccionar entre diferentes alternativas de proyectos que tienen una vida útil distinta. En el Análisis Costo-Eficiencia, donde los beneficios son de difícil cuantificación y valoración, o bien, si los beneficios de ambas alternativas son iguales, se utiliza por lo general el CAE para seleccionar entre diferentes alternativas, mutuamente excluyentes, que tengan distinto horizonte de evaluación. Para el cálculo del CAE se utiliza la siguiente fórmula (Morín, Alvarado, Torres, & Orozco, 2017) :

Ecuación 7. Costo Anual Equivalente.

$$CAE = VPC \left[\frac{i (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \right]$$

Donde:

CAE = Costo Anual Equivalente

VPC = Valor Presente de los Costos

i = Tasa de descuento o costo de oportunidad

n = número de años del horizonte de evaluación.

2.16 Método de Evaluación Multicriterio

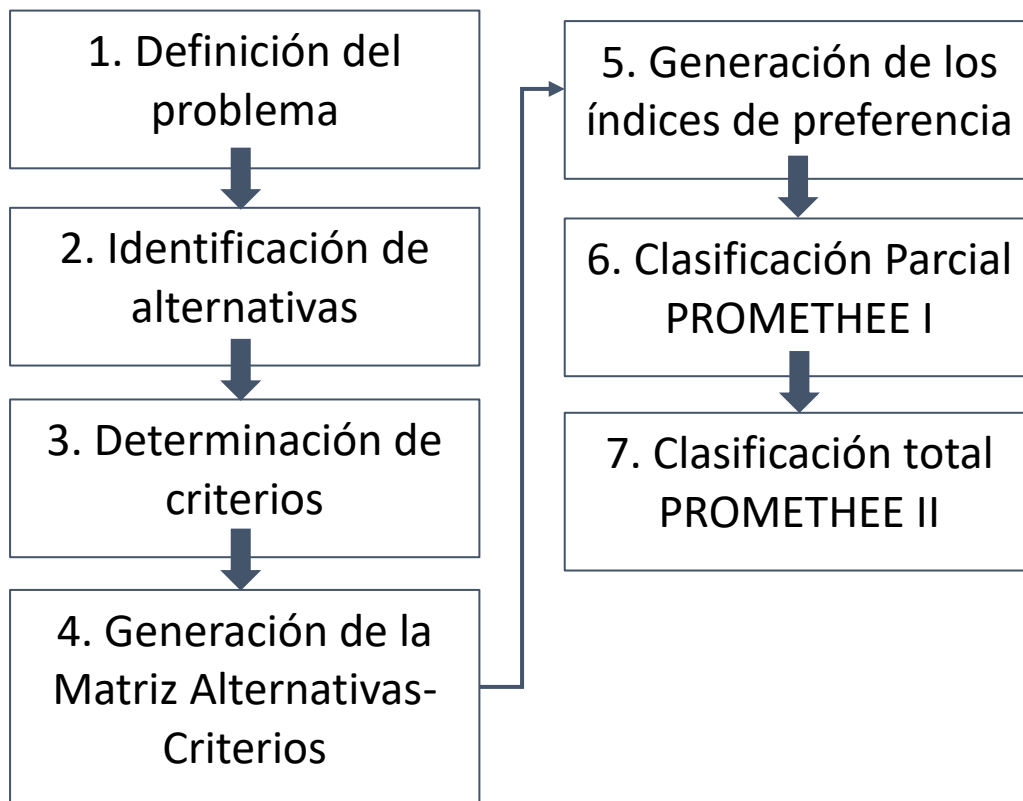
Los métodos de análisis multicriterio tienen por objetivo, proporcionar a los tomadores de decisión, herramientas que les permitan resolver un problema tomando en cuenta diferentes aspectos (criterios). Existen diversos modelos multicriterio, entre los más comunes están: El método de suma ponderada, método de producto ponderado y el método de organización de clasificación de preferencias (PROMETHEE).

2.16.1 Método PROMETHEE

EL método de análisis multicriterio PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation), fue desarrollado inicialmente por J.P. Brans en la década de 1980 (Brans & Mareschal, 2005). Es un método ampliamente utilizado para el análisis multicriterio y de escenarios y entre sus ventajas está poder evaluar tanto criterios cuantitativos como cualitativos.

La **Figura 10**, muestra el procedimiento del método PROMETHEE

Figura 10. Procedimiento del método PROMETHEE



PROMETHEE es un método *outranking*, basado en flujos preferencias parciales, positivas y negativas, para cada alternativa la cual es clasificada de acuerdo con las preferencias seleccionadas (pesos) (Herva & Roca, 2013).

El método PROMETHEE está basado en comparaciones en parejas. Los índices de preferencia parcial se definen a continuación:

Ecuación 8. Índices de preferencia

$$\begin{cases} \pi(a, b) = \sum_{j=1}^k P_j(a, b)w_j, \\ \pi(b, a) = \sum_{j=1}^k P_j(b, a)w_j. \end{cases}$$

De acuerdo con la Ecuación 8, se tienen las alternativas a, b que pertenecen a un conjunto A , donde: P_j es la función de preferencia y w_j es la ponderación de los criterios. $\pi(a, b)$ expresa el grado en que a es preferida sobre b dentro de todos los criterios, y $\pi(b, a)$ como b es preferida sobre a . En muchos casos hay criterios para los que a es mejor que b , y criterios para los cuales b es mejor que a , consecutivamente $\pi(a, b)$ y $\pi(b, a)$ usualmente son positivos.

Las siguientes son propiedades de las alternativas (a, b) , que pertenecen a A (Brans & Mareschal, 2005).

Ecuación 9. Propiedades de las alternativas (a,b)

$$\begin{cases} \pi(a, a) = 0 \\ 0 \leq \pi(a, b) \leq 1 \\ 0 \leq \pi(b, a) \leq 1 \\ 0 \leq \pi(a, b) + \pi(b, a) \leq 1. \end{cases}$$

Por lo tanto:

$$\begin{cases} \pi(a, b) \sim 0 \text{ implica una débil preferencia global de } a \text{ sobre } b \\ \pi(a, b) \sim 1 \text{ implica una débil preferencia global de } a \text{ sobre } b \end{cases}$$

Cada alternativa a es evaluada contra $(n - 1)$ alternativas pertenecientes a A . A continuación, se definen los dos flujos de preferencia:

Ecuación 10. Flujo de preferencia positivo.

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x),$$

Ecuación 11. Flujo de preferencia negativo

$$\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a).$$

El flujo de preferencia positivo $[\phi^+(a)]$ expresa cómo la alternativa a supera a las demás, mientras que el flujo de preferencia negativo $[\phi^-(a)]$, expresa como la alternativa a es superada por las demás. La clasificación parcial PROMETHEE I se obtiene de los flujos de preferencia parciales positivo y negativo; mientras que la clasificación PROMETHEE II, consiste en una clasificación completa basada en un flujo de preferencia total $[\phi(a)]$, el cual es el balance entre los flujos parciales positivos y negativos, cuanto mayor sea el flujo total, mejor es la alternativa (Herva & Roca, 2013).

Ecuación 12. Flujo de preferencia total

$$\phi(a) = \phi^+ - \phi^-(a)$$

El software *Visual PROMETHEE*, es un programa de cómputo de ayuda para realizar evaluaciones multicriterio, está diseñado para:

- Evaluar diversas posibles decisiones o alternativas para múltiples criterios.
- Identificar la posible mejor opción.
- Calificar las posibles alternativas, desde la mejor hasta la peor.
- Clasificar alternativas en clases predefinidas.

- Visualizar problemas de decisión o evaluación, para entender mejor las dificultades y tomar mejores decisiones.
- Justificar o invalidar decisiones basadas en elementos objetivos.

3. METODOLOGÍA

La metodología empleada para realizar la evaluación de prefactibilidad de una planta de digestión anaerobia se desarrolló en cinco etapas.

- I. Recopilación de información
- II. Caso de negocio.
- III. Evaluación de los residuos en la Ciudad de México.
- IV. Evaluación técnica del potencial de la Digestión Anaerobia
- V. Evaluación económica del proyecto de Digestión Anaerobia.

3.1 Recopilación de información

El objetivo de esta primera parte fue recopilar toda la información relacionada con la digestión anaerobia, los parámetros más importantes y el proceso que requiere para llevarse a cabo. Dicha recopilación se realizó utilizando artículos de revistas científicas especializadas, libros de consulta relacionados con el biogás y la digestión anaerobia e información proporcionada por los tecnólogos más importantes a nivel internacional. Además de la información técnica en digestión anaerobia y las experiencias en el desarrollo de esta tecnología, se recopiló información acerca de los residuos en México y en la Ciudad de México, así como sus características, esto con la finalidad de trabajar con datos e información de fuentes oficiales.

3.2 Caso de Negocio

El objetivo de realizar un caso de negocio en este trabajo es presentar de una manera condensada y lógica los aspectos más importantes de un proyecto a implementarse, de esta manera el caso de negocio provee los detalles suficientes para informar y

analizar la situación determinada, sin entrar en detalles acerca de su implementación. Los datos serán obtenidos de la información reportada por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México (SEDEMA). Esta metodología está basada en los elementos fundamentales para la dirección de proyectos de la guía del Project Management Body of Knowledge (PMBOK) y en la guía del Business Analysis Body of Knowledge (BABOK).

La metodología presentada en esta etapa está basada en las etapas descritas en la **Tabla 14**.

Tabla 14. Metodología del caso de negocio.

Etapas	Actividad	Aspectos Clave
SITUACIÓN ACTUAL	Definir las necesidades del proyecto	Problemática actual y/o oportunidad.
JUSTIFICACIÓN DE LA ALTERNATIVA	Identificar las brechas de la problemática	Describe cómo surge la necesidad del negocio
PROPUESTA DE SOLUCIÓN	Definir el alcance de la solución	Cuál es la solución propuesta y su efecto.
SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA	Determinar el enfoque de la solución	El enfoque tecnológico más factible para llevar a cabo la solución.
SELECCIÓN DE SITIO	Determinar la ubicación más adecuada	Cuál es la localización más favorable para el proyecto
EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA ELEGIDA	Definición del caso de negocio	Brindar información sobre costos y listar algunos beneficios.
CONFIGURACIÓN DE LA ALTERNATIVA	Resumir el caso de negocio	Definir con datos los aspectos del proyecto.
LISTA DE SUPUESTOS	Lo que se considera verdadero o confiable en la situación	Enlistar las principales premisas para el desarrollo de las actividades.
LISTA DE PERSONAS INTERESADAS	Identificar a los principales actores del proyecto.	Enlistar las principales personas o grupos de personas interesadas en el proyecto.

En la selección de tecnología se realiza la comparación de las tecnologías de digestión anaerobia húmeda y seca, esto debido a que en la literatura se encontró

que existen factores relevantes que las diferencian. Para esta selección de tecnología se emplea la metodología PROMETHEE, descrita en los antecedentes de esta tesis. La determinación de los criterios se estableció bajo juicio propio tomando como referencia lo revisado en la bibliografía.

En cuanto a la asignación de los pesos asignados, no existe una guía inequívoca para seleccionarlos, sino que esto depende del criterio del evaluador, se realizó la asignación tomando en cuenta la información revisada en la literatura, la suma de los pesos ponderados debe ser igual a 1 o 100% para ingresarla al software.

En la **Tabla 15** se muestran los criterios seleccionados, así como sus pesos.

Tabla 15. Criterios empleados para la selección de tecnología.

Criterio	Subcriterio	Descripción	Digestión anaerobia húmeda	Digestión anaerobia seca	Referencias	Peso	Ponderado
Técnico	Eficiencia en la producción de biogás	Indica el rendimiento de la producción de biogás por tonelada de FORSU tratada	110-150 Nm ³ /t	110-140 Nm ³ /t	(Mao, 2015)	45%	13.50%
	Capacidad	Se refiere a la cantidad de residuos que puede procesar	3000 a 250,000 t/año	10,000 a 100,000 t/año	(EBA, 2018)	25%	7.50%
	Tratamientos	Indica el nivel de pretratamientos o postratamientos que requiere el sustrato.	Complejo	Promedio	(Bachmann, 2013) & (Meegoda, 2018)	15%	4.50%
	Operación	Indica si el régimen es continuo o por lotes	Continuo	Lotes	(Li, 2015)	15%	4.50%
Subtotal						30%	
Técnicos Complementarios	Madurez de la tecnología	Indica si es una tecnología consolidada o en desarrollo	Tecnología consolidada	Tecnología Consolidada	(Kumar, 2020) & (GMI, 2013)	30%	4.50%

Evaluación de prefactibilidad de una planta de digestión anaerobia para el procesamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos en la Ciudad de México.

Criterio	Subcriterio	Descripción	Digestión anaerobia húmeda	Digestión anaerobia seca	Referencias	Peso	Ponderado
	Flexibilidad del proceso	Evalúa si el proceso puede sufrir cambios en la operación para mejorar las condiciones del producto final	Flexible (codigestión)	No es flexible	(Ranieri, 2018)	40%	6.00%
	Disponibilidad Tecnológica	El nivel de accesibilidad que tiene la tecnología	Alta accesibilidad	Alta accesibilidad	(Kumar, 2020) & (EBA,2018)	30%	4.50%
Subtotal						15%	
Económico	Costo de inversión	Costos asociados a la implementación de la tecnología (equipo, infraestructura, instalaciones)	488 USD año/t	491 USD año/t	(Durán-Moreno et al., 2018)	70%	28.00%
	Costos de operación y mantenimiento	Costos asociados a la operación de la planta (materia prima, transporte, gastos.)	73 USD año/t	57 USD año/t	(Durán-Moreno et al., 2018)	30%	12.00%
Subtotal						40%	
Social	Aceptación de la ciudadanía	Evalúa la aceptación de la sociedad a la que impactará	Gran aceptación	Gran Aceptación	(Vögeli, 2014)	50%	7.50%
	Contribución a la infraestructura	Indica el impacto que tendrá en el desarrollo de una región.	Alto impacto	Alto impacto	(Vögeli, 2014) & (Patterson, 2011)	50%	7.50%
Subtotal						15%	100.00%
Total						100 %	

3.3 Estudio de Mercado de los Residuos en la Ciudad de México.

En esta parte, se desarrolló un diagnóstico para conocer la situación actual de los residuos y las proyecciones futuras en cuanto a generación y demanda de servicios

para el manejo de estos. Las actividades desarrolladas para esta parte se discuten a continuación.

Generación de Residuos Sólidos Urbanos en La Ciudad de México: Tiene el objetivo de definir la situación de la generación de los residuos, las fuentes de dónde provienen y cuánto se genera diariamente en estas fuentes, para definir que flujo de residuos actual es el que se puede aprovechar.

Recopilación de la información histórica sobre la cantidad de residuos generados: La información de los históricos de la generación es importante para analizar y poder predecir el comportamiento de los residuos.

Estimación de la demanda de servicios de recolección: Debido a que la demanda de los servicios está relacionada con la generación y esta a su vez se relaciona con el crecimiento poblacional, primero se realizó la proyección del crecimiento poblacional a partir del año 2014 y hasta el año 2040 empleando la ecuación 13:

Ecuación 13. Estimación del Crecimiento poblacional.

$$NH(x \text{ año}) = NH_{2014} \times (1 + r)^n$$

Donde:

NH (x año): Número de habitantes del año deseado

NH_{2014} : Número de habitantes del año 2014 (8,851,080 hab.)

r: tasa anual de crecimiento poblacional (0.3%)

n: número de años

Posteriormente se calcula la generación promedio per cápita para cada año, empleando la ecuación 14:

Ecuación 14. Generación de residuos per cápita.

$$GPC \left[\frac{kg}{hab \cdot día} \right] = \frac{GD \left[\frac{kg}{día} \right]}{NH}$$

Donde:

GPC: Generación per cápita

GD: Generación de residuos diaria

NH: Número de habitantes

Se analizó el cambio en la generación per cápita diaria de residuos para diferentes años, la cual resultó ser de 0.3%.

Ecuación 15. Tasa de Crecimiento de la generación per cápita diaria.

$$Tc = \frac{GPC2 \left[\frac{kg}{día} \right] - GPC1 \left[\frac{kg}{día} \right]}{GPC1 \left[\frac{kg}{día} \right]} \times 100$$

Donde:

Tc: Tasa de crecimiento en la generación per cápita diaria

GD2: Generación diaria del año actual

GD1: Generación diaria del año anterior

Posteriormente, se calcula la tasa de crecimiento anual en la generación por día de los residuos, la cual se calcula combinando la tasa de crecimiento poblacional y la tasa de crecimiento en la generación per cápita diaria, esta tasa de crecimiento anual resultó de 0.5995%.

Ecuación 16. Tasa de crecimiento de la generación diaria.

$$TCGD = [(1 + Tc) \times (1 + r) - 1] \times 100$$

Donde:

TCGD: Tasa de crecimiento en la generación diaria

Tc: Tasa de crecimiento en la generación per cápita diaria

r: Tasa anual de crecimiento poblacional

Finalmente, para calcular la proyección en la generación diaria de los residuos se emplea la ecuación 17:

Ecuación 17. Estimación de la generación diaria futura.

$$GD_F = GD_1 \times (1 + TCGD)^n$$

Donde: GD_F : Generación diaria futura

TCGD: Tasa de crecimiento en la generación diaria

n: Número de años

3.4 Estudio técnico del potencial de la digestión anaerobia

Durante esta etapa, se describe de manera general el sitio propuesto para el desarrollo del proyecto, se indican sus características principales y su ubicación actual.

Posteriormente se describió el proceso de manera general, tomando en cuenta las etapas más importantes como son:

- Pretratamiento
- Digestión
- Tratamiento del biogás
- Sistema de cogeneración
- Tratamiento del digestato

Una vez descrito el proceso general, se identificaron los parámetros y características de los residuos de la Central de Abasto, estos fueron obtenidos de un artículo del año 2019 en el cual se llevó a cabo la caracterización fisicoquímica, los resultados de esta caracterización y los datos que serán utilizados se encuentran en el apartado 6.3 Evaluación de la materia prima.

Esta cuarta parte tuvo como finalidad evaluar el potencial teórico de generación de biogás y la producción de energía, para esto se construyó un modelo para estimar las entradas (residuos) y salidas (biogás, energía) potenciales de la digestión anaerobia. A partir de este modelo se determinó el volumen requerido para el biodigestor, la cantidad de agua necesaria para el proceso y la cantidad de digestato que puede ser utilizado como fertilizante.

Este modelo se basa en información recopilada de bibliografía especializada, por lo que las estimaciones son desde un punto de vista teórico. En la **Figura 11**, se muestra la manera en la que se compone el modelo, de manera que se tenga una visión general de las diferentes etapas.

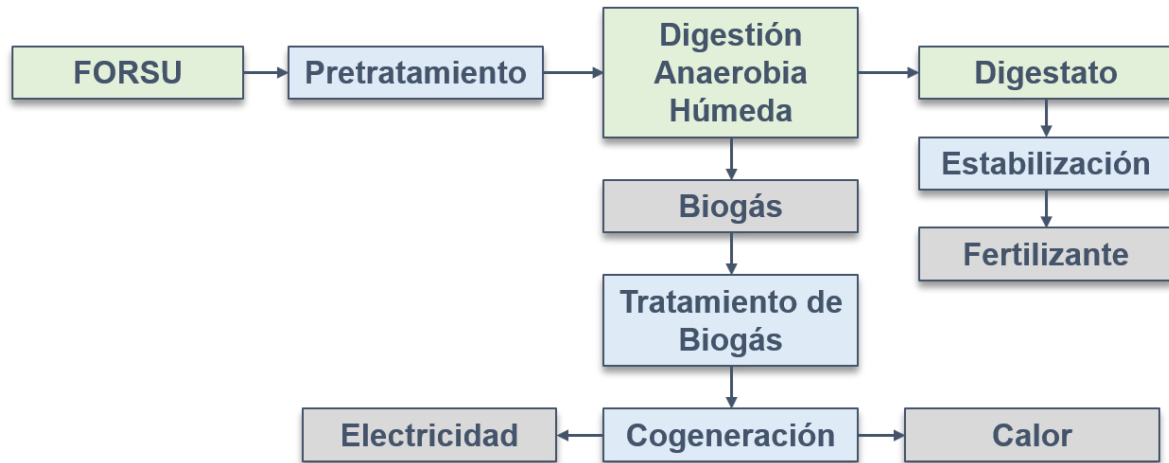


Figura 11. Etapas del proceso.

3.4.1 Pretratamiento

La FORSU contiene materiales que no son susceptibles de aprovechamiento mediante la DA, para esto se seleccionaron únicamente los residuos orgánicos, los cuales de acuerdo con los datos de referencia de la caracterización son alrededor del 85%, por lo tanto, el 15% restante se considera material rechazado. Una vez teniendo la materia prima que se ingresará se calcula el contenido de agua necesaria para alcanzar la cantidad de humedad establecida del 90%, esto se calcula con la siguiente ecuación:

Ecuación 18. Cantidad de agua requerida para pretratamiento.

$$T_{agua} = T_{rp} \times \frac{\%h_{rp} - \%h_{DA}}{\%h_{DA} - 1}$$

Donde:

T_{agua} : Toneladas de agua requeridas

T_{rp} : Toneladas de residuos pretratados

$\%h_{rp}$: Porcentaje de humedad de los residuos pretratados

$\%h_{DA}$: Porcentaje de humedad requerida para la Digestión Anaerobia.

3.4.2 Digestión

Una vez obtenido el balance para obtener el sustrato con las características deseadas, se continua el proceso en el digestor el cual se considera con alimentación continua, por lo que la producción de biogás será constante, se calcula la cantidad de biogás que será producido con las siguientes ecuaciones:

Ecuación 19. Volumen de biogás generado.

$$V_{biogás} = T_{FORSU} \times R_{biogás} \left(\frac{Nm^3}{t FORSU} \right);$$

Ecuación 20. Rendimiento de biogás a partir de FORSU.

$$R_{biogás} \left(\frac{Nm^3}{t FORSU} \right) = RT_{biogás} \left(\frac{Nm^3 biogás}{t SV} \right) \times \frac{X t SV}{1 t FORSU}$$

Donde:

$V_{biogás}$: Volumen de biogás en unidades de Nm^3

T_{FORSU} : Toneladas de FORSU pretratadas

$R_{biogás}$: Rendimiento de biogás en $\left(\frac{Nm^3}{t FORSU} \right)$

$RT_{biogás}$: Rendimiento teórico de biogás igual a $634 Nm^3/t SV$ (Durán-Moreno et al., 2018)

$X t SV$: porcentaje de sólidos volátiles de la FORSU igual a 17.30% (Tsydenova et al., 2019)

3.4.3 Volumen de digestión

El volumen requerido para la digestión se calcula con la ecuación 22:

Ecuación 21. Volumen de digestión requerido.

$$V_{digestor} = V_{biogás} + V_{Sustrato} \times TRH ;$$

Ecuación 22. Volumen total del sustrato

$$V_{\text{sustrato}} = T_{\text{sustrato}} \times d_{\text{sustrato}};$$

Ecuación 23. Densidad del sustrato

$$d_{\text{sustrato}} = \%h_{\text{FORSU}} \times d_{\text{agua}} + d_{\text{res}} \times (1 - \%h_{\text{agua}})$$

Donde:

V_{digestor} : Volumen del digestor en m^3

V_{sustrato} : Volumen del sustrato en m^3

T_{sustrato} : Toneladas de sustrato

d_{sustrato} : Densidad del sustrato en (t/m^3)

d_{agua} : Densidad del agua en (t/m^3)

d_{res} : Densidad de los residuos en (t/m^3) (0.12149 t/m^3) (SEMARNAT, 2020)

$\%h_{\text{FORSU}}$: Porcentaje de humedad de la FORSU.

3.4.4 Tratamiento de biogás

El volumen de metano producido se calcula tomando el porcentaje del contenido de metano del biogás, esto mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 24. Volumen de metano producido.

$$V_{\text{metano}} (\text{m}^3) = V_{\text{Biogás}} (\text{m}^3) \times \left(\frac{0.57 \text{ m}^3 \text{ de metano}}{1 \text{ m}^3 \text{ de biogás}} \right)$$

3.4.5 Estimación de Recuperación de Energía del Biogás

El modelo está diseñado para calcular la cantidad de energía que se puede obtener del biogás, en términos térmicos y eléctricos. Dada una eficiencia del 85% para el sistema de cogeneración eléctrica, y una eficiencia en la producción de electricidad

del 45% y para la recuperación de energía térmica del 70% de acuerdo con referencias bibliográficas (Olivard, 2017) & (Kohler, 2020).

La Ecuación 25 se emplea para el cálculo de generación de energía eléctrica y la Ecuación 26 se emplea para el cálculo de la energía térmica.

Ecuación 25. Producción de energía eléctrica.

$$E_{ele} = V_{metano} \times VCM_{metano} \times \eta_{ele};$$

Ecuación 26. Producción de energía térmica.

$$E_{ter} = V_{metano} \times VCM_{metano} \times (1 - \eta_{ele})^{\eta_{ter}}$$

Donde:

E_{ele} : Energía eléctrica producida

E_{ter} : Energía térmica producida

VCM_{metano} : Valor calorífico mínimo del metano (0.01 MWh/Nm³)

η_{ele} = eficiencia eléctrica

η_{ter} = eficiencia térmica

3.4.6 Digestato

En esta etapa se consideró el proceso para el tratamiento del digestato, el cual considera la reducción del contenido de humedad y la estabilización para su uso como fertilizante.

La cantidad de digestato se calcula con la siguiente ecuación:

Ecuación 27. Cantidad de digestato generado.

$$T_{Digestato} = T_{Sustrato} - T_{biogás}$$

El digestato debe contener un máximo de humedad del 60%, por lo tanto, se calcula la cantidad de agua que se retira con las siguientes ecuaciones:

Ecuación 28. Cálculo del efluente líquido.

$$\text{Efluente líquido} = T_{DH} - T_{DS};$$

Ecuación 29. Digestato seco.

$$T_{DS} = T_{DH} \times (\%h_{DH} - \%h_{DS})$$

Donde:

T_{DH} : Toneladas del digestato húmedo

T_{DS} : Toneladas del digestato seco

$\%h_{DH}$: porcentaje de humedad del digestato húmedo (90%)

$\%h_{DS}$: porcentaje de humedad requerido para el digestato seco (60%)

Del efluente líquido se considera el tratamiento de agua para su reúso en el proceso, considerando una recuperación de agua de proceso del 80% y 20% de generación de lodos se calcula la cantidad de composta que puede ser empleada como fertilizante mediante las ecuaciones siguientes:

Ecuación 30. Toneladas de fertilizante producidas.

$$T_{fertilizante} = T_{DS} + T_L;$$

Ecuación 31. Toneladas de lodos producidos.

$$T_L = \text{Efluente líquido} \times 0.2$$

3.4.7 Comparación del modelo

Como parte final de esta etapa, se realiza la comparación de los resultados del modelo con los datos reportados por las principales tecnologías de digestión anaerobia, esta comparación se realiza tomando en cuenta una tonelada de residuos procesados de los siguientes parámetros:

Generación de biogás (Nm^3/t)

Cantidad de Metano producido (Nm³/t)

Producción de energía (kWh/t)

3.5 ANÁLISIS AMBIENTAL

El análisis ambiental tiene como propósito establecer y determinar los beneficios que tiene el proyecto de digestión anaerobia sobre el ambiente. Se parte de las siguientes consideraciones:

- La comparación de los beneficios ambientales del proyecto de digestión anaerobia se hace con la estrategia de gestión actual que es el llevarlos a rellenos sanitarios.
- El impacto de los lixiviados es difícil de evaluar debido a que el enfoque del análisis debe tomar una perspectiva diferente, por lo cual sólo se presentaran aspectos cualitativos.

3.5.1 Reducción del volumen de residuos

Este aspecto considera como base el tratamiento de 50,000 toneladas anuales, de las cuales el 15% es material de rechazo, que no es susceptible de aprovechamiento, por lo cual esta cantidad deberá confinarse en sitios de disposición final, reduciendo el volumen de disposición drásticamente.

3.5.2 Reducción de los lixiviados.

El impacto cualitativo de los lixiviados se relaciona con la reducción del volumen de disposición de los residuos en los rellenos sanitarios, ya que al procesar la materia orgánica vía digestión anaerobia en un reactor, los efluentes líquidos subproductos de este proceso siguen un tratamiento para su estabilización y recuperación de los nutrientes, lo que disminuye el potencial contaminante para los suelos, además de tener un impacto en el manejo de lixiviados en los rellenos sanitarios.

3.5.3 Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

La estimación de las emisiones de GEI se realiza evaluando los efectos de estos en dos situaciones: a) la mitigación de las emisiones de metano en los rellenos sanitarios y b) la mitigación de las emisiones de CO₂ en los procesos de generación de energía provenientes de fuentes convencionales (carbón, gas, petróleo).

En este sentido, para la primera situación se realiza el cálculo de la estimación de emisiones de metano de 50,000 toneladas anuales tomando como referencia los datos presentados por (Trottier, 2015), los cuales indican que para el caso de residuos depositados en rellenos sanitarios el factor de emisión de metano es de 0.01 kgCH₄ / lb_{residuos}, por lo que la estimación de emisiones de metano se calcula de acuerdo con la Ecuación 32.

Ecuación 32. Emisiones de metano en rellenos sanitarios

$$\varepsilon_{CH_4} = 0.01 \frac{kgCH_4}{lb_{residuos}} \times T_{res} \times 2.20$$

Donde:

ε_{CH_4} : Emisiones de metano de los residuos orgánicos en rellenos sanitarios en [t CH₄/año].

T_{res} : Toneladas de residuos orgánicos anuales (42,500 t/año)

La Ecuación 33 se emplea para calcular el potencial de calentamiento global del metano en equivalencia con el CO₂.

Ecuación 33. Equivalencia de las emisiones de metano

$$\varepsilon_{CO_2(eq)} = \varepsilon_{CH_4} \times PCG_{CH_4}$$

Donde:

$\varepsilon_{CO_2(eq)}$: Emisiones de CO₂(eq) en [tCO₂(eq)/año]

ε_{CH_4} : Emisiones de metano de los residuos orgánicos en rellenos sanitarios en [t CH₄/año].

PCG_{CH_4} : Potencial de calentamiento global del metano igual a 28 CO₂ (eq).

Complementariamente, cada MWh de electricidad producida mediante la combustión de metano capturado del proceso de digestión anaerobia, evita la emisión de GEI proveniente de la combustión de combustibles fósiles. En este caso, la comparación de estas emisiones mitigadas se realiza con respecto a la combustión de carbón, debido a que de acuerdo con (SENER, 2019) es el combustible utilizado en mayor

proporción para la generación eléctrica en México con el 42% del total de combustibles empleados.

Esta comparación se realiza de acuerdo con los datos presentados en la **Tabla 16**, la cual muestra el potencial de calentamiento global de los principales combustibles empleados para la generación eléctrica.

Tabla 16. Emisiones de fuentes de energía eléctrica.

Combustible	Emisiones (kg CO ₂ eq / MWh)
Carbón	820
Gas	490
Biomasa	740

Fuente: (IPCC, 2014)

La siguiente ecuación se emplea para el cálculo de las emisiones mitigadas mediante la combustión de CH₄ producido vía digestión anaerobia:

Ecuación 34. Mitigación de emisiones por sustitución de combustible

$$\varepsilon_{ele} = Ele_{DH} \times \varepsilon_{carbón} \times 0.001$$

Donde:

ε_{ele} : Emisiones por generación de energía eléctrica si se empleara carbón (tCO₂eq/año)

Ele_{DH} : Cantidad de energía eléctrica generada vía Digestión anaerobia (MWh/año)

$\varepsilon_{carbón}$: Tasa de emisiones del carbón combustible para la generación eléctrica (820 kgCO₂eq / MWh)

3.5.4 Recuperación de nutrientes

La recuperación de nutrientes se estima por el contenido de Nitrógeno, fósforo y potasio en el digestato. Los fertilizantes industriales más comúnmente utilizados como la Urea, y el sulfato de amonio, son fertilizantes nitrogenados con un contenido de 46% y 21% de nitrógeno respectivamente (IPNI, 2021).

La Ecuación 35, muestra el cálculo realizado para estimar la cantidad de nitrógeno en el digestato, se considera que el nitrógeno presente en la materia orgánica no es removido por la digestión anaerobia, ya que los principales productos de este proceso son metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂).

Ecuación 35. Cálculo de toneladas de nitrógeno en el digestato.

$$T_{\text{Nitrógeno}} = T_{\text{FORSU}} \times (\%M.O.) \times (\%N)$$

Donde:

T_{Nitrógeno}: Toneladas de nitrógeno en el digestato para fertilizante (t/año)

T_{FORSU}: Toneladas de FORSU procesadas en digestión anaerobia (t/año)

%M.O.: Porcentaje de materia orgánica en la FORSU igual a 17.30% (Tsydenova et al., 2019)

%N: Porcentaje de Nitrógeno en la materia orgánica igual a 1.39% (Tsydenova et al., 2019)

La Ecuación 36, muestra el cálculo realizado para estimar la cantidad de fósforo en el digestato, se considera que el fósforo presente en la materia orgánica no es removido por la digestión anaerobia, ya que los principales productos de este proceso son metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂).

Ecuación 36. Cálculo de toneladas de fósforo en el digestato.

$$T_{\text{Fósforo}} = T_{\text{FORSU}} \times P(\text{ppm}) \times (1 \times 10^{-6})$$

Donde:

T_{Fósforo}: Toneladas de fósforo en el digestato para fertilizante (t/año)

T_{FORSU}: Toneladas de FORSU procesadas en digestión anaerobia (t/año)

P(ppm): Concentración de fósforo en la FORSU igual a 120.94 ppm (Tsydenova et al., 2019)

La Ecuación 37, muestra el cálculo realizado para estimar la cantidad de fertilizante equivalente de acuerdo con la cantidad de Nitrógeno, considerando los dos más utilizados (Urea y Sulfato de Amonio).

Ecuación 37. Cálculo de toneladas equivalentes de fertilizante.

$$TF_{eq} = \frac{T_{Nitrógeno}}{\% N_{Fertilizante}/100}$$

Donde:

TF_{eq} : Toneladas de Fertilizante equivalente (t/año)

$T_{Nitrógeno}$: Toneladas de nitrógeno (t/año)

$\%N_{Fertilizante}$: Porcentaje de nitrógeno en el fertilizante, Urea (46%) y Sulfato de amonio (21%) (IPNI, 2021).

La se emplea para calcular el porcentaje de fósforo presente en el fertilizante equivalente.

Ecuación 38. Cálculo de porcentaje de fósforo en el fertilizante equivalente.

$$\% \frac{m}{m} = \frac{T_{Fósforo}}{TF_{eq}}$$

Donde:

$\%m/m$: Porcentaje masa-masa

TF_{eq} : Toneladas de Fertilizante equivalente (t/año)

$T_{Fósforo}$: Toneladas de fósforo (t/año)

3.6 EVALUACIÓN ECONÓMICA

La evaluación económica consiste en el análisis comparativo de la situación actual (sin proyecto) y la situación con el proyecto de digestión anaerobia, para realizar esta comparación es necesario el cálculo de indicadores financieros bajo las mismas premisas.

3.6.1 Situación sin Proyecto

A partir del costo para el año 2019 para el manejo de los residuos, el cual es de \$605 por tonelada, se calcula el costo anual para el manejo de 50,000 toneladas, las cuales son la base de este estudio. La proyección de estos costos para los años posteriores se realiza haciendo un ajuste por inflación, la cual se establece en 4% anual, de acuerdo con datos del Banco de México.

Para la proyección de los costos anuales futuros se utilizó la siguiente ecuación:

Ecuación 39. Costo Anual Futuro

$$CAF = CA \times (1 + in)^t$$

Donde:

CAF: Costo Anual Futuro

CA: Costo de Manejo Actual (2019)

in: Tasa de inflación anual (4%)

t: horizonte de tiempo de evaluación (20 años)

Posteriormente, para cada uno de estos costos por tratamiento anual de años posteriores a 2019, se realiza la conversión a dólares, de acuerdo con el tipo de cambio para el día 26 de noviembre de 2020, el cual es de 20.58 pesos por dólar.

Se calculan los indicadores financieros VPN, y CAE para este escenario, los cuales serán descritos más adelante.

3.6.2 Situación con proyecto de digestión anaerobia

El modelo financiero para los cálculos de esta etapa se construyó en un libro de Excel, esta herramienta es flexible y depende de los parámetros de entrada que se establezcan. Las variables principales para este análisis financiero son los costos de capital, costos de operación y mantenimiento, y los ingresos por ventas de energía (eléctrica y vapor) y de fertilizante.

3.6.2.1 Costos de Capital (CAPEX)

Para realizar el estimado de inversión, se requiere conocer los aspectos principales del proceso, estos costos incluyen el diseño, la ingeniería, equipamiento e instalación,

preparación del sitio, costos de arranque y capital de trabajo (Mendelson & Jones, 2011). Estos datos se estimaron a partir de información recopilada de literatura, se construyó una tabla para conocer los costos de capital dependiendo de la capacidad de la planta (ANEXO 1), para este caso, se tiene una inversión inicial de \$12,000,000 de dólares, y un costo de capital anual de \$14 dólares por tonelada durante el ciclo de vida de la planta, la cual en conjunto tiene una suma de \$28,560,000 dólares, lo cual es consistente con la inversión de plantas con la misma capacidad, como se muestra en el **ANEXO 1**.

Costos de Operación y Mantenimiento (OPEX)

Los costos de operación y mantenimiento generalmente se considera un porcentaje del 15% de la inversión (Rapport et al., 2012). Los costos de operación incluyen mantenimiento, suministro de materia prima, sueldos, y algunos costos de financiamiento e impuestos (Gatti, 2018). Para este caso, se utilizó un costo de O&M de \$12 dólares por tonelada, lo que en conjunto represente un total de costos de operación y mantenimiento anual de \$595,000 dólares.

En la **Figura 12** se muestran los datos de costos de capital (inversión) y costos de operación y mantenimiento, clasificados por capacidad de procesamiento, desde 10,000 toneladas anuales hasta 150,000, las cifras están en dólares.

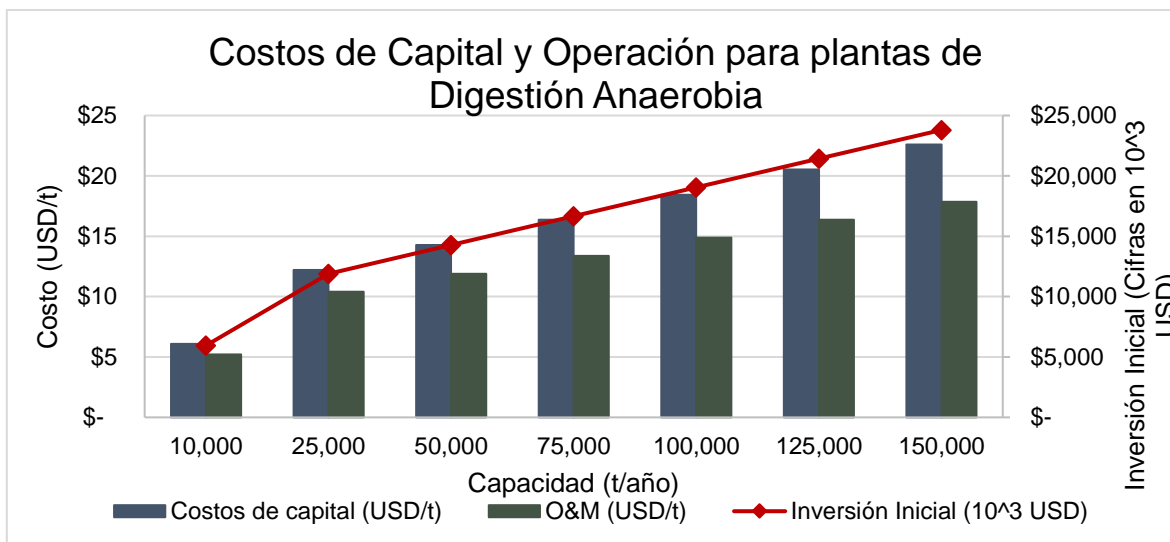


Figura 12. CAPEX y OPEX por capacidad de procesamiento.

Fuente: Elaboración propia con datos de: (Mutz D. et al., 2017); (Rapport J. et al., 2012) & (Durán-Moreno et al., 2018)

3.6.3 INDICADORES FINANCIEROS

3.6.3.1 Tasa Mínima Aceptable de Retorno³

Con la intención de llevar a cabo el análisis financiero, la determinación de una tasa mínima aceptable de retorno es requerida para proveer una tasa de referencia para aceptar o declinar la factibilidad de la inversión. La MARR sirve como una base comparativa para evaluaciones económicas en proyectos industriales y de ingeniería y el criterio para aceptación es que la tasa interna de retorno sea al menos igual a la MARR (Escamilla et al., 2016).

Esta tasa considera las tasas de inflación promedio (para el caso de México es del 4% de acuerdo con información histórica del Banco de México) y una prima de riesgo, la cual se estima dependiendo del mercado en el que se esté entrando, como estos proyectos de digestión anaerobia no tienen tanta competencia esta se encuentra entre el 2 y el 5%, para fines de cálculo se considera esta prima de riesgo con un valor de 2% (Escamilla et al., 2016). La MARR se calcula con la siguiente ecuación.

³ Minimum Acceptable Rate of Return (MARR) por sus siglas en inglés

Ecuación 40. Tasa mínima aceptable de retorno.

$$MARR = 3 \times t(ip) + pr$$

Donde:

MARR: Tasa Mínima Aceptable de Retorno (14%)

t(ip): Tasa de inflación promedio en México (4%)

pr: Prima de riesgo (2%)

3.6.3.2 FLUJO DE EFECTIVO

El flujo de efectivo anual considera los ingresos y costos en los que incurre el proyecto durante su horizonte de evaluación, el cual es de 20 años, y es la base para el cálculo del valor presente neto (VPN) del proyecto. Este se calcula con la siguiente ecuación.

Ecuación 41. Flujo de Efectivo.

$$FE = \sum Ingresos - \sum Costos$$

3.6.3.3 FLUJO DE EFECTIVO ACUMULADO

El flujo de efectivo acumulado sirve para identificar en qué años se tiene pérdidas, a partir de qué año se tienen ganancias y se recupera la inversión, para el caso del proyecto es de 7.54 años. Este se calcula tomando en cuenta el flujo de efectivo del año inmediato anterior y del año actual con la siguiente ecuación.

Ecuación 42. Flujo de efectivo acumulado.

$$FEC = FE1 + FE2$$

3.6.3.4 VPN

Como ya se mencionó anteriormente, el VPN es un indicador que permite traer a dinero presente las cantidades futuras, es importante mencionar que la interpretación del VPN dependerá del valor de los beneficios que se esperan del proyecto, este se calcula tomando en cuenta la inversión inicial y los flujos de efectivo para cada año, con la siguiente ecuación.

Ecuación 43. Valor Presente Neto.

$$VPN = -P + \frac{FE_1}{(1+i)^1} + \frac{FE_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{FE_n}{(1+i)^n}$$

Donde:

VPN: Valor Presente Neto

P: Inversión Inicial

FE_n: Flujo de efectivo para cada año

i: Tasa de descuento, se toma como referencia la MARR (14%)

3.6.3.5 CAE

Una vez calculado el VPN se puede calcular el Costo Anual Equivalente para realizar la comparación de ambos proyectos, el cual corresponde a desembolsos iguales durante el tiempo de vida del proyecto (20 años), mediante la ecuación siguiente.

Ecuación 44. Costo Anual Equivalente

$$CAE = VPN * \left[\frac{i (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right]$$

4. CASO DE NEGOCIO: PLANTA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

4.1 Resumen ejecutivo

Existen diferentes opciones para el tratamiento de los residuos para alejarlos de su disposición final y obtener algún tipo de valor agregado de ellos, como es el caso de la digestión anaerobia de los residuos sólidos urbanos, esta tecnología se utiliza con éxito en países industrializados y se presenta como una alternativa tecnológica para la gestión de los residuos (Wang & Bo, 2014).

Existen referencias importantes en la integración de plantas de Digestión Anaerobia en sitios existentes de composta, con resultados favorables debido a que el flujo actual de residuos procesados en estas plantas se presenta como insumos potenciales para el aprovechamiento y la producción de biogás (De Baere & Matheeus, 2012)

El Mapa de Ruta Tecnológica del biogás en México, identifica entre los retos el diseñar e implementar un programa para la instalación de plantas de biogás en alguna ciudad del país, con dimensiones industriales como un programa piloto para desarrollar y fortalecer el mercado del biogás en México, además el desarrollar un catálogo de tecnologías de biogás a nivel nacional, y promover los beneficios de un adecuado manejo de los residuos.

Con lo anterior, el presente proyecto pretende abordar estos temas con las acciones propuestas como recopilar información relevante de casos internacionales, por tecnología, por materia prima (FORSU) así como costos y eficiencias, analizar la factibilidad de la implementación de una planta con dimensiones industriales como parte de un programa piloto para documentar capacidades, y retos para el desarrollo del mercado del biogás en México.

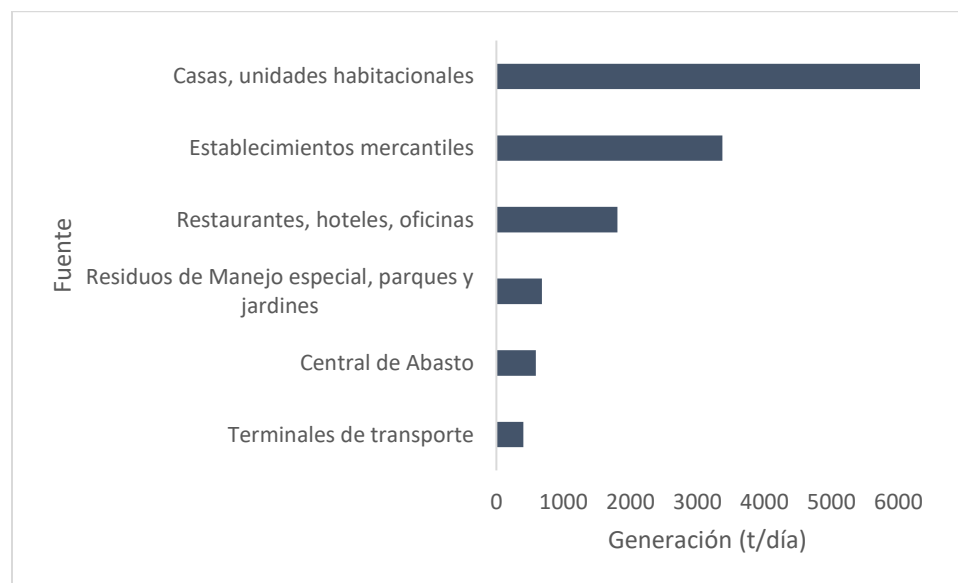
4.2 Problemática y situación actual

El escenario actual de la generación de residuos en México coloca a la Ciudad de México como una de las principales generadoras de desechos en el país, dentro de este panorama, también debe mencionarse que el manejo de los residuos en la capital es de condiciones especiales. La generación de residuos sólidos urbanos muestra una

tendencia creciente en la Ciudad de México, las estimaciones de generación muestran que en el año 2014 se generaban 12,893 toneladas al día de residuos, en el año 2019 se generaron **13,149 toneladas por día**, lo que muestra un incremento de 256 toneladas por día en un periodo de 5 años (SEDEMA, 2020).

La generación de residuos proviene en mayor proporción de fuentes domiciliarias (casas, unidades habitacionales, con el 48% de aportación del total de los residuos generados. Dentro de los grandes generadores, destaca la Central de abasto (CEDA) la cual aporta la cantidad de 585 t/día a la generación de residuos en la ciudad.

Figura 13. Generación de residuos por tipo de fuente.



Fuente: (SEDEMA , 2019)

La creciente urbanización tiene como consecuencia el incremento en la demanda de productos y servicios, debido a esto se espera que incremente la generación de residuos sólidos en la ciudad, de los cuales un porcentaje de aproximadamente 50% corresponden a la FORSU. Por otro lado, la ciudad concentra una de las mayores demandas de energía eléctrica del país, con un estimado de 12.6 TWh/año, equivalente al 6.2% del total nacional (Banco Interamericano de Desarrollo, 2019).

Aunque la Ciudad de México no es una entidad generadora de energía eléctrica, en 2017 fue la tercera entidad mayor consumidora de energía eléctrica con 12.6 TWh/año, equivalente al 6.2% del total nacional (Banco Interamericano de Desarrollo, 2019).

La falta de una infraestructura adecuada para el manejo de los residuos sólidos es un problema debido a la creciente urbanización; como ejemplo, en el año 2011 el Gobierno del Distrito Federal cerró las operaciones del relleno sanitario Bordo Poniente Etapa IV, al cual eran enviados los residuos, para después ser enviados a los rellenos sanitarios Milagro y Cañada en el Estado de México. Es evidente la falta de acciones orientadas a la sustentabilidad en el manejo de los residuos orgánicos, los cuales representan cerca del 50% de los residuos generados en la Ciudad de México.

4.3 Justificación de la alternativa elegida

Existen diferentes métodos de tratamiento para los RSU, sin embargo, en la Ciudad de México, la gestión de los residuos está enfocada en la recolección y en la disposición final en rellenos sanitarios, sin aprovechar el valor energético que tienen. Actualmente, el Gobierno de la Ciudad de México, ha propuesto un plan de acción llamado “Basura Cero”, el cual pretende adoptar acciones para una economía circular que entre otras cosas busca la reducción en la generación de residuos mediante:

- Aprovechamiento y valorización de los residuos
- Reciclamiento
- Separación y clasificación en la fuente para su reaprovechamiento

La meta es que del total de generación de residuos diaria se aprovechen 3,000 toneladas para su utilización como combustibles altern. Actualmente el costo del manejo de los residuos hasta su disposición final es de 2,800 millones de pesos, lo que significa un costo de 586 pesos por tonelada (SEDEMA, 2019).

En cuanto a la inversión proyectada por el Gobierno de la Ciudad de México, se cuenta con los siguientes datos (SEDEMA, 2019):

- Inversión inicial: 300 millones de pesos en infraestructura
- Inversión a partir del segundo año: 750 millones de pesos anuales
- Ahorro de la Ciudad al 2024: 8,381,694 millones de pesos.

Objetivos del Negocio

Aportar a la Ciudad de México una alternativa para mejorar la Gestión Integral de Residuos Sólidos y para contribuir en la implementación de procesos de digestión anaerobia para la valorización energética de residuos sólidos orgánicos.

Objetivos del Proyecto

Evaluar la prefactibilidad técnica, económica y ambiental de construir una planta de digestión anaerobia para tratar 50,000 toneladas por año de la fracción orgánica de residuos sólidos orgánicos con el fin de producir biogás para mejorar la Gestión Integral de Residuos y contribuir a la producción de energía alternativa en la Ciudad de México.

Propuesta de Solución

El proyecto consiste en la evaluación para la implementación de una planta de digestión anaerobia que tenga la capacidad de procesar **50,000 toneladas al año**, para la generación de biogás con alto contenido en metano, con la intención de aprovechar su valor energético asociado para la generación de energía. El digestato obtenido del proceso será acondicionado para su uso como fertilizante natural para los campos de cultivo en las zonas rurales aledañas.

4.4 Selección de tecnología

El proceso que se analiza para este proyecto es la digestión anaerobia de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos, provenientes de la Central de Abasto de la Ciudad de México, la cual pretende cerrar el ciclo de generación de residuos al transformar las salidas del sistema convencional (desechos) en entradas potenciales para la generación de energía y la producción de un fertilizante natural. Las alternativas tecnológicas del proceso con las que se cuentan para este fin se

diferencian principalmente por la manera en la que se lleva a cabo la digestión: húmeda o seca.

Esta comparación es importante debido a que entre estas dos tecnologías existen diferencias en los procesos, en la operación y en los rendimientos, además tienden a utilizarse dependiendo de las características de la materia prima a suministrar. En la **Tabla 17** se muestra la distribución de los criterios y los pesos empleados para esta etapa.

Tabla 17. Grupos de criterios de evaluación.

Grupo de Criterios	Peso
Técnicos	30%
Técnicos Complementarios	15%
Económicos	40%
Sociales	15%
Total	100%

Para llevar a cabo esta evaluación de tecnologías una vez establecidos los criterios, se empleó el software Visual PROMETHEE, el cual muestra como resultados los flujos de preferencia parciales ($\Phi+$; $\Phi-$) y el Flujo de preferencia total ($\Phi = \Phi+ - \Phi-$); adicionalmente, se incluyen los gráficos que representan dichos flujos. En la **Figura 14**, se muestran los resultados de los flujos de preferencia parciales ($\Phi+$ lado izquierdo y $\Phi-$ lado derecho), se observa que la alternativa mejor posicionada es la Digestión Anaerobia Húmeda. La **Figura 15** muestra el flujo de preferencia total, por lo que se concluye que la digestión anaerobia húmeda es la más adecuada para este proyecto. Los resultados de esta evaluación preliminar de tecnologías se muestran a continuación:

Tabla 18. Flujos de preferencia parcial.

Alternativa	Φ	$\Phi+$	$\Phi-$
DA Húmeda	0.4300	0.5950	0.1650
DA Seca	-0.4300	0.1650	0.5950

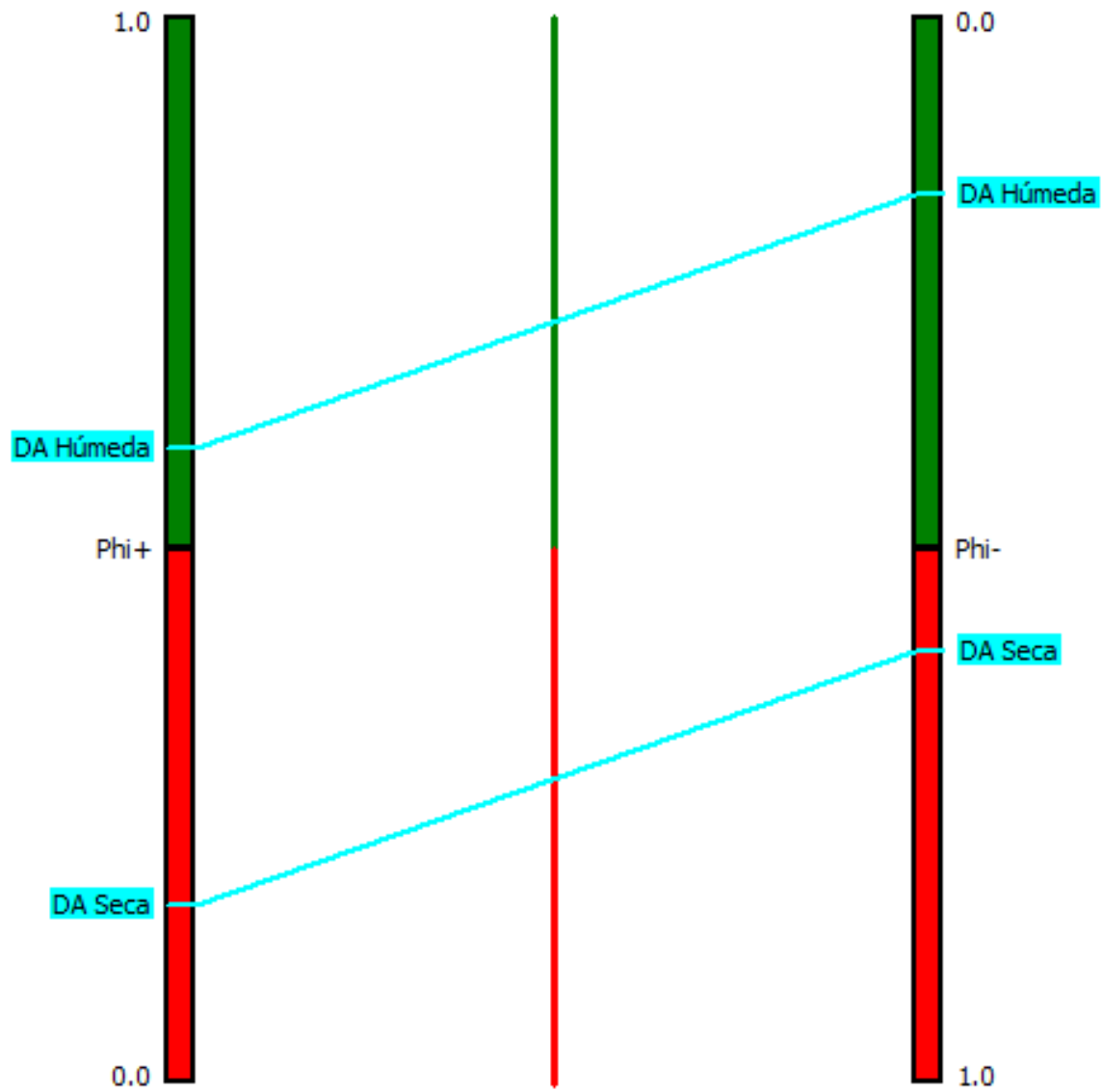


Figura 14. Flujos de preferencia parciales.

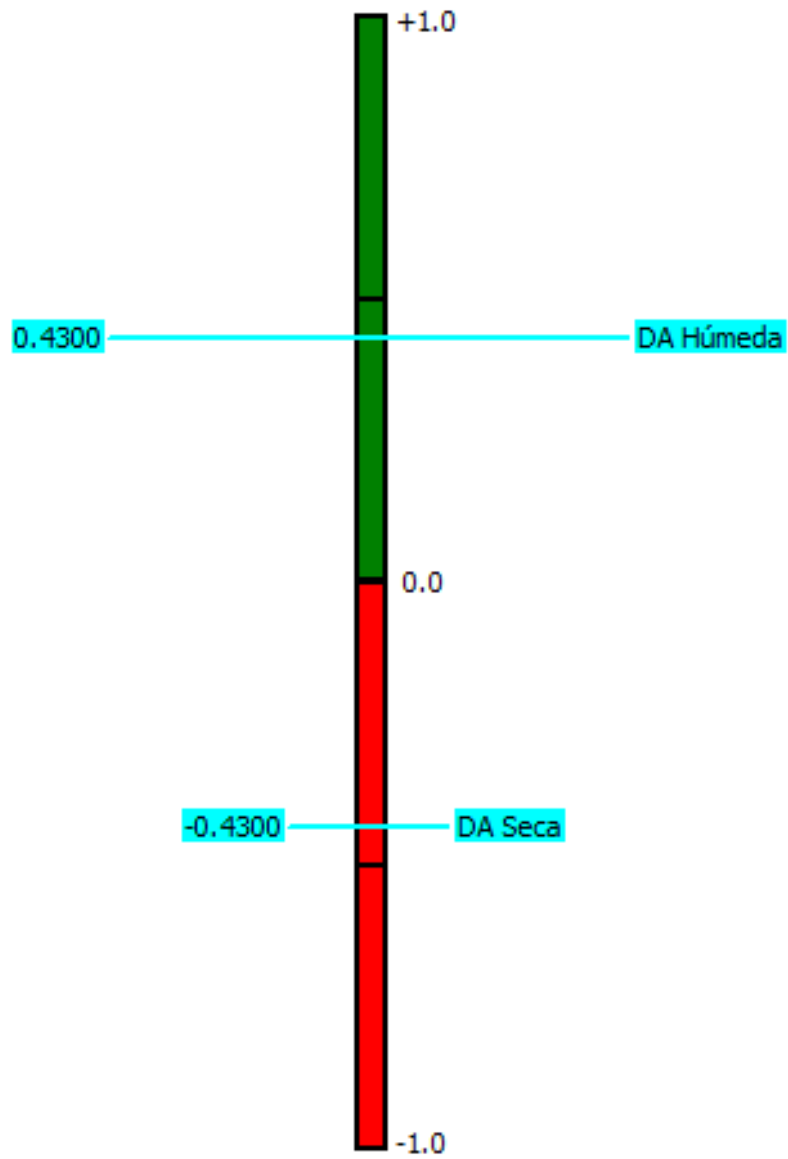


Figura 15. Flujo de preferencia total

4.5 Selección de Sitio

Las condiciones acerca de la ubicación óptima, el tamaño de planta y los parámetros de operación óptimos, así como de donde se puede proveer de la materia prima a la misma, se pueden obtener a partir de diferentes criterios, entre ellos los costos de transporte de materia prima y la proximidad a los beneficiarios (Delzeit & Kellner, 2013).

Se ha considerado la expansión de instalaciones en sitios en donde se lleva a cabo el composteo debido a que puede aumentar la diversidad de los residuos orgánicos tratados, la instalación de sistemas de digestión anaerobia aumenta la capacidad de procesamiento de éstas al requerir menos espacio para su tratamiento en comparación con el tratamiento aerobio del compostaje (McDonald, 2012). Tomando en cuenta lo anterior, las actuales plantas de composta de la Ciudad de México presentan las condiciones favorables para albergar una planta de estas características. Los sitios propuestos se muestran en la **Tabla 19**.

Tabla 19. Alternativas de Sitio⁴.

Factor	Característica	Ubicación Propuesta			
		Xochimilco	Iztapalapa	Álvaro Obregón	Milpa Alta
Localización	Dirección del sitio	Periférico Oriente S/N, casi esquina con Canal de Chalco, Xochimilco, CDMX.	Av. Tláhuac, S/N, Pueblo de San Lorenzo Tezonco, Iztapalapa CDMX.	Av. 5 de mayo S/N, Lomas de Tarango, Álvaro Obregón, CDMX.	Ejido San Antonio Tecomitl, Milpa Alta, CDMX.
Superficie	Área Disponible	23,940 m ²	10,000 m ²	2,400 m ²	5,000 m ²
Uso de suelo actual	Tipo de Instalaciones existentes	Planta de Composta	Planta de Composta	Planta de Composta	Planta de Composta
Cercanía con la materia prima	Cercanía con la fuente generadora de residuos	14 km	14 km	19 km	36 km

⁴ La información recopilada en esta tabla se obtuvo mediante el uso de la herramienta Google Maps, y de Sánchez et al. (2016).

Factor	Característica	Ubicación Propuesta			
		Xochimilco	Iztapalapa	Álvaro Obregón	Milpa Alta
Cercanía con el mercado (digestato)	Cercanía para uso y distribución de energía eléctrica, y del digestato como fertilizante	< 15 km	< 15 km	> 15 km	< 15 km
Accesibilidad a las instalaciones	Vías de acceso adecuadas para el transporte y suministro de materia prima	Acceso para vehículo de carga de 25 t	Acceso para vehículo de carga de 25 t	Acceso para vehículo de carga de 15 t	Acceso para vehículo de carga de 20 t

Al realizar la recopilación de información, se observa que existen algunas diferencias significativas, como el caso del área disponible para la construcción, la cual, de acuerdo con referencias bibliográficas, para una planta que procese 50,000 toneladas anuales el espacio mínimo requerido es de 8,000 m². Sin embargo, debe considerarse que se requiere un espacio adicional de 4,000 m² para la estabilización del digestato (Epp et al., 2008). Con lo anterior, se descartan las plantas de composta ubicadas en la delegación Iztapalapa, Álvaro Obregón y Milpa Alta, por no contar con la suficiente extensión de terreno, además de que las últimas dos se encuentran más alejadas de la fuente generadora de residuos (CEDA) lo que implicaría costos más elevados en el transporte de los residuos.

La ubicación propuesta para la planta de Digestión Anaerobia es la actual planta de Composta "Axolotl", localizada en la alcaldía de Xochimilco, actualmente produce alrededor de 2,646 t/año de composta a partir de residuos provenientes de poda, residuos de mercado, gallinaza y estiércol de caballo. Las instalaciones actuales cuentan con todos los servicios, el suelo está conformado por una plancha de concreto y cuentan con dos tomas de agua, la cual no escasea (Sánchez et al., 2016). La planta de composta cuenta con vías de acceso importantes, como lo son anillo periférico y la Avenida Canal de Chalco; se encuentra rodeada por invernaderos y campos de cultivo

conocidos en la zona como *chinampas*⁵, entre los cuales sería factible distribuir el digestato para su uso como fertilizante.

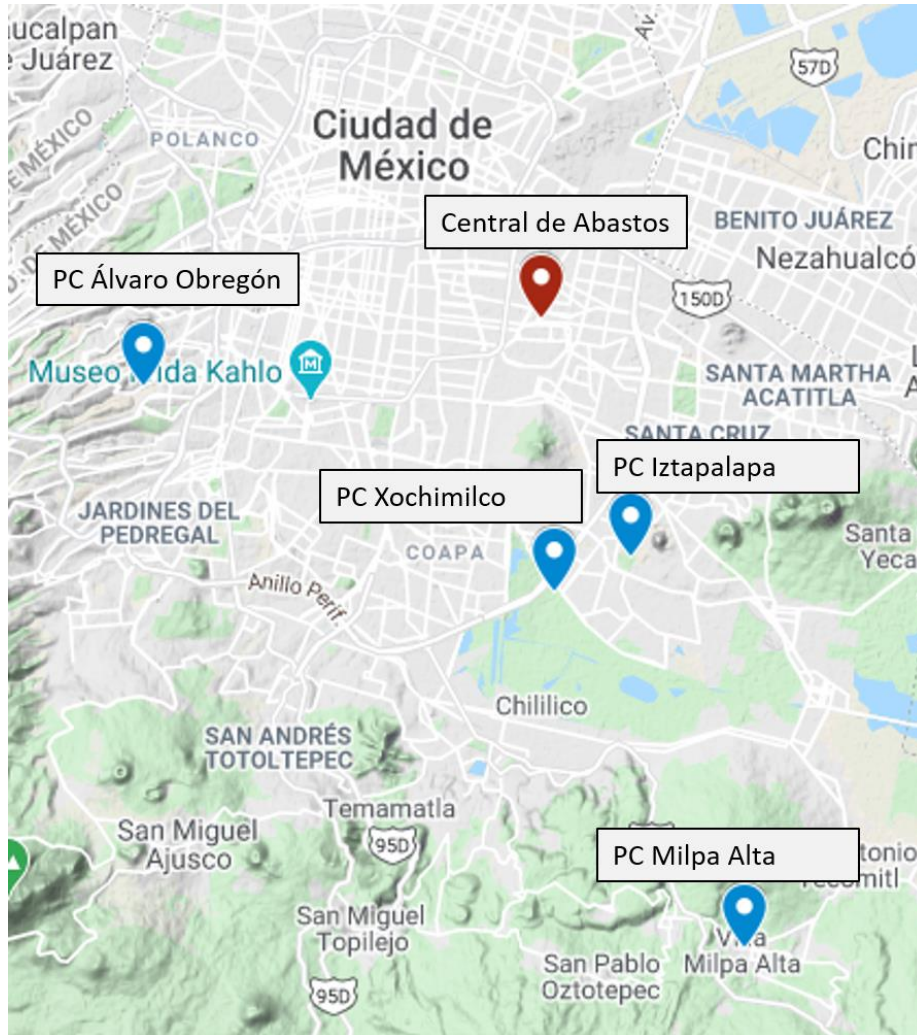


Figura 16. Ubicación de las plantas de composta.

⁵ Las chinampas son un sistema artificial de cultivo construido en zonas donde el agua es el principal recurso natural presente en el medio. Se construyen con el fin de cultivar plantas, verduras y hortalizas para el autoconsumo y mercado local (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2018).

4.6 Aspectos a Evaluar de la alternativa de solución

4.6.1 Beneficios del tratamiento de la FORSU vía Digestión Anaerobia

La aplicación de sistemas de digestión anaerobia para el tratamiento de los RSU es ampliamente utilizada en países desarrollados, principalmente en Europa, y se tiene registros de un incremento en el interés para su implementación en países en vías de desarrollo (Abbasi & Tauseef, 2012). Los atributos que presenta la tecnología de Digestión Anaerobia se enlistan a continuación:

- Los digestores anaerobios, al ser sistemas cerrados, permiten la captura de todo el biogás generado, a diferencia de los rellenos sanitarios, en los cuales sólo se captura un porcentaje del 30-40% en la mayoría de los casos, o en casos con alta eficiencia se captura como máximo un 60%.
- El producto final de la digestión anaerobia puede ser acondicionado para su uso como fertilizante o mejorador de suelos.
- La conversión de materia orgánica digerible en digestores anaerobios, en lugar de su envío a rellenos sanitarios.
- La reducción de emisiones de GEI causadas por la disposición de los residuos en rellenos sanitarios, así como de lixiviados que pueden contaminar los suelos.

4.6.2 Estimado de inversión para el proyecto

Diversos autores reconocen los beneficios económicos y financieros que traen consigo los proyectos de digestión anaerobia, sobre todo en la contribución al manejo de los residuos (Mutz D. et al., 2017).

Al ser esta una etapa de prefactibilidad, el estimado de costo que corresponde a la etapa FEL I es clase V, el cual es de orden de magnitud y tiene una exactitud de +50/-30%. Este estimado se construye a partir de referencias de proyectos similares, por lo que se recopiló la información acerca de las tecnologías de digestión anaerobia húmeda de proveedores líderes y se obtuvo la siguiente información:

Tabla 20. Costos de inversión y de operación de plantas de Digestión Anaerobia Húmeda.

Tecnólogo	Costos de inversión (USD/t/año)	Costos Operativos (USD/t/año)
BTA	531	80
Ros Roca	489	73
Strabag	446	67
Weltec	325	49
PROMEDIO	448	67

Fuente: Durán-Moreno et al. (2018).

4.6.3 Configuración de la alternativa.

El proyecto que se describe en esta tesis tiene como finalidad la integración de la tecnología de digestión anaerobia a la Gestión Integral de los Residuos de la Ciudad de México. Los aspectos más importantes del proyecto a evaluar se muestran en la **Tabla 21**.

Tabla 21. Datos importantes del proyecto.

Origen de la FORSU:	Central de Abasto
Capacidad de tratamiento:	50,000 t/año
Producción de biogás:	634 Nm ³ / t SV
Contenido de Metano (CH₄):	57%
Generación Eléctrica:	110 kWh/t FORSU
Localización propuesta	Planta de Composta Xochimilco

4.7 Lista de Supuestos

El proceso de Digestión Anaerobia es complicado dada su naturaleza, depende de diversos parámetros como composición del sustrato, tamaño de partícula, régimen de alimentación, humedad y de condiciones operativas. Con la finalidad de simplificar algunos aspectos del proceso, se realizan los siguientes supuestos:

1. La cantidad de biogás producido será calculada teóricamente utilizando un modelo construido en Excel con información de autores como Durán-Moreno, et al. (2018), Tsydenova et al. (2019) & Olivard (2017) para realizar dicha estimación.
2. El diseño de los biodigestores propuestos tendrá como premisa principal que trabajan a condiciones óptimas de Temperatura, Presión, pH, y mezclado, planteados teóricamente.

4.8 Identificación de las personas interesadas.

El manejo de los residuos sólidos urbanos es un tema muy complejo, en el cual se requiere de la intervención de todos los grupos de personas interesadas más relevantes. El proyecto de Digestión Anaerobia se encuentra dentro de este contexto, muchos proyectos se abandonan principalmente por la exclusión de grupos de interesados opositores, problemas de coordinación entre los interesados, la falta de comunicación y la escasa cooperación para lograr acuerdos que permitan llevar a cabo los proyectos.

De la lista se identifican a tres grupos de interesados con un nivel de influencia 5, correspondiente a alto interés y poder, lo que significa que ellos son los que pueden definir la situación del proyecto. Por lo tanto, la estrategia para llevar a cabo el proyecto debe contar con la intervención y el trabajo en conjunto entre los grupos del nivel 5 y del nivel 4.

La **Tabla 23** muestra un total de 12 grupos de interesados identificados, el rol que tienen dentro del proyecto de acuerdo con su nivel de influencia, las posibles expectativas y las responsabilidades en el proyecto. El nivel de influencia se establece de acuerdo con la **Tabla 22**, en la cual se muestra en la escala de 1 al 5, la descripción del perfil del grupo interesado y el manejo que se le debe dar dentro del contexto del proyecto.

Tabla 22. Clasificación del nivel de influencia de los grupos de interesados.

Escala	Descripción	Manejo
5	Personas con alto poder e interés	Deben ser gestionadas con sumo cuidado
4	Personas con alto poder y mediano interés	Deben ser mantenidos satisfechos
3	Personas con poco poder y alto interés	Deben ser mantenidos informados
2	Personas con poco poder y poco interés	Sólo deben ser supervisados
1	Personas sin poder y con poco interés	Sólo deben estar bajo supervisión

Tabla 23. Lista de los principales grupos de interesados en el proyecto de Digestión Anaerobia.

No.	Grupo de Interesados	Nivel de Influencia (1-5)	Rol en el proyecto	Expectativas Principales	Responsabilidades en el Proyecto
1	Administración de la CEDA	5	* Facilitar la cooperación y comunicación entre los generadores de residuos y los procesadores de residuos.	* Incentivos por su intervención en la cadena de valor de la biomasa.	* Conocer el impacto social, económico y ambiental de la generación de residuos.
2	Sector Privado	5	* Proveer la tecnología para la construcción de una planta de Digestión Anaerobia	* Conseguir contrato para desarrollar tecnología de digestión anaerobia	* Proponer el proyecto de digestión anaerobia con buena relación costo-beneficio.
3	Secretaría de Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA)	5	* Llevar a cabo un proyecto que contribuya al cumplimiento de las metas planteadas de reducción de residuos y generación de energía.	* Fortalecer la infraestructura en el manejo de los residuos. * Cumplir con las metas planteadas en el programa Basura Cero	* Identificar los esquemas para llevar a cabo un proyecto de digestión anaerobia
4	Sector Público	4	* Coordinar el trabajo conjunto dentro y a través de las autoridades para mantener enfoques consistentes.	* Contar con un proyecto que presente beneficios económicos, políticos y sociales	* Establecer los mecanismos para llevar a cabo el proyecto de DA. * Actuar como moderador entre las comunidades locales, el gobierno, asociaciones y el sector empresarial
5	Responsables políticos	4	* Proveer certeza jurídica y legal	* Sentar las bases para el desarrollo de proyectos de digestión anaerobia	* Establecer los lineamientos legales para proyectos de Digestión Anaerobia

Evaluación de prefactibilidad de una planta de digestión anaerobia para el procesamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos en la Ciudad de México.

No.	Grupo de Interesados	Nivel de Influencia (1-5)	Rol en el proyecto	Expectativas Principales	Responsabilidades en el Proyecto
6	Contratistas (manejo y disposición)	3	* Proveer instalaciones y servicios rentables para el tratamiento de residuos.	* Asegurar la continuidad de contratos de prestación de servicios	* Proporcionar datos precisos y actualizaciones de rendimiento en los servicios.
7	Trabajadores del Servicio de Recolección de Residuos	3	* Brindar servicio de manejo de residuos	* Incentivos por el manejo adecuado de los residuos	* Proporcionar un servicio que cumpla con las mejores prácticas, cumpliendo los lineamientos establecidos.
8	Residentes y comunidades	3	* Actuar como receptor y transmisor de información.	* Evitar afectaciones a sus comunidades	* Comprometerse con otros residentes para establecer sus posturas.
9	Expertos (académicos)	3	* Proveer de conocimientos técnicos y científicos.	* Aportar los conocimientos con los que cuenta la academia	* Brindar las bases y principios de la tecnología desde el enfoque científico
10	Sector Financiero	3	* Presentar los esquemas de financiamiento disponibles para proyectos de Digestión Anaerobia	* Establecer las bases para el desarrollo de proyectos de digestión anaerobia	* Fomentar el desarrollo de proyectos a través de esquemas de financiamiento adecuados.
11	Comerciantes	2	* Abordar los problemas de desperdicio de alimentos en su cadena de valor.	* Incentivos por el manejo sustentable	* Priorizar las actividades comerciales social y ambientalmente responsables.
12	Agricultores locales	1	* Conocer los beneficios de utilizar fertilizantes naturales.	* Contar con un fertilizante con buena relación costo-beneficio	* Abordar los aspectos de una agricultura sustentable

5. ESTUDIO DE MERCADO

5.1 Generación de Residuos Sólidos Urbanos en la Ciudad de México

La Ciudad de México, ubicada en la zona centro del país, está conformada por 16 alcaldías que en conjunto suman una extensión de 1492 km², es la entidad federativa más pequeña del país. Sin embargo, es la segunda entidad con mayor número de habitantes. Esta enorme concentración poblacional, demanda enormes cantidades de productos y servicios, además de recursos de fuentes naturales como el agua y la energía, lo que deriva en problemáticas políticas, ambientales y sociales, como la mala planeación urbana para el uso eficiente de los recursos, la construcción no regulada de desarrollos inmobiliarios y comerciales, y por supuesto la generación de residuos sólidos, cuya principal fuente de generación son las casas habitación y los establecimientos comerciales.

En consecuencia, la población de la Ciudad y la población flotante proveniente de la Zona Metropolitana del Valle de México, generan **13,149 toneladas diarias de RSU**, dentro del diagnóstico de generación de residuos, se sabe que la mayor cantidad de residuos provienen de fuentes domiciliarias, con el 48.10% del total, seguida por los comercios con el 25.67%; los restaurantes, hoteles y oficinas con el 13.76%; residuos de manejo especial, parques y jardines con 5.16%; Central de Abasto con 4.26%; y residuos controlados con 3.05% como se muestra en la **Figura 17**.

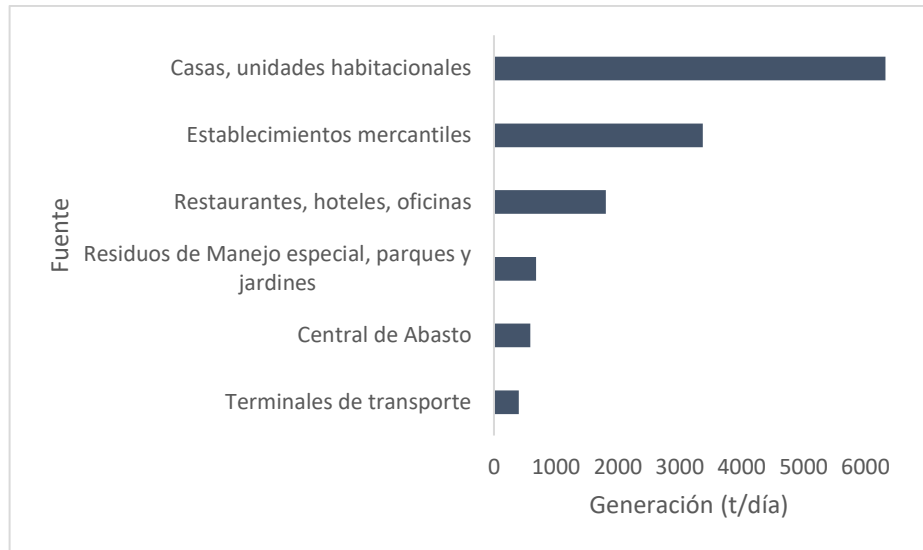


Figura 17. Generación por tipo de fuente.

Fuente: Elaboración propia con datos de (SEDEMA, 2020)

Acerca de las cifras de generación de RSU (Muñoz & Morales, 2018) mencionan que existen limitaciones importantes debido a que no se realizan mediciones directas, sino que son calculadas empleando índices para la generación de residuos en cada una de las fuentes generadoras, los cuales se calculan conforme a la norma NMX-AA-61-1985 sobre la Determinación de la Generación de Residuos Sólidos, la cual establece un procedimiento a partir de la información obtenida de un muestreo estadístico aleatorio de campo, con duración de ocho días para cada estrato socioeconómico, mediante el cual se pesan los residuos generados.

5.2 Generación per cápita

La generación promedio per cápita en el año 2019 es de **1.46 kg/hab/día**, este valor es particularmente importante porque es un indicador de la tendencia de generación, ya que esta depende en gran medida del crecimiento poblacional que a su vez incrementa la demanda de productos y servicios.

5.3 Recopilación de la información histórica sobre la cantidad de residuos generados

De acuerdo con datos históricos de generación diaria de residuos se observa que las tendencias en el aumento en la generación se relacionan directamente con el crecimiento poblacional, debido a sus hábitos de consumo, sistemas de producción y a las actividades económicas. De acuerdo con el Inventario de Residuos Sólidos de la Ciudad de México 2019, el promedio de generación ha sido de $12,812 \pm 237$ toneladas al día. En el año 2019 se presentó un incremento de 76 toneladas diarias con respecto al 2018.

Los datos históricos de la generación de residuos indican que la tasa promedio de crecimiento anual es de 0.59%. En la **Tabla 24** se muestran los datos de generación anuales en el periodo 2014-2019.

Tabla 24. Datos históricos de generación diaria de residuos en la CDMX.

Año	Generación de residuos (t/día)	Cambio con respecto al último año
2014	12,893	-
2015	12,843	-0.38%
2016	12,920	0.60%
2017	12,998	0.60%
2018	13,073	0.58%
2019	13,149	0.58%

Fuente: Elaboración propia con datos de (SEDEMA, 2020).

En la **Figura 18** se muestra la tendencia de crecimiento en la generación de residuos en el periodo de 2014 a 2019.

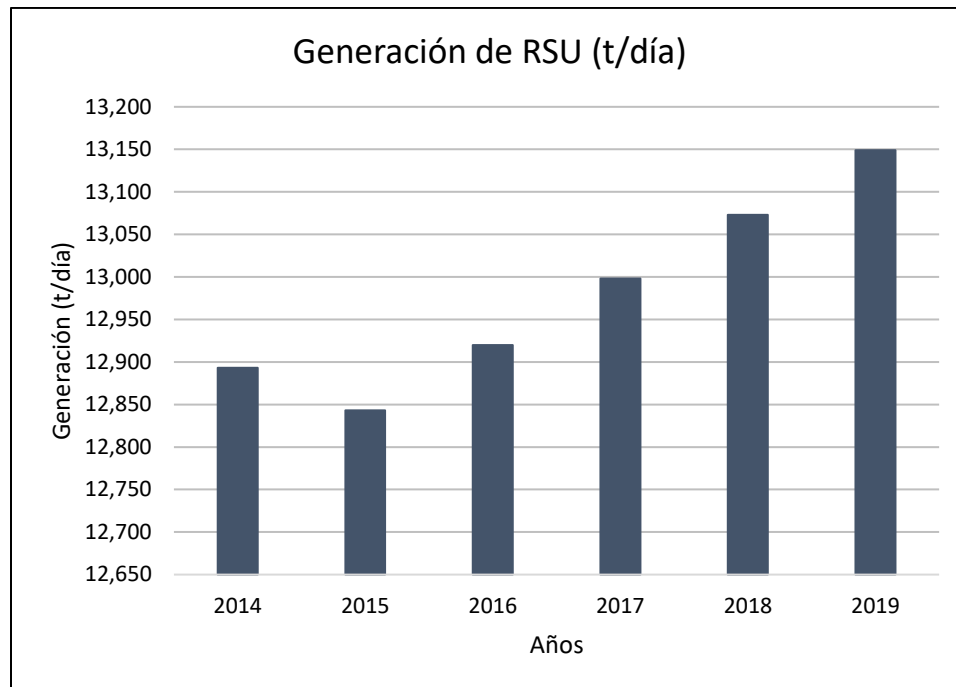


Figura 18. Datos históricos de generación de RSU en la Ciudad de México.

Fuente: Elaboración propia con datos de (SEDEMA, 2020).

5.3.1 Generación de Residuos en la Central de Abastos

La Central de Abastos es el centro de comercio mayorista y minorista más importante de la Ciudad de México y del país, en ella, se comercializan diariamente grandes cantidades de alimentos, bebidas, abarrotes, entre otros productos de consumo, cuenta con una extensión de 327 hectáreas. Dentro de la CEDA actualmente se generan alrededor de 585 toneladas diarias de residuos, lo que equivale a más de 213,000 toneladas anuales (SEDEMA, 2020). En los últimos años se ha observado que la CEDA aporta entre el 4 y 5% de la generación diaria de residuos. En la **Tabla 25** se muestra el histórico de generación de la CEDA.

Tabla 25. Generación diaria de RSU en la Central de Abastos.

Año	Generación de RSU (t/día)
2014	578
2015	575
2016	579
2017	582
2018	586
2019	589

Fuente: Elaboración propia con datos de (SEDEMA, 2020).

5.4 Estimación de la demanda de servicios de recolección

La demanda de los servicios de recolección está relacionada con la cantidad de residuos que se generan y por lo tanto con la cantidad de habitantes, en la Ciudad de México, no sólo los residentes generan dichas cantidades de residuos, sino también la población flotante proveniente de la ZMVM. En general, la generación y composición de los RSU depende de los siguientes factores (Meixueiro et al., 2008):

- Ingresos: a mayor ingreso, mayor la tasa de generación per cápita de RSU.
- Crecimiento poblacional: A mayor tasa de crecimiento poblacional, mayor será la generación.
- Composición de los RSU: Dependen de los hábitos de consumo y producción, además varían con el tiempo
- Estacionalidad: Dependiendo de la época del año, los residuos varían.

De acuerdo con Meixueiro et al., (2008) el crecimiento en la generación de residuos puede estimarse con base en dos variables: el crecimiento proyectado de la población y la evolución de la generación per cápita de ésta.

La población de la Ciudad de México en el año 2014 era de 8,851,080 habitantes, con una tasa promedio de crecimiento anual de 0.3%, el cual se ha mantenido en promedio desde el año 1990 (Anzaldo, 2016).

Con estos datos de crecimiento poblacional y los históricos de generación de residuos es posible realizar una proyección de la generación para el año 2040.

En la **Tabla 26**, se muestra la proyección de la generación de residuos para el año 2040.

Tabla 26. Proyección de la generación diaria de RSU.

Año	Generación de residuos (t/día)	Cambio Respecto al último año	CEDA	Cambio con respecto al último año	Población CDMX	Generación per cápita promedio (kg/hab/día)	Cambio con respecto al último año
2014	12,893		578		8,851,080	1.457	
2015	12,843	0%	575	0%	8,877,633	1.447	-0.69%
2016	12,920	0.60%	579	0.60%	8,904,266	1.451	0.30%
2017	12,998	0.60%	582	0.60%	8,930,979	1.455	0.30%
2018	13,073	0.58%	586	0.58%	8,957,772	1.459	0.28%
2019	13,149	0.58%	589	0.58%	8,984,645	1.463	0.28%
2020	13,228	0.5995%	593	0.60%	9,011,599	1.468	0.30%
2021	13,307	0.5995%	596	0.59%	9,038,634	1.472	0.30%
2022	13,387	0.5995%	600	0.59%	9,065,750	1.477	0.30%
2023	13,467	0.5995%	603	0.59%	9,092,947	1.481	0.30%
2024	13,548	0.5995%	607	0.59%	9,120,226	1.485	0.30%
2025	13,629	0.5995%	610	0.59%	9,147,587	1.490	0.30%
2026	13,711	0.5995%	614	0.59%	9,175,029	1.494	0.30%
2027	13,793	0.5995%	617	0.59%	9,202,554	1.499	0.30%
2028	13,876	0.5995%	621	0.59%	9,230,162	1.503	0.30%
2029	13,959	0.5995%	625	0.59%	9,257,853	1.508	0.30%
2030	14,043	0.5995%	628	0.59%	9,285,626	1.512	0.30%
2031	14,127	0.5995%	632	0.59%	9,313,483	1.517	0.30%
2032	14,212	0.5995%	636	0.59%	9,341,423	1.521	0.30%
2033	14,297	0.5995%	640	0.59%	9,369,448	1.526	0.30%
2034	14,382	0.5995%	643	0.59%	9,397,556	1.530	0.30%
2035	14,469	0.5995%	647	0.59%	9,425,749	1.535	0.30%
2036	14,555	0.5995%	651	0.59%	9,454,026	1.540	0.30%
2037	14,643	0.5995%	655	0.59%	9,482,388	1.544	0.30%
2038	14,730	0.5995%	659	0.59%	9,510,835	1.549	0.30%
2039	14,819	0.5995%	663	0.59%	9,539,368	1.553	0.30%
2040	14,908	0.5995%	667	0.59%	9,567,986	1.558	

Fuente: Elaboración propia con datos de (INEGI, 2015) & (SEDEMA, 2020).

La tabla anterior se construyó tomando como punto de partida los datos para el año 2014 de número de habitantes (8,851,080), tasa promedio de crecimiento de

población (0.3%), generación diaria de residuos (12,893 t/día) y generación per cápita (1.457 kg/hab/día). En la **Figura 19** se muestra la proyección hasta el año 2040.

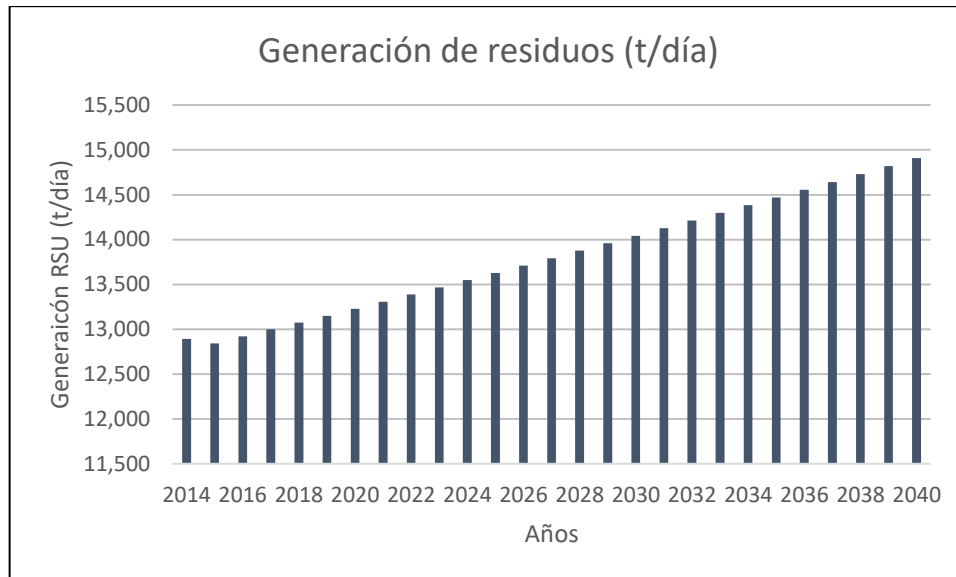


Figura 19. Proyección de la generación diaria de residuos al 2040.

5.5 Oferta actual de los servicios de manejo de residuos

La infraestructura es clave para el manejo de los residuos, particularmente para las condiciones de generación que presenta la Capital, es importante que existan condiciones para el manejo en todo el proceso, desde su recolección en las fuentes generadoras, el traslado de los desechos a sitios de tratamiento y/o aprovechamiento y la disposición final.

Las **Estaciones de Transferencia**, son instalaciones intermedias entre las fuentes que generan los residuos y los diferentes destinos (plantas de selección, compactadoras o sitios de disposición final), en estas estaciones se lleva a cabo la transferencia de los residuos de los vehículos recolectores a vehículos especiales con mayor capacidad, para así reducir los tiempos y los numero de traslado de residuos hacia los distintos sitios. Las estaciones de transferencia son la mayor infraestructura con la que cuenta la Ciudad de México para el manejo de los residuos, se cuenta con

13 estaciones de transferencia distribuidas a lo largo de 11 de las 16 delegaciones de la Ciudad (ver

Figura 21). De acuerdo con el Inventario de Residuos Sólidos Urbanos, en 2019 ingresaron **8379 t/día** a las distintas estaciones de transferencia, lo que representa cerca del 65% del total de residuos generados diariamente, el 88% de estos residuos provienen de la recolección delegacional y el 7% de la Central de Abastos.

El principal destino de los residuos ingresados es a sitios de disposición final en un 62%, seguido por 22% a plantas de selección; 14% a plantas de composta y 2% a plantas de compactación (SEDEMA, 2020).

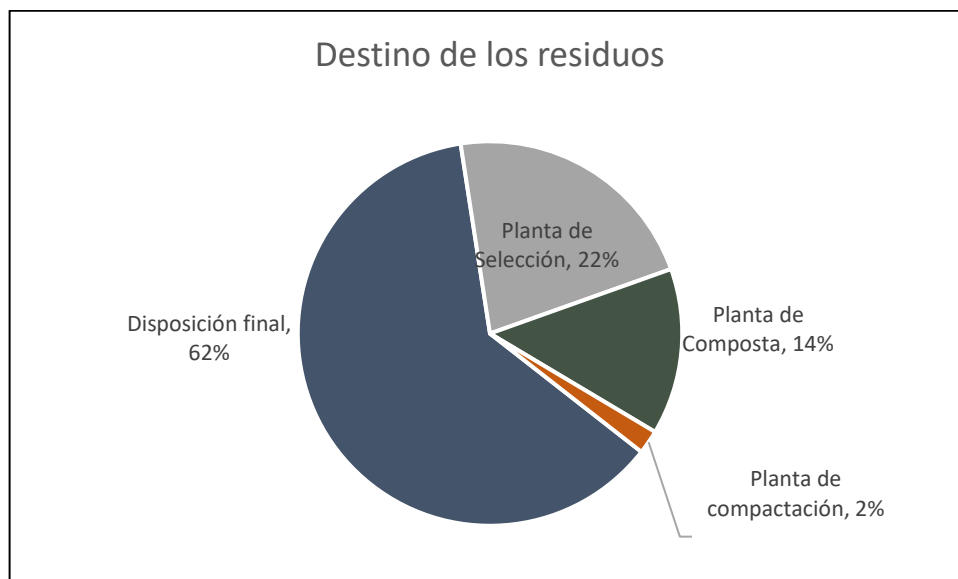


Figura 20. Destino de los residuos generados en la Ciudad.

Fuente: Elaboración propia con datos de (SEDEMA, 2020)

Las **Plantas de selección**, son sitios donde se realiza una segunda separación y clasificación de materiales que conservan sus características físicas y químicas y que se pueden valorizar, entre los residuos que se valorizan se encuentran: PET, cartón, papel, vidrio y metales como aluminio y hierro; el material que no puede ser recuperado se envía a sitios de disposición final. En conjunto las plantas de selección procesan una cantidad de 3,524 t/día.

Las **Plantas compactadoras**, tienen como objetivo contribuir a incrementar el aprovechamiento de los residuos reciclables y reducir los residuos que se envían a disposición final, la ciudad cuenta con dos instalaciones de compactación con una capacidad de 367,100 t/año. En 2019 se recibieron un promedio de 582 t/día.






Las **Plantas de composta**, son las encargadas de procesar los residuos orgánicos biodegradables, obteniendo como subproducto la composta que se obtiene mediante un proceso de degradación aerobia, en 2019, sólo operaron 6 plantas, una menos que en 2018 debido a que la planta de composta ubicada en Milpa Alta terminó sus operaciones en 2018. La composta se emplea en las diversas áreas de la ciudad y en áreas agrícolas.

La **Planta para Tratamiento de Residuos Orgánicos del Centro de Acopio Nopal-Verdura en Milpa Alta**, es una instalación en la que se lleva a cabo la digestión anaerobia, tiene como finalidad diversificar las opciones para el tratamiento de los residuos orgánicos en la Ciudad de México. La planta cuenta con una superficie de 240 m² tiene una capacidad para 1,100 t/año, con una producción de 170 m³ de biogás, lo que equivale a 175 kWh. En 2019 ingresaron 1,022 toneladas, con una generación de biogás de 51,100 m³, con una composición de 55% de metano y 45% de CO₂. El digestato producido se envía como fertilizante a terrenos de cultivo cercanos a la planta (SEDEMA, 2020).

Los **Sitios de Disposición Final**, deben cumplir con los lineamientos que se indican en la NOM-083-SEMARNAT-2003. Debido a estos requisitos la Ciudad de México no cuenta con un sitio de disposición final propio, y desde el cierre definitivo del relleno sanitario Bordo Poniente Etapa IV, se trasladan los residuos a 5 rellenos sanitarios en el Estado de México y 1 en Morelos, lo cual incrementa los costos debido al transporte y los costos por disposición final.

En la **Tabla 27** se resume la infraestructura disponible para la gestión y manejo de los residuos sólidos urbanos de la Ciudad de México.

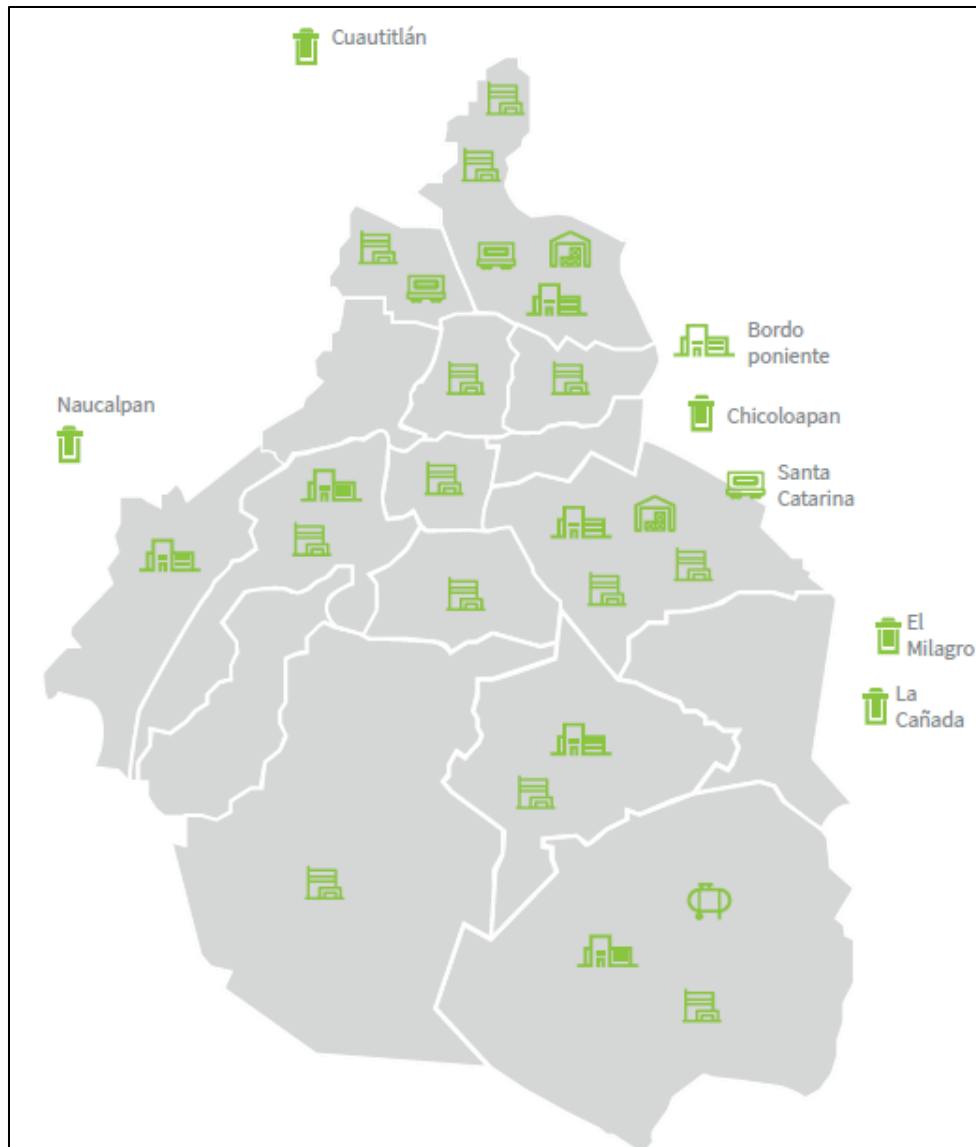
Tabla 27. Infraestructura actual para el manejo de los RSU en la Ciudad de México.

Infraestructura	Cantidad	Características
Estaciones de transferencia 	13	Procesamiento: 8,371 t/día,
Plantas de Selección 	3	Tratamiento: 3,253 t/día Recuperación de subproductos: 128 t/día
Plantas de compactación 	2	Procesamiento: 582 t/día
Plantas de composta 	7	Tratamiento: 1,132 t/día
Sitios de disposición final 	6	Disposición: 7,990 t/día
Biodigestor 	1	Rendimiento: 50 m ³ biogás/ tonelada. Capacidad: 1,100 t/año Capacidad reactor: 100m ³ Energía: 170 kWh/día

Fuente: (SEDEMA, 2020)

En la **Figura 21**, se muestra la ubicación de la infraestructura disponible a lo largo de la Ciudad de México.

Figura 21. Ubicación de la Infraestructura para el manejo de los residuos.



Fuente: (SEDEMA, 2020)

5.6 Mercado eléctrico

La Ciudad de México es una de las regiones consumidoras de energía más importantes del país, la energía eléctrica es la más demanda dentro de la matriz energética. En México existen tarifas diferenciadas por sector, las tarifas eléctricas más bajas son las de tipo residencial, seguidas por las tarifas para servicios (alumbrado público, bombeo de agua potable), y las más altas son las de tipo

comercial. En promedio, estas tarifas reciben ajustes anuales por inflación que van desde el 3 al 5% con respecto a su año anterior.

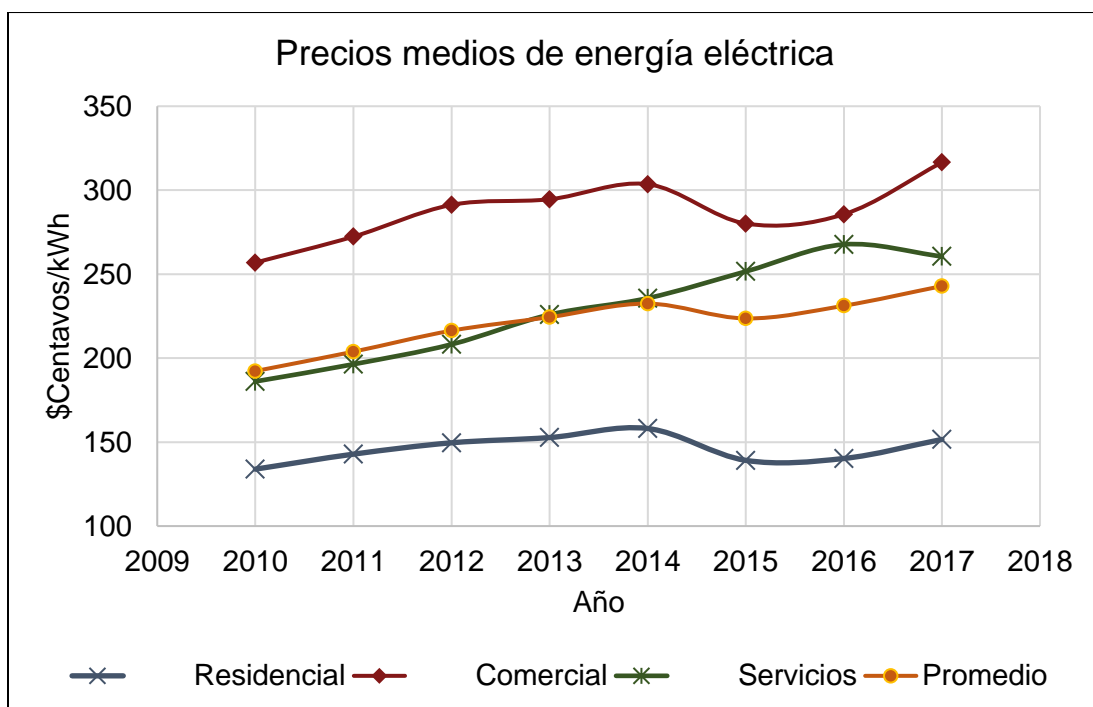
En la **Tabla 28** se muestran los datos históricos de las tarifas por sector, desde el año 2013 y hasta el 2020, el cual es el último año reportado, los datos del 2018-2020, se calculan tomando en cuenta un promedio de inflación anual del 3%.

Tabla 28. Histórico de tarifas eléctricas por sector.⁶

Tarifa	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Residencial	152.71	158.11	139.15	140.25	151.61	156.91	161.62	166.47
Servicios	225.90	235.69	251.60	267.70	260.55	269.67	277.76	286.09
Comercial	294.60	303.58	280.16	285.68	316.60	327.68	337.51	347.64
Promedio	224.41	232.46	223.63	231.21	242.92	251.42	258.96	266.73

En la

Figura 22 se muestran las tendencias de los precios por sector desde el año 2010 hasta el 2017, también se incluye el promedio de los 3 sectores, el cual se asemeja a la tarifa de servicios.



⁶ Datos obtenidos del Sistema de Información Energética, consultado el 20 de octubre de 2020: <http://sie.energia.gob.mx/>

Figura 22. Precios históricos de energía eléctrica por sector⁷.

6. ESTUDIO TÉCNICO DEL POTENCIAL DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

6.1 Localización

La localización de la planta de Digestión Anaerobia se ha propuesto que se lleve a cabo en las instalaciones de la planta de composta “Axolotl”, ya que existen referencias importantes que han evaluado los beneficios del tratamiento de los residuos por vía aerobia para compostaje y vía anaerobia para la generación de biogás, siendo esta última la que se presenta como una buena apuesta tanto económica como técnica (Kraemer & Gamble, 2014).

6.1.1. Descripción del sitio propuesto

El sitio propuesto se encuentra en los límites de la delegación Xochimilco, está rodeado principalmente de áreas verdes, invernaderos y campos de cultivo conocidos en la zona como *chinampas*. Se encuentra a 2,262 msnm, la velocidad del viento es de 4 a 10 km/h a lo largo del año, con precipitaciones de hasta 142 mm y cuenta con una temperatura promedio de 22°C, por lo que el biodigestor no tendría mayor problema para su operación.

El sitio propuesto cuenta con los servicios básicos de agua, electricidad y vías de acceso importantes para el tránsito de vehículos de hasta 25 toneladas, por lo que el traslado de los residuos a las instalaciones no será un problema. En la **Tabla 29** se muestran las características del sitio y en la **Figura 23** se muestra su localización con ayuda de la herramienta Google Maps.

Tabla 29. Características principales del sitio propuesto.

Ubicación	Periférico Oriente S/N, casi esquina con Canal de Chalco, Xochimilco, CDMX. (19.299424, -99.085849)
Superficie	23,940 m ²
Uso de Suelo Actual	Planta de Composta

Fuente: (Google Maps, 2020) & (Sánchez et al., 2016)

⁷ ibidem



Figura 23. Localización del sitio propuesto.

Fuente: (Google Maps, 2020)

6.2 Descripción general del proceso

El proyecto considera el tratamiento de 50,000 toneladas al año de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos provenientes de la CEDA.

Pretratamiento: Este proceso consiste en retirar los materiales que no son orgánicos, como plásticos metales, vidrio entre otros materiales inertes que no se pueden procesar. Se lleva a cabo mediante el paso de los residuos a través de una tolva en la que se retiran los materiales inertes y en la que se incorpora un separador magnético para los metales, después del retiro de estos materiales, se adiciona agua

para lograr el contenido de humedad deseado de al menos 90%, en esta etapa, los materiales que no se separaron en la tolva y con el separador magnético, como arenas, piedras o vidrio se retiran del fondo de la mezcla, mientras que los materiales menos densos como papel, fibras textiles, bolsas de plástico se retiran de la superficie.

Digestión: El sustrato obtenido del pretratamiento entra al biodigestor, este sustrato está compuesto principalmente por materia orgánica y agua para alcanzar la humedad adecuada, estos digestores pueden ser verticales u horizontales dependiendo del tecnólogo, aunque otro criterio puede ser el espacio disponible ya que los digestores verticales requieren menos espacio. Se considera una alimentación continua por lo que la producción de biogás será constante. Las condiciones de operación son las siguientes: Temperatura: 35°C; una etapa, pH: 6.5, TRH: 15 días. Se espera que bajo estas condiciones se tenga una producción de biogás de 634 Nm³/ t SV con un contenido de metano del 60%.

Tratamiento del biogás: Posterior a la generación de biogás con un contenido en metano de al menos 60%, se necesita el mejoramiento para su posterior uso en un sistema combinado de generación eléctrica y calor.

Sistema de cogeneración: El metano obtenido, se ingresa en un generador de electricidad de al menos 3 MW para la producción de energía eléctrica, la energía en forma de calor puede ser utilizada para mantener la temperatura del digestor en valores óptimos.

Tratamiento del digestato: Esta parte del proceso tiene por objetivo el secado del digestato obtenido, el cual sale con una humedad de alrededor de 60%, este proceso se lleva a cabo en túneles o trincheras horizontales para su estabilización de forma aerobia.

6.3 Evaluación de la materia Prima

De acuerdo con los datos de generación, fuentes de generación y composición de los residuos, se identifican a los residuos provenientes de la CEDA como la materia prima más factible, la cual comprende el 5% de los residuos generados en la ciudad

(585 t/día), dado que los residuos de la CEDA son mayoritariamente orgánicos. La **Tabla 30**, muestra la composición de los residuos de la Central de Abastos.

Tabla 30. Composición de los RSU de la CEDA

Categoría	% peso
Vegetales	36.24
Frutas	20.65
Otros orgánicos	23.07
Cárnicos	18.20
Madera, plástico, papel	1.49
Otros	0.36

Fuente: (Tsydenova, et al., 2019)

Las características fisicoquímicas de los residuos de la CEDA se muestran en la **Tabla 31**.

Tabla 31. Características fisicoquímicas de los residuos de la CEDA

PARÁMETRO	VALOR
PH	4.03
CONTENIDO DE AGUA (%)	80.9
SÓLIDOS TOTALES (%)	19.1
SÓLIDOS VOLÁTILES (%)	17.30
CENIZA (%)	0.25
NITRÓGENO (% DE ST)	1.39
C/N	39.01
FÓSFORO (PPM)	120.94

Fuente: (Tsydenova, et al., 2019)

6.4 Resultados de la Evaluación Técnica

Durante esta etapa se desarrolló un modelo para estimar teóricamente las entradas y salidas de la digestión anaerobia. Para una cantidad de residuos establecida, se

calculan la cantidad de biogás y de digestato que se produce, por lo tanto, también se estiman las dimensiones de la capacidad de la planta. Este modelo se basa en procesos y tecnologías encontradas en referencias bibliográficas.

6.4.1 Entradas al Modelo

La primera entrada del modelo son la cantidad de residuos los cuales tienen las características mostradas en la **Tabla 30** y **Tabla 31**, la humedad se establece en 80.9%, el contenido de sólidos totales (%) es de 19.1 y el de sólidos volátiles corresponde al 90% de los ST. En la **Tabla 32** se resumen los datos empleados para realizar los cálculos y estimaciones.

Tabla 32. Datos de entrada para el desarrollo del modelo.

Datos de entrada	
FORSU (CEDA)	50000 (t/año)
Materia orgánica aprovechable	85%
Humedad	80.90%
Sólidos totales (%ST)	19.1%
Sólidos Volátiles (%SV)	17.30%
Densidad FORSU	0.83 (t/m ³)
Potencial de Biogás	
Rendimiento de biogás	109.68 Nm ³ / t FORSU
Metano/biogás	57%
Densidad biogás	0.0012 t/Nm ³
Eficiencia de la Cogeneración	85%
Eficiencia eléctrica	45%
Eficiencia de recuperación de calor	70%

6.4.2 Pretratamiento

Partiendo de una base de 50,000 toneladas anuales de residuos orgánicos provenientes de la Central de Abasto, se considera que el 15% no son susceptibles de digestión anaerobia debido a las características de algunas fracciones de los residuos, las cuales pueden contener metales, plásticos, papel, o son residuos orgánicos lignocelulósicos de más compleja degradación. El contenido de humedad se ajusta para alcanzar el 90% requerido para la digestión húmeda, los resultados de esta etapa se muestran en la **Figura 24**.

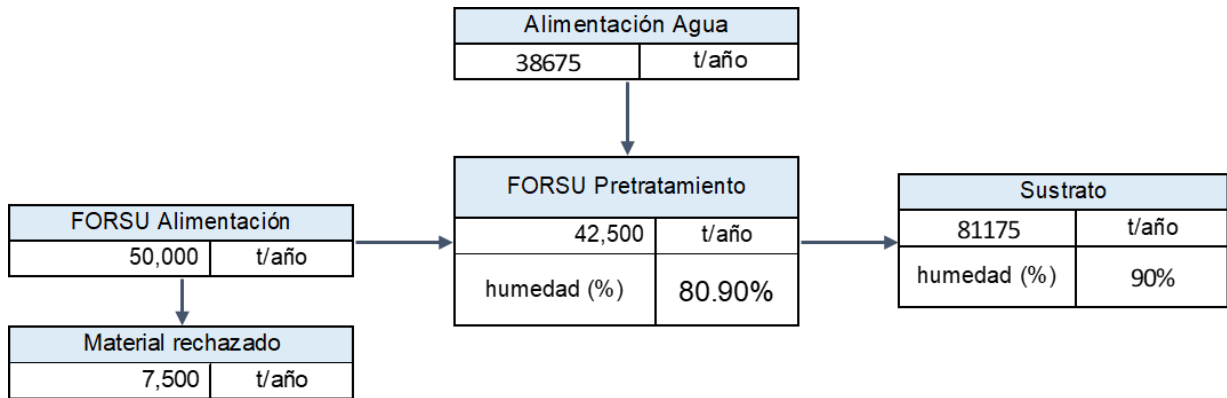


Figura 24. Pretratamiento húmedo

6.4.3 Digestión Anaerobia

El sustrato obtenido del pretratamiento entra al digestor, se compone principalmente de materia orgánica (SV) y agua, y está acondicionado con la humedad deseada. El balance y los resultados de la etapa de biodigestión se muestran en la **Figura 25**.

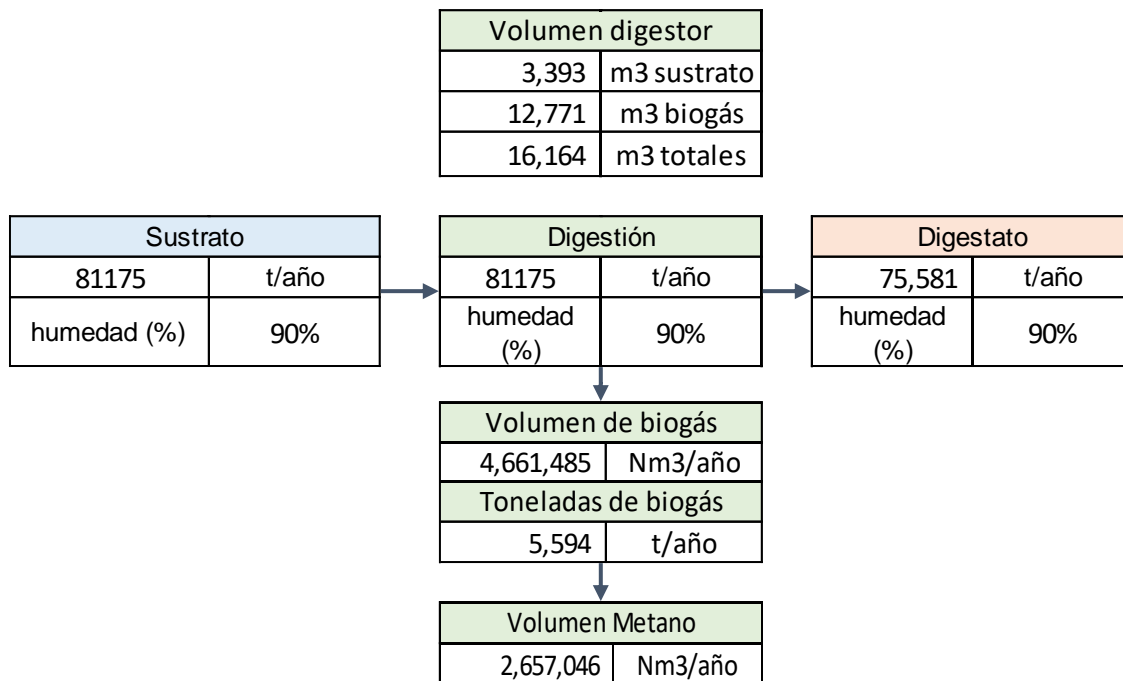


Figura 25. Modelo de Digestión Anaerobia.

6.4.4 Estimación de Recuperación de Energía del Biogás

El modelo considera el cálculo del valor energético asociado al biogás, esto se calcula a partir de datos de referencia como los reportados en Durán-Moreno et al. (2018), estudio desarrollado en colaboración con la German Corporation for International Cooperation (GIZ), se obtuvo un valor de potencial de biogás de $634 \text{ Nm}^3/\text{t SV}$, lo cual tomando en cuenta el porcentaje de sólidos volátiles reportado en Tsydenova et al. (2019) el cual es de 17.30%, se tiene un potencial teórico de $109.68 \text{ Nm}^3/\text{t FORSU}$. Los resultados de esta etapa del modelo se muestran en la **Figura 26**.

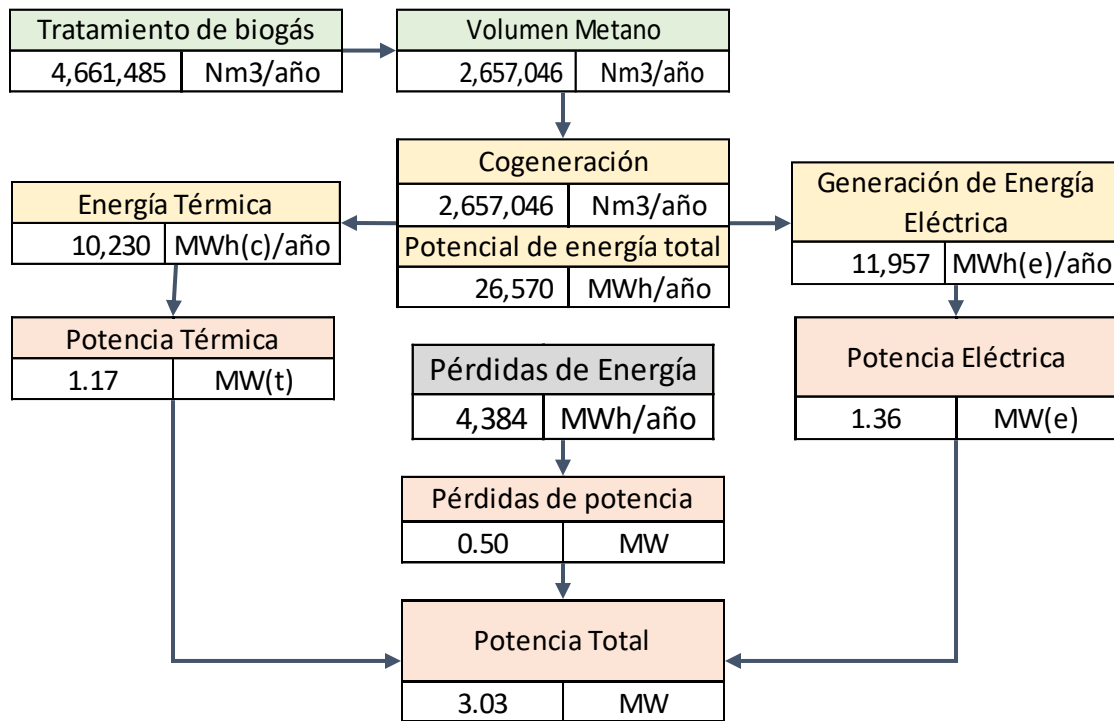


Figura 26. Estimación de la recuperación de energía asociada al biogás.

6.4.5 Digestato

Esta etapa se considera para la estabilización del digestato y su posterior uso como fertilizante, el digestato sale del proceso con un alto contenido de humedad (90%), por lo que es necesario retirar esta agua y estabilizarlo vía aerobia. Esta agua que se retira puede ser tratada para su reutilización en el proceso, el cual requiere una cantidad considerable de agua; en la **Figura 27** se muestra este proceso.

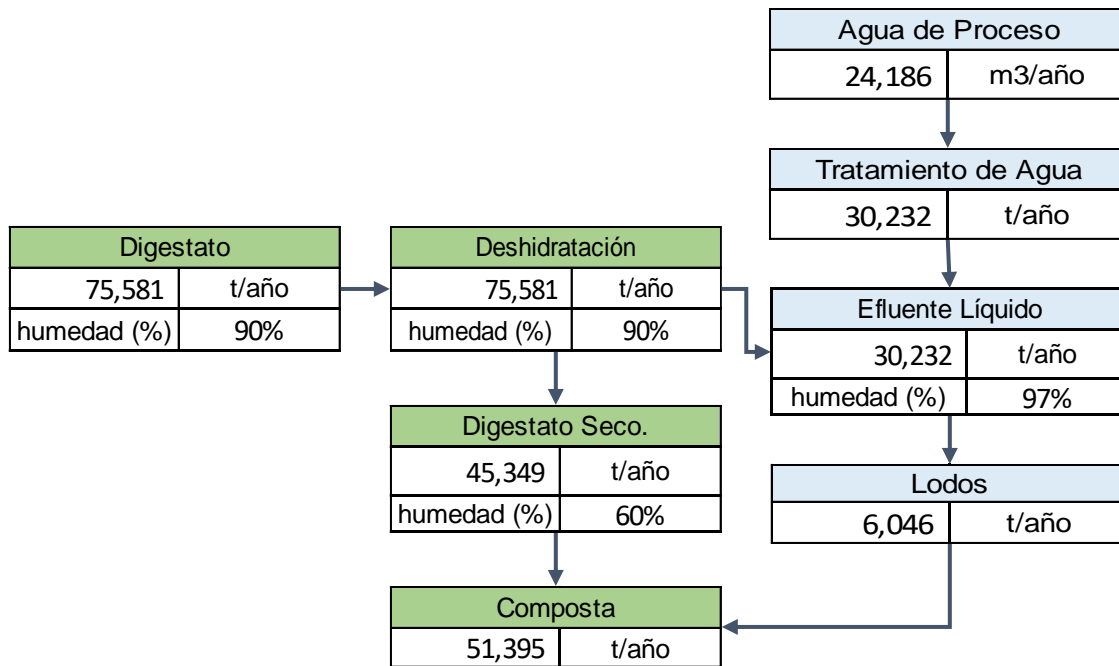


Figura 27. Tratamiento del digestato y producción de compost.

6.4.6 Resumen de los Resultados del Modelo

En este capítulo se muestra el modelo para la evaluación técnica de la tecnología, en el cual se parte de una base de tratamiento de 50,000 toneladas anuales de residuos provenientes de la CEDA. Para esta configuración propuesta, el volumen necesario del digestor es de 16,164 m³, los cuales pueden ser divididos en dos biodigestores como en algunos casos reportados en literatura. La estimación de la generación de biogás se sitúa en 4,661,485 Nm³/año, de los cuales el 57% corresponde a metano. El sistema combinado de generación de energía requiere un mínimo de 3 MW de potencia, lo que produce 11,957 MWh(el) de energía eléctrica al año, 10,230 MWh(t) de energía térmica puede ser recuperada cada año, y parte de esta energía se suministra al digestor para contribuir a mantener la temperatura en niveles adecuados, se complementa esta información con la **Tabla 33** y la **Figura 29**.

Tabla 33. Resumen del modelo.

Entradas del Modelo		Salidas del Modelo	
FORSU (CEDA)	50,000 t/año	Volumen del digestor	16,164 m ³
Materia Orgánica Aprovechable	85%	Producción energía eléctrica	239 kWh/t
Humedad	80.90%	Biogás	4,461,485 Nm ³ /año
Sólidos Totales (%ST)	19.10%	Biogás	5,594 t/año
Sólidos Volátiles (%SV)	17.30%	Fertilizante	51,395 t/año
Densidad FORSU	0.83 t/m ³	Producción de energía neta	26,570 MWh/año
Rendimiento biogás	109.68 Nm ³ /t FORSU	Producción de energía eléctrica	11,957 MWh(el)/año
Metano/biogás	57%	Producción de energía térmica	10,230 MWh(t)/año
Densidad Biogás	0.0012 t/Nm ³	Consumo de energía (planta)	16 kWh/t
Eficiencia Cogeneración	85%	Capacidad Total	3.03 MW
Eficiencia Eléctrica	45%		
Eficiencia Recuperación térmica	70%		

6.4.7 Comparación del Modelo

Con la finalidad de evaluar los resultados del modelo construido para desarrollar el estudio técnico y verificar que los resultados sean correctos bajo ciertos parámetros, se comparan con la información de diferentes tecnólogos (ver **Tabla 34**). Las tecnologías seleccionadas son las más comunes en digestión anaerobia húmeda.

Tabla 34. Comparación de los resultados del modelo.

Criterio	Unidad	BTA	Ros Roca	Strabag	Weltec	Modelo
Capacidad	t/año	1,000 - 150,000	10,000 - 150,000	6,000- 150,000	50,000 - 100,000	50,000
Biogás	(Nm ³ / t)	90	115	100	120	109.68
Metano	(Nm ³ / t)	56	63	63	72	62.5176
Energía (producción)	kWh/t	203	202	202	208	239
Energía (consumo)	kWh/t	20	12	12	10	16
Tiempo Residencia	días	15	20	20	17	15
Temperatura	°C	37	38	37	55	38

Criterio	Unidad	BTA	Ros Roca	Strabag	Weltec	Modelo
Sólidos Totales	%	10	12	10.5	10	19.1
Costos de Inversión	\$ USD/año/t	531	489	446	325	448
Costos de Operación	\$ USD/año/t	80	73	67	49	67

Fuentes: Cesaro, Belgiorno, & Naddeo (2013); Durán-Moreno et al. (2018) y Olivard (2017).

Como resultado de esta comparación, se puede concluir que el modelo presenta estimaciones cercanas a las condiciones de las plantas industriales, con excepción de la producción de energía, parámetro en el que el modelo es superior, esto es debido a que los datos de entrada del modelo son los reportados por experimentación llevadas bajo condiciones experimentales estrictas, lo cual puede no ocurrir en la escala industrial. También es importante mencionar que, realizando ajustes en los parámetros de entrada, es posible tener estimaciones más cercanas. En la **Figura 28**, se muestra una gráfica comparativa con los resultados más relevantes del modelo y los datos de las tecnologías de digestión anaerobia húmeda más importantes.

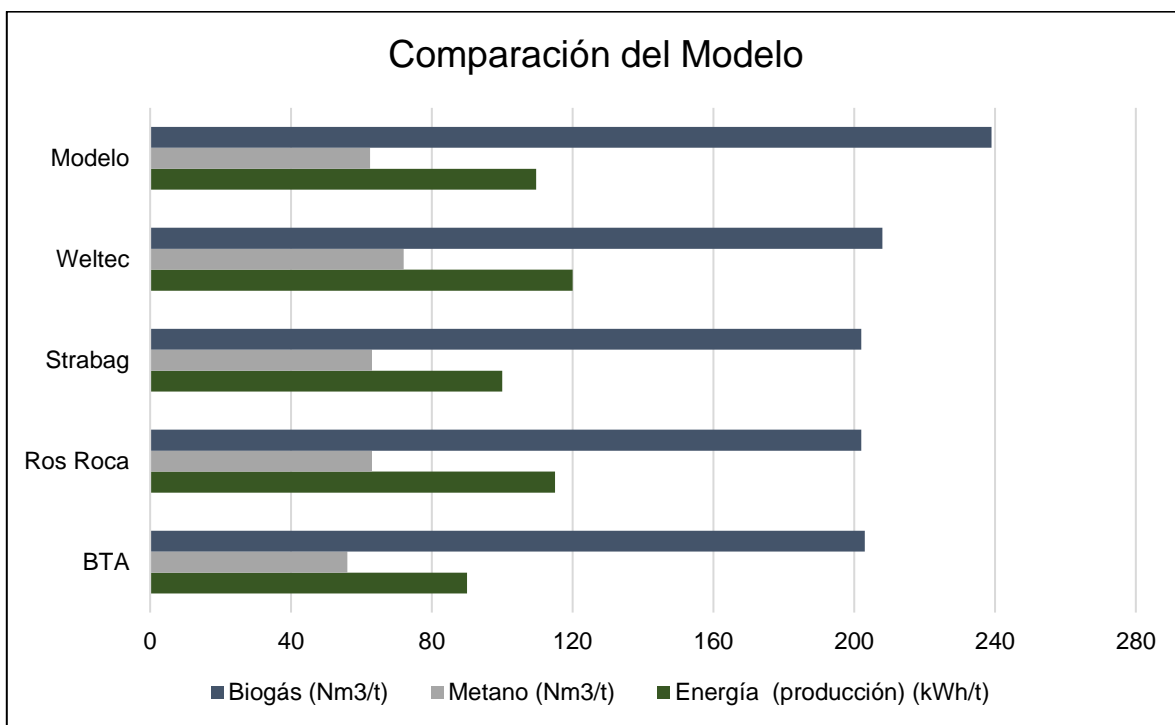


Figura 28. Comparación de los resultados del modelo.

Evaluación de prefactibilidad de una planta de digestión anaerobia para el procesamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos en la Ciudad de México.

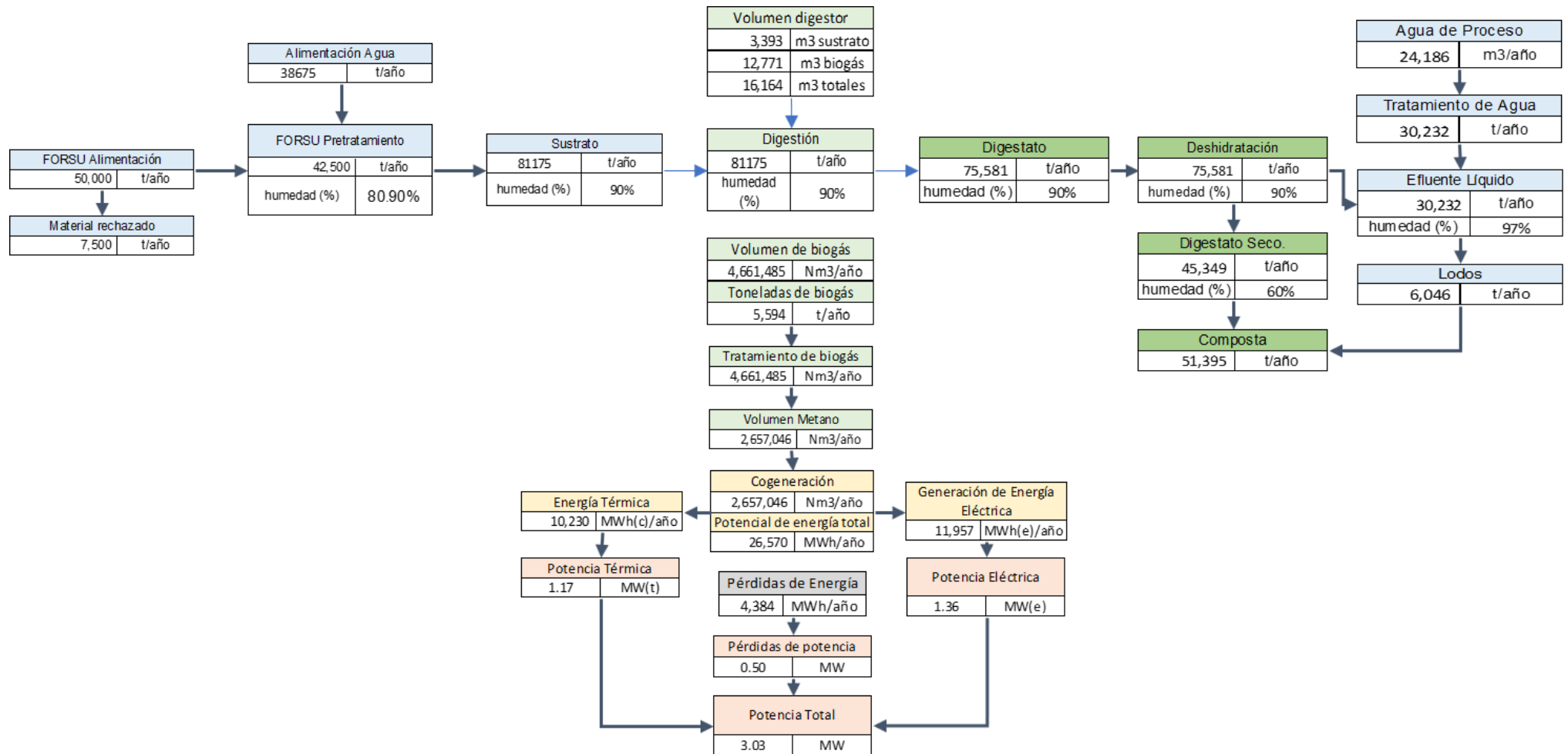


Figura 29. Esquema del proceso de Digestión Anaerobia.

6.4.8 Análisis Ambiental

Una vez realizada la descripción del proceso de digestión anaerobia, los rendimientos y resultados del modelo se emplean para realizar cálculos que permitan estimar el impacto ambiental del proyecto de digestión anaerobia, comparado contra la disposición final en rellenos sanitarios.

6.4.8.1 Reducción del volumen de residuos

El proyecto considera el procesamiento de 50,000 toneladas al año de residuos provenientes de la CEDA, sin embargo, no todos los residuos son susceptibles de aprovechamiento, por lo que sólo se considera el 85% de los residuos, es decir 42,500 toneladas al año, por lo tanto, el material rechazado (7,500 t/año) sería enviado a los rellenos sanitarios, siguiendo así las tendencias actuales de disminuir la cantidad de residuos enviados a rellenos sanitarios y usar estos sitios para confinar residuos sin potencial de aprovechamiento (Campuzano & González-Martínez, 2016).

6.4.8.2 Reducción de lixiviados.

Los lixiviados generados en los rellenos sanitarios dependen de diversos parámetros, como el volumen de residuos, el tipo de residuos, el clima del lugar, entre otros, por lo tanto, en este trabajo sólo se abordan aspectos cualitativos, los cuales se relacionan a los siguientes factores:

- Al reducir la cantidad de residuos orgánicos, se reduce la concentración de contaminantes que acarrearán los lixiviados y que pueden afectar los suelos, entre los que se encuentran altos valores de demanda química de oxígeno, pH ácido, amoníaco, nitrógeno y metales pesados (Raghab, Meguid, & Hegazi, 2013).
- Reducción de costos por el manejo y tratamiento de lixiviados
- Optimización del espacio disponible en el relleno sanitario.

6.4.8.3 Reducción de Gases de Efecto Invernadero

La reducción de las emisiones de GEI que tiene el proyecto se estiman en dos sentidos, por un lado, la mitigación de emisiones de metano que se estarían evitando por llevar a cabo la captura del biogás dentro del reactor de digestión anaerobia y por otro lado el desplazamiento de las emisiones generadas por la producción de energía eléctrica proveniente de fuentes convencionales, por lo que se comparó contra el carbón como combustible.

En la **Tabla 35** se muestra el valor de las emisiones en toneladas de dióxido de carbono equivalente que generarían los residuos en los rellenos sanitarios, considerando la cantidad de metano y su equivalente de CO₂ en el potencial de calentamiento global. También se muestra el cálculo de las emisiones que se estarían generando si la cantidad de energía eléctrica producida por metano, producto de la digestión anaerobia, se realizara con carbón.

Tabla 35. Mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero.

FUENTE DE EMISIÓN	t CO₂(eq) / año
Relleno Sanitario	26,180
Producción eléctrica (carbón)	9,805
Total	35,985

6.4.8.4 Recuperación de nutrientes

El digestato obtenido del proceso de digestión anaerobia contiene nutrientes como nitrógeno y potasio, los cuales están presentes en la materia orgánica ya que son esenciales para su desarrollo. En este sentido, se calculó la cantidad de nitrógeno y potasio que estaría presente en el digestato. En la **Tabla 36** se muestra la cantidad anual de nitrógeno y potasio presentes en el digestato.

Tabla 36. Cantidad de nitrógeno y potasio en el digestato.

Nutriente	Cantidad (t/año)
Nitrógeno	102
Potasio	5

Con la finalidad de tener una referencia y realizar una comparación, se estimó la cantidad a la que equivale el nitrógeno con respecto a los fertilizantes nitrogenados más comunes, urea y sulfato de amonio, los cuales tienen una composición de 46 y 21% de nitrógeno respectivamente (IPNI, 2021). La **Tabla 37** muestra la cantidad de fertilizante al que equivale el digestato de acuerdo con su contenido de nitrógeno, el cual equivale a utilizar 222 toneladas de urea al año, o utilizar 486 toneladas de sulfato de amonio al año. Los fertilizantes anteriormente mencionados no cuentan en su composición química con fósforo, sin embargo, el fertilizante proveniente del digestato contendría entre 1 y 2% de fósforo.

Tabla 37. Cantidad de Fertilizante equivalente.

Fertilizante	Fertilizante Equivalente	Cantidad de Fertilizante equivalente (t/año)	Composición
Digestato	Urea	222	46% de N y 2% de P
Digestato	Sulfato de Amonio	486	21% de N y 1% de P

La **Tabla 38** muestra el resumen de los diferentes aspectos considerados en el análisis ambiental y el impacto que tienen en el proyecto.

Tabla 38. Resumen de los resultados del análisis ambiental.

Aspecto	Impacto
Reducción del volumen de residuos	Reducción del 85% de residuos enviados.
Reducción de lixiviados	Reducción de los contaminantes presentes en los lixiviados.
Reducción de gases de efecto invernadero	Mitigación de 35,985 tCO ₂ (eq) / año
Recuperación de nutrientes	Reemplazo de 222 toneladas de urea (46% N, 2% P) ó 486 toneladas de sulfato de amonio (21% N, 1% P).

7. EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

En este capítulo se desarrolla un análisis económico, el cual pretende comparar mediante indicadores financieros, la situación con el proyecto de digestión anaerobia y sin proyecto, es decir con la situación actual.

7.1 Situación sin Proyecto

Como se mencionó anteriormente, la situación sin proyecto corresponde al manejo de 50,000 toneladas al año de residuos provenientes de la Central de Abasto, los cuales siguen la ruta actual de los residuos que va desde la recolección, envío a estaciones de transferencia y traslado a sitios de disposición final. En 2019 la SEDEMA reportó que los costos por manejo integral de residuos se situaron en \$605 por tonelada. Con lo anterior, el manejo de 50,000 toneladas anuales para el horizonte de evaluación del proyecto que es de 20 años se muestra en la **Tabla 39**.

Tabla 39. Proyección de Costos de manejo de residuos (Situación Actual).

Año	Costo de manejo por tonelada (MXN)	Toneladas	Costo anual (MXN) 50,000 toneladas	Costo Anual (USD/t)
2019	\$ 605	50,000	\$ 30,250,000	\$ 1,469,874
2020	\$ 629	50,000	\$ 31,460,000	\$ 1,528,669
2021	\$ 654	50,000	\$ 32,718,400	\$ 1,589,815
2022	\$ 681	50,000	\$ 34,027,136	\$ 1,653,408
2023	\$ 708	50,000	\$ 35,388,221	\$ 1,719,544
2024	\$ 736	50,000	\$ 36,803,750	\$ 1,788,326
2025	\$ 766	50,000	\$ 38,275,900	\$ 1,859,859
2026	\$ 796	50,000	\$ 39,806,936	\$ 1,934,253
2027	\$ 828	50,000	\$ 41,399,214	\$ 2,011,624
2028	\$ 861	50,000	\$ 43,055,182	\$ 2,092,089
2029	\$ 896	50,000	\$ 44,777,390	\$ 2,175,772
2030	\$ 931	50,000	\$ 46,568,485	\$ 2,262,803

Año	Costo de manejo por tonelada (MXN)	Toneladas	Costo anual (MXN) 50,000 toneladas	Costo Anual (USD/t)
2031	\$ 969	50,000	\$ 48,431,225	\$ 2,353,315
2032	\$ 1,007	50,000	\$ 50,368,474	\$ 2,447,448
2033	\$ 1,048	50,000	\$ 52,383,213	\$ 2,545,346
2034	\$ 1,090	50,000	\$ 54,478,541	\$ 2,647,159
2035	\$ 1,133	50,000	\$ 56,657,683	\$ 2,753,046
2036	\$ 1,178	50,000	\$ 58,923,990	\$ 2,863,168
2037	\$ 1,226	50,000	\$ 61,280,950	\$ 2,977,694
2038	\$ 1,275	50,000	\$ 63,732,188	\$ 3,096,802
2039	\$ 1,326	50,000	\$ 66,281,475	\$ 3,220,674
2040	\$ 1,379	50,000	\$ 68,932,734	\$ 3,349,501

Los indicadores financieros de este caso se calcularon en dólares, y para ambos la situación sin proyecto es sólo un gasto del cual no se puede obtener ningún beneficio económico, ambiental o social. Las consideraciones para realizar los cálculos de dichos indicadores se muestran en la **Tabla 41**.

Tabla 40. Indicadores Financieros de la situación sin proyecto.

Indicador financiero	Valor (cifra en USD)
VPN	-\$12,748,412
CAE	-\$1,924,831

Tabla 41. Valores de referencia para el cálculo económico de la situación sin proyecto.

Factor	Valor
Tipo de Cambio (26/11/20) (MXN/USD)	\$20.58
Tasa de Descuento (MARR)	14%
Horizonte de evaluación	20 años
Tasa de inflación anual	4%

7.2 Situación Con Proyecto

De acuerdo con Rapport et al. (2012), existen dificultades que limitan la discusión acerca de los parámetros económicos de la Digestión Anaerobia de la FORSU, entre

las que se encuentran: falta de datos de costos reales, fluctuaciones dinámicas del mercado de biogás a través del tiempo y zonas geográficas e inconsistencias en la definición de los límites de los Proyectos. Además, menciona que los costos de capital, costos de operación e ingresos de los proyectos comerciales de Digestión Anaerobia no son del todo públicos, sólo existen ciertas referencias de manera general. Muchos proyectos de DA, se realizan por etapas, y sufren cambios en el diseño u operación, por lo tanto, los costos pueden no representar una instalación que esté por construirse, sólo son una guía. A pesar de estas dificultades, existen diversos estudios y referencias importantes para la estimación de estos costos y el cálculo de los indicadores financieros para su evaluación, como, por ejemplo: Moriarty (2013); Kaltschmitt & Ríos (2016); Mutz et al., (2017); Tsydenova et al. (2019); Rapport et al. (2012).

Consideraciones

El modelo financiero para esta evaluación toma en cuenta los aspectos y datos generados de los estudios de mercado, del estudio técnico, entre otras consideraciones como se muestra en la **Tabla 42** .

Tabla 42. Entradas para los cálculos del modelo financiero.

Factor	Valor
Tasa de inflación anual	4.00%
Tipo de cambio dólar 26/11/20 (MXN/USD)	\$20.58
Costos de Capital (USD/t/año)	\$14
Costos de Operación y Mantenimiento (USD/t/año)	\$12
Tasa de descuento (MARR)	14%
Precio de Electricidad 2020 (USD/kWh)	\$0.1302
Horizonte de evaluación (años)	20
Toneladas anuales de tratamiento	50,000
Producción Eléctrica (kWh/año)	11,956,709
Producción Energía térmica (kWh/año)	10,229,629
Fertilizante (t/año)	33,256
Precio Fertilizante enriquecido (USD/kg N)	\$1.38

La estructura del costo permite identificar los aspectos principales del proyecto, como se muestra en la **Tabla 44**, los ingresos por venta de electricidad, energía térmica (vapor) y por fertilizante enriquecido. Posteriormente se muestran los costos de capital (CAPEX) por toneladas anuales procesadas y los costos de operación y mantenimiento (OPEX), estos costos se mantienen constantes en el horizonte de tiempo ya que dependen de la cantidad de residuos procesada, la cual también es constante. Al final se presentan el flujo de efectivo anual y el flujo de efectivo acumulado, en el que se observan pérdidas en los primeros 7 años del proyecto. Es a partir del año 8 en el que se comienzan a observar flujos de efectivo positivos.

En la siguiente figura se muestran los flujos de efectivo acumulados de la situación con proyecto, en el horizonte de evaluación de 20 años.

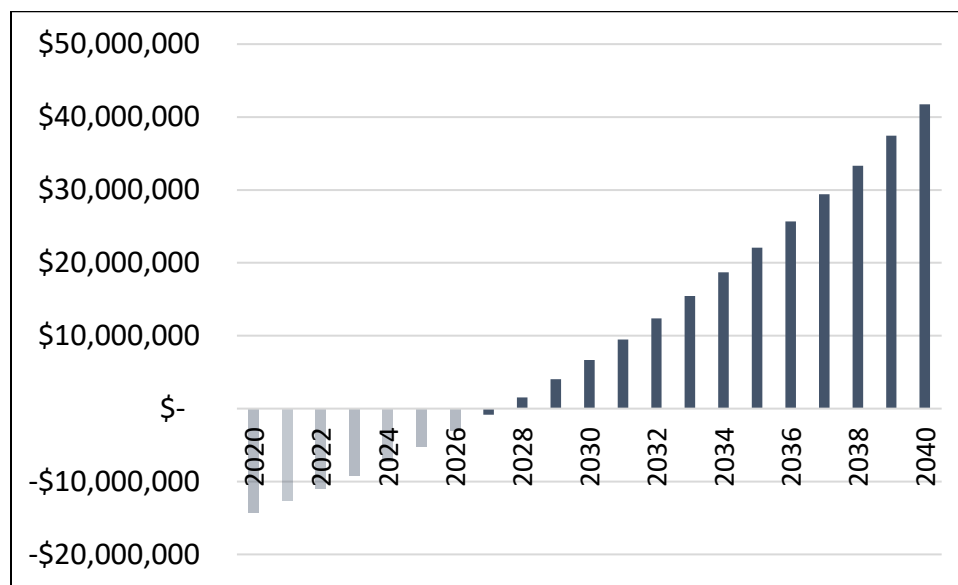


Figura 30. Flujos de efectivo acumulado del proyecto.

Finalmente, los resultados de la situación con proyecto indican un VPN= \$712,360, el cual es positivo, por lo que el proyecto debería promoverse, una tasa interna de retorno, TIR=15%, la cual es mayor que la tasa mínima aceptable de retorno, lo que indica que la inversión es factible. El tiempo de recuperación de la inversión para este proyecto es de 7.54 años y el Costo Anual Equivalente CAE= \$107,556.47, todas las cifras están en dólares.

En la **Tabla 43** se muestra el resumen de los indicadores financieros para la situación con proyecto.

Tabla 43. Indicadores Financieros de la situación con proyecto.

Indicador Financiero	Valor
VPN	\$712,360.55 (USD)
Tiempo recuperación	7.54 años
TIR	15%
CAE	\$107,556.47 (USD)

En la **Tabla 44** se muestran los resultados del flujo de efectivo para el proyecto.

Tabla 44. Flujo de efectivo situación con proyecto (Cifras en USD).

Año	Ingresos electricidad	Ingresos Vapor	Ingresos fertilizante	Costos O&M	Costo de Capital	Inversiones	Flujo de efectivo	Flujo de efectivo acumulado
2020	\$ -					-\$ 14,280,000	-\$ 14,280,000	-\$ 14,280,000
2021	\$ 1,619,454	\$ 831,319	\$ 462,255	-\$ 595,000	-\$ 714,000		\$ 1,604,028	-\$ 12,675,972
2022	\$ 1,684,232	\$ 864,572	\$ 462,255	-\$ 595,000	-\$ 714,000		\$ 1,702,059	-\$ 10,973,914
2023	\$ 1,751,601	\$ 899,155	\$ 462,255	-\$ 595,000	-\$ 714,000		\$ 1,804,011	-\$ 9,169,903
2024	\$ 1,821,665	\$ 935,121	\$ 462,255	-\$ 595,000	-\$ 714,000		\$ 1,910,041	-\$ 7,259,862
2025	\$ 1,894,532	\$ 972,526	\$ 462,255	-\$ 595,000	-\$ 714,000		\$ 2,020,312	-\$ 5,239,549
2026	\$ 1,970,313	\$ 1,011,427	\$ 462,255	-\$ 595,000	-\$ 714,000		\$ 2,134,995	-\$ 3,104,555
2027	\$ 2,049,125	\$ 1,051,884	\$ 462,255	-\$ 595,000	-\$ 714,000		\$ 2,254,264	-\$ 850,290
2028	\$ 2,131,090	\$ 1,093,960	\$ 462,255	-\$ 595,000	-\$ 714,000		\$ 2,378,305	\$ 1,528,015
2029	\$ 2,216,334	\$ 1,137,718	\$ 462,255	-\$ 595,000	-\$ 714,000		\$ 2,507,307	\$ 4,035,321
2030	\$ 2,304,987	\$ 1,183,227	\$ 462,255	-\$ 595,000	-\$ 714,000		\$ 2,641,469	\$ 6,676,790
2031	\$ 2,397,187	\$ 1,230,556	\$ 462,255	-\$ 595,000	-\$ 714,000		\$ 2,780,997	\$ 9,457,788
2032	\$ 2,493,074	\$ 1,279,778	\$ 462,255	-\$ 595,000	-\$ 714,000		\$ 2,926,107	\$ 12,383,895
2033	\$ 2,592,797	\$ 1,330,969	\$ 462,255	-\$ 595,000	-\$ 714,000		\$ 3,077,021	\$ 15,460,916
2034	\$ 2,696,509	\$ 1,384,208	\$ 462,255	-\$ 595,000	-\$ 714,000		\$ 3,233,972	\$ 18,694,888
2035	\$ 2,804,370	\$ 1,439,576	\$ 462,255	-\$ 595,000	-\$ 714,000		\$ 3,397,201	\$ 22,092,089
2036	\$ 2,916,544	\$ 1,497,159	\$ 462,255	-\$ 595,000	-\$ 714,000		\$ 3,566,958	\$ 25,659,047
2037	\$ 3,033,206	\$ 1,557,046	\$ 462,255	-\$ 595,000	-\$ 714,000		\$ 3,743,507	\$ 29,402,553
2038	\$ 3,154,534	\$ 1,619,328	\$ 462,255	-\$ 595,000	-\$ 714,000		\$ 3,927,117	\$ 33,329,670
2039	\$ 3,280,716	\$ 1,684,101	\$ 462,255	-\$ 595,000	-\$ 714,000		\$ 4,118,071	\$ 37,447,741
2040	\$ 3,411,944	\$ 1,751,465	\$ 462,255	-\$ 595,000	-\$ 714,000		\$ 4,316,664	\$ 41,764,405

7.3 Comparación de la situación con proyecto y sin proyecto

Los resultados de los cálculos de indicadores financieros para cada caso han sido calculados. La situación actual (sin proyecto), no ofrece algún beneficio alguno en cuanto a factores, ambientales, sociales o económicos, ya que la infraestructura actual está enfocada en la recolección de los residuos para su traslado a sitios de disposición final. Lo anterior muestra un panorama preocupante frente a la situación de los residuos, ya que se espera que la generación incremente y por lo tanto los gastos. De estos gastos en el año 2019, para el manejo de 50,000 toneladas se destinaron \$1,469,874 dólares, lo cual es una cifra considerable.

El valor presente neto para la situación sin proyecto es negativo, con un valor de \$12,748,412.73 dólares en un horizonte de tiempo de 20 años; el valor presente neto para la situación con proyecto es de \$712,360.55 dólares, el cual es un número positivo, y de acuerdo con los criterios de evaluación del VPN, este caso es el que debería llevarse a cabo.

El costo anual equivalente para el caso sin proyecto de \$1,924,831.87 dólares, mientras que el de la situación con el proyecto de digestión anaerobia es de \$107,556.47 dólares, el cual es un número menor que el del caso sin proyecto, por lo tanto, el proyecto de digestión anaerobia tendría desembolsos menores que la situación actual, por lo tanto, es viable.

En la **Tabla 45** se muestran los resultados de ambos escenarios.

Tabla 45. Comparación de escenarios (Cifras en USD)

Indicador Financiero	Proyecto Digestión Anaerobia	Situación Actual
VPN	\$712,360.55	-\$12,748,412.73
CAE	\$107,556.47	\$1,924,831.87
Tiempo recuperación	7.54 años	
TIR	15%	

8. CONCLUSIONES

El trabajo desarrollado en esta tesis consistió en la evaluación a nivel de prefactibilidad, tomando en cuenta los aspectos clave técnicos, económicos y ambientales para la implementación de un proyecto de digestión anaerobia en la Ciudad de México para el manejo de los residuos sólidos urbanos y la generación de energía.

El caso de negocio recopila los aspectos más importantes los cuales son punto de partida para el estudio de prefactibilidad, las condiciones para la implementación de una planta de digestión anaerobia como son: tipo de residuo, fuente de generación, ubicación de la planta, tipo de tecnología, datos para estimar el rendimiento de biogás, así como para estimar los costos. Además, en este apartado se identifican a los principales grupos de personas interesadas, su influencia y el impacto que tendrían en el proyecto.

El estudio de mercado demostró que existe materia prima suficiente y con características ideales para la digestión anaerobia: los residuos de la Central de Abasto, los cuales son predominantemente orgánicos que pueden ser aprovechados. Además, se observan las tendencias de aumento en la generación de residuos en un 0.58% anual para los próximos años, por lo que se requiere diversificar e innovar la infraestructura existente para el manejo integral de los residuos y su aprovechamiento.

El estudio técnico demostró la factibilidad de esta tecnología, tomando como base una capacidad de procesamiento anual de 50,000 toneladas, las cuales se tratarán vía digestión anaerobia húmeda, el volumen de tratamiento para este caso es de 16,780 m³, lo cual es consistente con lo reportado en bibliografía. El potencial de generación de biogás es de 109.68 Nm³/ t FORSU, con un contenido de metano del 57%, se obtiene un rendimiento en la producción de metano de 62.51 Nm³/ t FORSU, este rendimiento en conjunto con la cantidad anual procesada da un volumen total de metano de 2,657,046 Nm³/ año, lo que genera una cantidad de energía eléctrica de

11,957 MWh(el)/ año y 10,230 MWh(t)/ año de energía térmica. Con lo anterior se requiere de un sistema de cogeneración de 3.03 MW de potencia.

Con respecto al análisis ambiental se identificaron los principales beneficios del proyecto y su impacto como son: La reducción de volumen de disposición final de hasta 85% de la cantidad propuesta, la reducción de lixiviados asociados a la disposición, la mitigación de GEI generadas por de emisiones en rellenos sanitarios y el desplazamiento de las emisiones por la generación de electricidad proveniente del biogás capturado, esto tiene un impacto positivo en la mitigación de 35,985 tCO₂(eq)/año. Adicionalmente, el digestato recuperado contiene nutrientes como el nitrógeno y el fósforo por lo que se estima que pueden reemplazar hasta 486 t/año de fertilizantes como el Sulfato de Amonio.

El estudio económico consistió en la comparación de la situación actual (sin proyecto) y la situación con proyecto de digestión anaerobia, del cual se concluye que existe un panorama atractivo para el tratamiento de residuos y la obtención de energía limpia, sin embargo, el estudio considera aspectos generales debido al nivel de estudio (prefactibilidad, estimado de costo clase V) y se requiere de llevar a cabo un análisis más detallado con información más precisa. El costo anual equivalente para la situación actual es de \$1,924,831 dólares, mientras que el de la situación con el proyecto de digestión anaerobia es de \$107,556 dólares, el cual es un desembolso mucho menor con respecto a la situación actual.

Finalmente, el proyecto de implementación de digestión anaerobia en la Ciudad de México es una opción viable técnica, ambiental y económicamente.

9. RECOMENDACIONES

Limitantes

Este trabajo estuvo enfocado en el nivel de prefactibilidad, basado en aproximaciones y estimaciones realizadas de proyectos similares y de literatura científica especializada, considerando aspectos técnicos, ambientales, y económicos. Para la implementación de un proyecto de este tipo se deberá continuar con las etapas de factibilidad (formulación y análisis) y desarrollo de ingeniería, por lo que es necesario obtener información específica para el proyecto.

Los datos con los que se trabaja en el proyecto son recopilaciones de datos reportados de proyectos con características similares, por lo que se recomienda realizar estudios como caracterización de los residuos de la Central de Abasto y pruebas de potencial de generación de biogás para conocer el potencial de generación real del biogás. Los cálculos correspondientes a los aspectos económicos se basan en precios actuales de electricidad de acuerdo con las tarifas eléctricas, mientras que los datos de costo de capital y mantenimiento se obtuvieron de la literatura, ya que esta información de parte de los tecnólogos es escasa.

Normatividad

Aunque los aspectos normativos no fueron objeto de estudio de esta tesis, se recomienda una revisión para ampliar la perspectiva de este tema de estudio. La situación actual de la gestión de los residuos está diseñada únicamente para cumplir con la normatividad y legislación aplicable, como lo es el caso de los rellenos sanitarios, los cuales tratan de cumplir únicamente con lo establecido en las normas sin un enfoque de sustentabilidad por lo tanto, es necesario realizar actualizaciones a estos instrumentos normativos de manera que fomenten una visión más sostenible en el uso y manejo de los recursos y en el caso específico de los residuos es necesario aplicar medidas enfocadas a la disminución en la generación de residuos, en la separación diferenciada de estos y en la integración de tecnologías que permitan la mitigación de impactos ambientales.

Ampliar perspectiva de grupos interesados.

Existen barreras de carácter no-técnico que son cruciales para el desarrollo de proyectos como la digestión anaerobia, por lo que la identificación de los actores involucrados es un primer acercamiento para el enfoque estratégico del proyecto, sin embargo, se requiere un análisis más profundo, desde el punto de vista multidisciplinario que permita identificar los riesgos asociados y la forma de atacarlos.

Aspectos Financieros.

Es importante mencionar que los aspectos financieros son de suma importancia, por lo que se recomienda realizar un análisis de las opciones y esquemas de financiamiento bajo los cuales se puede desarrollar un proyecto de este tipo.

Comparación de capacidades.

El objetivo de este proyecto es analizar la prefactibilidad del tratamiento de 50,000 toneladas anuales de residuos orgánicos, como se menciona en el Mapa de Ruta tecnológicos del biogás, en el cual se plantea la implementación de proyectos de generación de biogás a escala industrial que sirvan como modelo para fomentar el desarrollo del mercado del biogás en México. Sin embargo, también resulta interesante investigar el impacto en otras escalas, o bien explorar una combinación o intervalo de capacidades.

10. REFERENCIAS

1. Abbasi, T., & Tauseef, S. (2012). *Biogas Energy*. India: Springer.
2. Abdullahi, Y., Suleiman, S., & Akunna, J. (2011). Optimisation study on the production of anaerobic digestate compost for application on arable soils. *Bayero Journal of Pure and Applied Sciences*, 1-9.
3. Ahmad-Mir, M., Hussain, A., & Verma, C. (2016). Design considerations and operational performance of anaerobic digester: A review. *Civil & Environmental Engineering*.
4. Akunna, J. (2019). *Anaerobic Waste-Wastewater Treatment and Biogas Plants*. Taylor & Francis Group.
5. Alemán-Nava, G., Casiano-Flores, V., Cárdenas-Chávez, D., Díaz-Chavez, R., Scarlat, N., Mahlknecht, J., . . . Parra, R. (2013). Renewable energy research progress in Mexico: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140-153.
6. Al-Seadi, e. a. (2012). *Biogas Handbook*. Denmark: University of Southern Denmark.
7. Anaya-Durand, A., Barragán, R., & Vergara, A. (2015). *Manual de Temas Selectos de Ingeniería de Proyectos*. México: UNAM.
8. Angelidaki, I., & Karakashev, D. (2011). Biomethanation and its potential. *Methods in Enzymology*, Elsevier.
9. Anzaldo, C. (2016). Tendencias y prospectiva demográfica, 1990-2030. En *Tendencias territoriales determinantes del futuro de la Ciudad de México* (págs. 85-115). México: Consejo Económico y Social de la Ciudad de México.
10. Arango-Osorio, S., Vasco-Echeverri, O., López-Jiménez, G. G.-S., & Isaac-Millán, I. (2019). Methodology for the design and economic assessment of anaerobic digestion plants to produce energy and biofertilizer from livestock waste. *Science of the Total Environment*, 1169-1180.
11. Arsova, L. (2010). *Anaerobic Digestion of food waste: Current status, problems and an alternative product*. Master Thesis, Department of Earth and Environmental Engineering. Columbia University.
12. Arvizu, J. L. (2010). La basura como recurso energético. Situación actual y prospectiva en México. *Revista de Ingeniería Civil*.
13. Bachmann, N. (2013). Design and engineering of biogas plants. Switzerland: Woodhead Publishing .
14. Banco Interamericano de Desarrollo. (2019). Potencial de Energías Renovables de la Ciudad de México. BID.

15. Baz, V. (2015). *Diagnóstico de la Situación Energética en el Distrito Federal: retos, pendientes y potencialidades*. CDMX: CIDAC.
16. BEKON. (2016). *Energy for the Future: Dry Fermentation*. Munich: BEKON GmbH.
17. Biotec. (2011). *Castelleone Plant Description Report*. Castelleone: Biotec.
18. Bochmann, G., & Montgomery, L. (2013). Storage and pre-treatment of substrates for biogas production. En A. Wellinger, J. Murphy, & D. Baxter, *The biogas handbook* (págs. 85-103). Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
19. Braber, K. (1995). Anaerobic digestion of municipal solid waste: A modern waste disposal option on the verge of breakthrough. *Biomass and Bioenergy* 9, 365-376.
20. Brans, J., & Mareschal, B. (2005). Promethee Methods. En M. Ehrogott, S. Greco, & J. Figueira, *MULTIPLE CRITERIA DECISION ANALYSIS: State of the art Surveys* (págs. 163-186). New York: Springer.
21. Broun, R., & Sattler, M. (2015). A comparison of greenhouse gas emissions and potential electricity recovery from conventional and bioreactor landfills. *Journal of Cleaner Production*, 2664-2673.
22. Browne, J., Allen, E., & Murphy, J. (2013). Improving hydrolysis of food waste in a leach bed reactor. *Waste Management*, 2470-2477.
23. BTA International GmbH. (10 de Abril de 2021). *BTA International GmbH*. Obtenido de BTA Process: <http://www.bta-international.de/>
24. Buekens, A. (2006). Energy Recovery from residual waste by means of anaerobic digestion technologies. *The future of residual waste management in Europe*. Bruselas.
25. Burgos, A. (2013). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgánicos generados en el mercado de Tiquipaya (Bolivia)*. UPC Barcelonatech.
26. Campuzano, R., & González-Martínez, S. (2015). Extraction of soluble substances from organic solid municipal waste to increase methane production. *Bioresour. Technol.*, 247-253.
27. Campuzano, R., & González-Martínez, S. (2016). Characteristics of the organic fraction of municipal solid waste and methane production: A review. *Waste Management*, 3-12.
28. Casanovas, G., Della-Vecchia, F., Reymundo, F., & Serafini, R. (2019). *Guía Teórico-Práctica sobre el biogás y los biodigestores*. Buenos Aires, Argentina: FAO.
29. CEMIE-Bio. (2017). *Mapa de ruta tecnológica: Biogás*. México: SENER.

30. Cesaro, A., Belgiorno, V., & Naddeo, V. (2013). Comparative technology assessment of anaerobic digestion of organic fraction of MSW. *The Sustainable World*, 355-366.
31. Chaoran-Li. (2015). *Wet and Dry Anaerobic Digestion of Biowaste and of Co-substrates, Tesis de Doctorado*. Alemania: Karlsruhe Institute of Technology.
32. De Baere, L. (2006). Will anaerobic digestion of solid waste survive in the future? *Water Science and Technology*, 187-194.
33. De Baere, L. (2012). The Dranco technology: a unique digestion technology for solid organic waste. *Organic Waste Systems (OWS)*.
34. De Baere, L., & Matheeuw, B. (2012). Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste in Europe. *Waste Management*, 517-526.
35. Delzeit, R., & Kellner, U. (2013). The impact of plant size and location on profitability of biogas plants in Germany under consideration of processing digestates. *Biomass and Bioenergy*. Elsevier.
36. Deublein, & Steinhauser. (2008). *Biogas from waste and renewable resources: An introduction*. Weinheim: Wiley-Vch Verlag GmbH & Co kGAA.
37. Durán-Moreno, A., & Peña-Vargas, M. (2019). Influence of two types of sludge on the biogas production of assorted waste streams and the significance of beef cattle waste and liquid cheese whey in the organic fraction of municipal solid waste. *Journal of Environmental Science and Health*, 1235-1242.
38. Durán-Moreno, A., Casas, D., Islas, I., de Regil, J., Vázquez, G., & Roa, M. (2014). *Bases de diseño del proceso de Digestión Anaerobia*. UNAM.
39. Durán-Moreno, A., Garcés, Velasco, Marín, Gutiérrez, Moreno, & Delgadillo. (2013). Mexico City's municipal solid waste characteristics and composition analysis. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 39-46.
40. Durán-Moreno, A., González, G., Basurto, G., Castelán, G., Patricio, H., Peralta, S., . . . Sánchez, A. (2018). Estudio de Digestión Anaerobia húmeda y seca a nivel planta piloto para la construcción de una planta de tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el municipio de Naucalpan. Ciudad de México: GIZ México.
41. Ecoparc. (20 de Octubre de 2020). *Ecoparc de Barcelona S.A*. Obtenido de <http://ecoparcbcn.com/>
42. Effenberger, J., Jahn, L., & Kuehn, V. (2016). Co-digestion of press liquids of source-sorted municipal organic waste in anaerobic sludge treatment of municipal wastewater treatment plants. *Water Science Technology*, 3080-3086.
43. EnRes. (2019). *Proyectos demostrativos del programa EnRes de GIZ: Las lecciones aprendidas*. Ciudad de México: GIZ.

44. Environment Canada. (2013). *Technical Document on Municipal Solid Waste Organics Processing*. Canada: Public Works and Government Services of Canada (PWGSC).
45. Epp, C., Rutz, D., Köttner, M., & Finsterwalder, T. (2008). *Guidelines for selecting suitable sites for biogas plants*. Munich: BIG EAST.
46. Escamilla, P., Tavera, M., Sandoval, R., Salinas, E., & Alvarado, H. (2016). Economic Feasibility Analysis for Electrical generation from biogas in waste disposal sites in Mexico City. *Applied Economics*, 5761-5771.
47. Esteves, S., Miltner, M., & Fletch, S. (2012). Monitoring review and guide for the optimisation of anaerobic digestion and biomethane plants. The Wales centre of excellence for Anaerobic Digestion.
48. FAO. (2012). *Manual del biogás*. Chile: FAO.
49. Fernandez Rodríguez, J. (2012). *Biometanización en fases de temperatura de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos*. España: UNIA.
50. Gatti, S. (2018). *Project Finance in Theory and Practice: Designing, structuring an financing private and public projects*. London: Elsevier.
51. Ghasemi, A., Tabatabaei, M., M., A., & Mussatto, S. (2018). Waste Management Strategies; the state of the art. En M. Tabatabaei, & H. Ghanavati, *Biogas Fundamentals, Process, and Operation* (págs. 1-49). Springer.
52. GIZ. (s.f.). Guide to Biogas from production to use. GIZ.
53. Global Methane Initiative. (2016). *Overview of Anaerobic Digestion for Municipal Solid Waste*. GMI.
54. Global Methane Initiative. (2016). Overview of Anaerobic Digestion for Municipal Solid Waste . GMI.
55. Google Maps. (2020).
56. Goossensen, M. (April de 2017). Anaerobic Digestion of Municipal Organic Waste in Amsterdam . Amsterdam: Wageningen University.
57. Grigatti, M., Barbanti, L., Umair, M., & Ciavatta, C. (2020). Fertilizing potential and CO2 emissions following the utilization of fresh and composted food-aste anaerobic digestates. *Science of the Total Environment*.
58. Hartmann, H., & Ahring, B. (2008). Strategies for the anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: an overview. *Water science and technology*, 7-22.
59. Harun, N., Ibrahim, W., Lukman, M., Yosoff, M., Daud, N., & Zainol, N. (2018). Process simulation of anaerobic digestion process for municipal solid waste. En *anaerobic Digestion Processes: Applications and effluent treatment* (págs. 71-85). Springer Nature.

60. Herva, M., & Roca, E. (2013). Ranking municipal solid waste treatment alternatives based on ecological footprint and multi-criteria analysis. *Ecological Indicators*, 77-84.
61. IIBA. (2015). *Business Analysis Body of Knowledge*. Canada: International Institute of Business Analysis.
62. INEGI. (2015). Encuesta Intercensal. INEGI.
63. Iniciativa, G. M. (2013). Successful applications of anaerobic digestion from across the world. GMI.
64. IPCC. (2014). *Annex III: Technology-Specific Cost and performance parameters*. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
65. IPNI. (24 de Mayo de 2021). International Plant Names Index. The Royal Botanic Gardens, Kew, Harvard University, Herbaria & Libraries and Australian National Botanic Gardens. Obtenido de <http://www.ipni.org>
66. Iracheta, A. (Septiembre de 2016). La sustentabilidad en México desde la mirada metropolitana. Ciudad de México, México: Fundación Friedrich Ebert en México.
67. Izumi, K., Okishio, Y. N., Niwa, C., Yamamoto, S., & Toda, T. (2010). Effects of particle size on anaerobic digestion of food waste. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 601-608.
68. Jain, S. (2019). *Global Potential of Biogas*. World Biogas Association.
69. Jürgen, D. (2018). Biogas Production: Mechanical and Thermal Pre-treatment Technologies. En *Biogas: Fundamentals, Process, and Operation*. (págs. 117-133). Springer.
70. Kaltschmitt, M., & Ríos, M. (2016). Electricity generation Potential from biogas produced from organic waste in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy*, 384-395.
71. Karagiannidis, A., & Perkoulidis, G. (2009). A multi-criteria ranking of different technologies for the anaerobic digestion for energy recovery of the organic fraction of municipal solid wastes. *Bioresource Technology*, 2355-2360.
72. Karak, T., Bhagat, R., & Pradip, B. (2012). Municipal Solid Waste Generation, Composition and Management: The world scenario. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 1509-1630.
73. Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0, a Global Snapshot of Solid Waste Management*. World Bank Group.
74. Kohler. (23 de Octubre de 2020). *Clarke Energy*. Obtenido de CHP efficiency for biogas: <https://www.clarke-energy.com/2013/chp-cogen-efficiency-biogas/>

75. Korz, D. (2009). Industrial Experiences with Anaerobic Digestion Plants in Europe. *A greener planet: reuse of organic residuals*. California: EPA. Obtenido de https://archive.epa.gov/region9/organics/web/pdf/korz_presentation.pdf
76. Kraemer, T., & Gamble, S. (2014). Integrating Anaerobic Digestion with composting. *BioCycle*, 32-42.
77. Kumar, A., & Samadder, S. (2020). Performance evaluation of anaerobic digestion technology for energy recovery from organic fraction of municipal solid waste: A review. *Energy*.
78. Kumar-Tyagi, Fernandez, Zhou, Álvarez-Gallego, Romero-García, & Jem. (2018). Anaerobic Co-digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW): Progress and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 380-399.
79. Li, C. (2015). *Wet and Dry Anaerobic Digestion of Biowaste and of Co-substrates*. Karlsruhe Institut für Technologie.
80. Li, Y., Chen, Y., & Wu, J. (2019). Enhancement of methane production in anaerobic digestion process: A review. *Applied Energy*, 120-137.
81. Lissens, G., Vandevivere, P., De Baere, L., Bley, E., & Verstraete, W. (2001). Solid waste digestors: process, performance and practice for municipal solid waste digestion. *Water Science and Technology*, 91-102.
82. Lorenzo Acosta, Y., & Obaya Abreu, M. C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. La Habana, Cuba: ICIDCA. Sobre los derivados de la caña de azúcar.
83. Lou, X., & Nair, J. (2009). The impact of landfilling and composting on greenhouse gas emissions- A review. *Bioresource Technology*, 3792-3798.
84. Makan, A., & Fadili, A. (2020). Sustainability assessment of large-scale composting technologies using PROMETHEE method. *Journal of Cleaner Production*.
85. Malinauskaite, J., Jouhara, Czajczynska, Stanchev, Katsou, Rostkowski, . . . Vlasopoulos, S. (2017). Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe. *Energy*, 2013-2044.
86. Manyi-Lo, M. S. (2019). Microbial anaerobic digestion: process dynamics and implications from the renewable energy, environmental and agronomy perspectives. *International Journal of Environmental Science and Technology*.
87. Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Guangxin, R. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and sustainable energy reviews*.

88. Mata-Alvarez, J., Macé, S., & Llabrés, P. (2000). Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology*, 3-16.
89. McDonald, N. (Octubre de 2012). Case Study - Anaerobic Digestion Plant in Hengelo, NL. OWS INC.
90. Mediavilla-Merchán, V. (2018). Technical potential for biogas production and greenhouse gas mitigation from the anaerobic digestion of municipal solid waste. GIZ.
91. Meegoda, J., Li, B., Patel, K., & Wang, L. (2018). A review of the processes, parameters and optimization of Anaerobic Digestion. *International Journal of Environmental Research and Public Health*.
92. Meixueiro, J., & Pérez-Cruz, M. A. (2008). *Metodología general para la evaluación de proyectos*. México: BANOBRAS.
93. Meixueiro, J., Mascle-Allemand, A., & Pérez, M. (2008). *Metodologías para la evaluación de proyectos de residuos sólidos urbanos*. México: BANOBRAS.
94. Mendelson, H., & Jones, R. (2011). Information Goods vs. Industrial Goods: Cost Structure and Competition. *Management Science*, 164-176.
95. Migliori, M., Catizzone, E., Giordano, G., Le Pera, A., Sellaro, M., Lista, A., . . . Zoia, L. (2019). Pilot plant data assessment in anaerobic digestion of organic fraction of municipal waste solids. *MDPI Processes*, 1-9.
96. Mizanur, R., & Yeoh, S. L. (2018). Anaerobic Digestion of food waste. *Anaerobic Digestion Processes*.
97. Monson, K., Esteves, S., Guwy, A., & Dinsdale, R. (2006). Anaerobic Digestion of Source Segregated Biowastes-Vasteras Case Study. Wales: University of Glamorgan.
98. Moriarty, K. (2013). *Feasibility Study of Anaerobic Digestion of Food Waste in Louisiana*. USA: National Renewable Energy Laboratory.
99. Morín, E., Alvarado, M., Torres, R., & Orozco, A. I. (2017). *Glosario de términos para la preparación y evaluación socioeconómica de proyectos de inversión*. México: BANOBRAS-CEPEP.
100. Münster, M., & Lund, H. (2010). Comparing waste-to-energy technologies by applying energy system analysis. *Waste Management*, 1251-1263.
101. Muñoz, C., & Morales, R. (2018). Generación de residuos orgánicos en las unidades económicas comerciales y de servicios en la Ciudad de México. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 733-767.
102. Mutz, D., Hengevoss, D., Hugli, C., & Gross, T. (2017). Opciones para el aprovechamiento energético de residuos en la gestión de residuos sólidos urbanos. Eschborn: GIZ.

103. Mutz, D., Hengevoss, D., Hugi, C., & Gross, T. (2017). *Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management*. Germany: GIZ.
104. Olivard, P.-M. (2017). *Feasibility Study of running an Anaerobic Digestion Plant coupled with a Combined Heat and Power Plant near Paris, France, processing 50,000 tons of food waste per year*. Barcelona: UPC (UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA, BARCELONATECH).
105. OWS. (20 de octubre de 2020). *Organic Waste Systems*. Obtenido de Dranco Plant References: <https://www.ows.be/es/>
106. Passalacqua, H., & Saputelli, L. (2013). *Front-End-Loading (FEL) Process supporting optimum field development decision making*. SPE International.
107. Patterson, T., Esteves, S., Dinsdale, R., & Guwy, A. (2011). *Life cycle assessment of biogas infrastructure options on a regional scale*. *Bioresource Technology*, 7313-7323.
108. PEMEX. (2012). *Manual del Sistema Institucional de Desarrollo de Proyectos*. PEMEX.
109. Polprasert, C., & Thammarat, K. (2017). *Organic Waste Recycling*. Thailand: IWA Publishing.
110. Project Management Institute. (2017). *Project Management Body of Knowledge*. PMI, Inc.
111. Raghav, S., Meguid, A., & Hegazi, H. (2013). *Treatment of leachate from municipal solid waste landfill*. *HBRC Journal*, 187-192.
112. Ranieri, L., Giorgio, M., Pellegrino, R., & Digiesi, S. (2018). *Energy recovery from the organic fraction of municipal solid waste: A real options-based facility assessment*. *MDPI Sustainability*.
113. Rapport, J., Zhang, R., Jenkins, B., & Williams, R. (2009). *Current Anaerobic Digestion Technologies Used for Treatment of Municipal Organic Solid Waste*. California, US: California Integrated Waste Management Board.
114. Rapport, J., Zhang, R., Williams, R., & Jenkins, B. (2012). *Anaerobic Digestion Technologies for the treatment of Municipal Solid Waste*. *Int. J. Environment and Waste Management*, 100-121.
115. Rehman, M., Iqbal, A., Chang, C., Li, W., & Ju, M. (2019). *Anaerobic Digestion*. *Water Environment Research*, 1253-1271.
116. Sánchez, E., Van der Wal, M., López, H., Vázquez, A., Espinosa, R., & Álvarez, J. (2016). *Operación de siete plantas de composta de la Ciudad de México*. En M. Nakasima, S. Ojeda, P. Taboada, Q. Aguilar, & E. Cruz, *Los Residuos Sólidos como fuente de materiales y energía* (págs. 244-252). México: SOMERS AC.
117. Sapag-Chain, N. (2011). *Proyectos de Inversión: Formulación y Evaluación*. Chile: Pearson Education.

118. Sapag-Chain, N., & Sapag-Chain, R. (2008). *Preparación y Evaluación de Proyectos*. Colombia: Mc-Graw Hill.
119. Scheutz, C., Aghdam, E., & Kjeldsen, P. (2018). Impact of meteorological parameters on extracted landfill gas composition and flow. *Waste Management*, 905-914.
120. SEDEMA . (2019). Inventario de Residuos Sólidos de la Ciudad de México 2018. Ciudad de México : Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México .
121. SEDEMA. (2019). Basura Cero. Plan de acción de la Ciudad de México para una economía circular. SEDEMA.
122. SEDEMA. (26 de Mayo de 2019). *Basura Cero: Plan de acción de la Ciudad de México para una economía circular*. Obtenido de BASURA CERO: <https://basuracero.cdmx.gob.mx/>
123. SEDEMA. (2020). *Inventario de Residuos Sólidos de la Ciudad de México 2019*. CDMX: SEDEMA.
124. SEMARNAT. (2016). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde*. México: SEMARNAT.
125. SEMARNAT. (2019). Visión Nacional hacia una gestión sustentable: Cero residuos. México: SEMARNAT.
126. SEMARNAT. (2020). *Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos* . CDMX: SEMARNAT.
127. SENER. (2019). *Balance Nacional de Energía*. México: SENER.
128. SHCP. (2013). Lineamientos para la elaboración y presentación de los análisis costo y beneficio de los programas y proyectos de inversión.
129. Siddarth, J., Shivani, J., Ingo, W., Lee, J., & Yen-Wah, T. (2015). A comprehensive review on operating parameters and different pretreatment methodologies for anaerobic digestion of Municipal Solid Waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 142-154.
130. Singh, S., Anunay, G., Rohit, G., Shivangi, G., & Vipul, V. (2016). Greenhouse gas emissions from landfills: A case of NCT of Delhi, India. *Journal of Climatology & Weather Forecasting*.
131. STRABAG. (2017). References: Biogas Plants/ Digestion Plants. Germany: STRABAG GmbH.
132. Sun, Q., Li, H., Yan, J., Liu, L., Yu, Z., & Yu, X. (2015). Selection of appropriate biogas upgrading technology a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation. *Renewable and sustainable energy reviews*, 521-532.

133. Tabatabaei, M., Valijanlian, E., Aghbashlo, M., Ghanavati, H., Sulaiman, A., & Wakisaka, M. (2018). Prominent Parameters in Biogas Production Systems. En *Biogas: Fundamentals, Process, and Operation*. (págs. 135-162). Springer.
134. Talia, L. (2018). Biogas Plants: Design and Fabrication. *Biofuel and Biorefinery Technologies*, 95-116.
135. Trottier, S. (2015). Understanding the changes to Global Warming Potential (GWP) values. *Ecometrica*.
136. Tsydenova, N., Vázquez-Morrillas, A., Martínez-Hernández, Á., Rodríguez-Soria, D., Wilches, C., & Pehlken, A. (2019). Feasibility and barriers for Anaerobic Digestion in Mexico City. *MDPI Sustainability*, 1-22.
137. Twidell, J., & Weir, T. (2015). *Renewable Energy Resources*. New York: Routledge.
138. UPIIA UNAM. (Septiembre de 2018). Estudio de digestión anaeróbica seca y húmeda en planta piloto, para determinar el potencial de producción de biogás a partir de residuos orgánicos generados en el municipio de Naucalpan de Juárez. Ciudad de México: GIZ México.
139. Usack, J., Spirito, C., & Angenent, L. (2012). Continuously-stirred anaerobic digester to convert organic wastes into biogas: System setup and basic operation. *Journal of Visualized Experiments*, 1-9.
140. VALORGA. (20 de Octubre de 2020). *Valorga International*. Obtenido de [http://www.valorgainternational.fr/en/mpg2-111280--Hanover-\(Germany\).html](http://www.valorgainternational.fr/en/mpg2-111280--Hanover-(Germany).html)
141. Vaneekhaute, C., Ghekiere, G., Vanrolleghem, P., Meers, E., & Tack, F. (2013). Nutrient Recovery from Biodigestion Waste Water Streams and Reuse as Renewable Fertilizers: A two-year field experiment. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 1-4.
142. Verma, S. (2002). *Anaerobic Digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes*. Master Thesis, Department of Earth and Environmental Engineering. Columbia University.
143. Villanueva-Estrada, R., Rocha-Miller, R., Arvizu-Fernández, J. L., & Castro-González, A. (2018). Energy production from biogas in a closed landfill: A study of Prados de la montaña, Mexico City. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 236-244.
144. Villareal, J., & Tornel, C. (Noviembre de 2017). La transición energética en México: retos y oportunidades para una política ambientalmente sustentable y socialmente inclusiva. Ciudad de México, México: Fundación Friedrich Ebert en México.
145. Vögeli, Lohri, Gallardo, Diener, & Zurbrügg. (2014). *Anareobic digestion of Biowaste in Developing Countries*. Dübendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute of aquatic Science and Technology (Eawag).

146. Wang, L., & Bo, Z. (2014). Anaerobic Digestion of Organic Wastes. En L. Wang, & Z. Bo, *Sustainable Bioenergy production*. Taylor & Francis Group.
147. WELTEC. (20 de Octubre de 2020). *Weltec Biopower*. Obtenido de Plant for organic wastes: <https://www.weltec-biopower.com/>
148. Wid, N., & Horan, N. (2018). Anaerobic Digestion of Screenings for Biogas Recovery. *Green energy and Technology*, 85-103.
149. Yousuf, A., Rahman-Kahn, M., Ab-Wahid, Z., Pirozzi, D., & Radzi, S. (2017). Business models for sustainability of biogas technology. *Medwell Journals*, 609-616.
150. Zahedi, S., Sales, D., Romero, L., & Solera, R. (2013). Optimisation of the two-phase dry-thermophilic anaerobic digestion process of sulphate-containing municipal solid waste: population dynamics. *Bioresource Technology*, 443-452.
151. Zamri, M., Hasmady, S., Akhilar, A., Ideris, F., Shamsuddin, A., Mofijur, M., . . . Mahlia, T. (2020). A comprehensive review on anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Renewable and sustainable energy reviews*.
152. Zhang, Y., & Banks, C. (2013). Impact of different particle size distribution on anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste. *Waste management*, 297-307.

ANEXO 1. ASPECTOS ECONÓMICOS (Cifras en dólares)

Capacidad t/año	10,000	25,000	50,000	75,000	100,000	125,000	150,000
Costos de capital (USD/t)	\$ 6	\$ 12	\$ 14	\$ 16	\$ 18	\$ 21	\$ 23
O&M (USD/t)	\$ 5	\$ 10	\$ 12	\$ 13	\$ 15	\$ 16	\$ 18
Inversión Inicial (10 ³ USD)	\$ 5,950	\$ 11,900	\$ 14,280	\$ 16,660	\$ 19,040	\$ 21,420	\$ 23,800
Inversión Total (USD)	\$ 7,169,750	\$ 17,998,750	\$ 28,560,000	\$ 41,203,750	\$ 55,930,000	\$ 72,738,750	\$ 91,630,000
O&M	\$ 1,041,250	\$ 5,206,250	\$ 11,900,000	\$ 20,081,250	\$ 29,750,000	\$ 40,906,250	\$ 53,550,000
BTA (Inv.)	\$ 5,310,000	\$ 13,275,000	\$ 26,550,000	\$ 39,825,000	\$ 53,100,000	\$ 66,375,000	\$ 79,650,000
BTA (O&M)	\$ 800,000	\$ 2,000,000	\$ 4,000,000	\$ 6,000,000	\$ 8,000,000	\$ 10,000,000	\$ 12,000,000
ROS ROCA (Inv.)	\$ 4,890,000	\$ 12,225,000	\$ 24,450,000	\$ 36,675,000	\$ 48,900,000	\$ 61,125,000	\$ 73,350,000
ROS ROCA (O&M)	\$ 730,000	\$ 1,825,000	\$ 3,650,000	\$ 5,475,000	\$ 7,300,000	\$ 9,125,000	\$ 10,950,000
STRABAG (Inv.)	\$ 4,460,000	\$ 11,150,000	\$ 22,300,000	\$ 33,450,000	\$ 44,600,000	\$ 55,750,000	\$ 66,900,000
STRABAG (O&M)	\$ 670,000	\$ 1,675,000	\$ 3,350,000	\$ 5,025,000	\$ 6,700,000	\$ 8,375,000	\$ 10,050,000
WELTEC (Inv.)	\$ 3,250,000	\$ 8,125,000	\$ 16,250,000	\$ 24,375,000	\$ 32,500,000	\$ 40,625,000	\$ 48,750,000
WELTEC (O&M)	\$ 490,000	\$ 1,225,000	\$ 2,450,000	\$ 3,675,000	\$ 4,900,000	\$ 6,125,000	\$ 7,350,000

Fuente: Elaboración propia con datos de: Mutz (2017); Rapport et al. (2012); Durán-Moreno et al. (2018).