



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**INGENIERÍA AMBIENTAL-RESIDUOS SÓLIDOS**

**PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA PARA LA TOMA DE DECISIONES EN**  
**PROYECTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
**MAESTRA EN INGENIERÍA**

P R E S E N T A:  
**Q.A. CECILIA MARTÍNEZ GARCÍA**

TUTOR PRINCIPAL  
**Dr. Alfonso Durán Moreno, Facultad de Química**

COMITÉ TUTOR  
**Dr. Germán Buitrón Méndez, Instituto de Ingeniería**  
**Dra. Alejandra Castro González, Facultad de Ingeniería**

MÉXICO, D.F. SEPTIEMBRE DE 2014

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Buitrón Méndez Germán  
Secretario: Dr. César Valdez Enrique  
Vocal: Dr. Durán Moreno Alfonso  
1<sup>er</sup> Suplente: Dra. Castro González Alejandra  
2<sup>do</sup> Suplente: M. A. I. Ramírez Burgos Landy Irene

Lugar donde se desarrolló la tesis:  
3<sup>er</sup> piso ala sur, Torre de Ingeniería, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Alfonso Durán Moreno

-----  
FIRMA

## DEDICATORIA

*A mis padres por su apoyo incondicional, paciencia y comprensión. En especial a mi madre Ofelia que ha estado en mis momentos difíciles.*

\*\*\*\*\*

*A mi hermano Oscar, estoy sumamente orgullosa de ti.*

\*\*\*\*\*

*A Yamani por ser la persona especial y maravillosa que es conmigo.*

\*\*\*\*\*

*A cada una de las personas que directa e indirectamente estuvieron en esta gran etapa de mi vida. Y a la vida misma por permitirme vivir esta experiencia, que me dejó tantas cosas y momentos geniales.*

## AGRADECIMIENTOS

*A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por hacer de mí una mejor persona y profesionalista. Jamás terminaré de agradecerle a esta casa de estudios por todo lo que me ha dado.*

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por darme el apoyo económico y permitir que haya realizado mis estudios de maestría.*

*Al Dr. Alfonso Durán Moreno por todo su tiempo, pero en especial por compartirme su conocimiento y saber orientarme en el desarrollo de mi tesis. Mil gracias por confiar en mí.*

*Al Dr. Germán Buitrón y a la Dra. Alejandra Castro por su tiempo, comentarios y consejos otorgados durante estos dos años.*

*A la Maestra Landy Ramírez y al Dr. Enrique César, por su tiempo en la revisión de mi tesis.*

*A mis compañeros de generación por compartir su experiencias y tiempo conmigo.*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	7
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	9
Justificación .....	11
Objetivo general .....	12
Objetivos particulares .....	12
Alcances.....	12
<b>2. ANTECEDENTES</b> .....	13
2.2 Residuos Sólidos Urbanos .....	13
2.3 Generación de Residuos Sólidos Urbanos en México.....	14
2.4 Composición de los Residuos Sólidos Urbanos en el Estado de México, Estado de Morelos y Distrito Federal.....	16
2.4.1 Caracterización física de los RSU .....	17
2.4.2 Caracterización química de los RSU .....	18
2.5 Disposición final y tratamiento de los Residuos Sólidos Urbanos .....	20
2.6 Costos por tratamiento y disposición de los RSU .....	22
2.7 Aprovechamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos.....	23
2.8 Digestión Anaerobia .....	24
2.8.1 Descripción del proceso de Digestión Anaerobia.....	24
2.8.2 Etapas de la Digestión Anaerobia.....	25
2.9 Factores que influyen en la Digestión Anaerobia .....	29
2.10 Digestores anaerobios.....	31
2.11 Evaluación de proyectos de Digestión Anaerobia.....	34
2.12 Evaluación de alternativas tecnológicas .....	35
2.12.1 Modelos de análisis multicriterio .....	36
2.12.2 Método PROMETHEE.....	37
2.12.3 Identificación y definición de los criterios .....	40
2.12.3.1 Asignación de los pesos a los criterios .....	40
2.12.3.2 Criterios generalizados .....	41

2.13 Viabilidad económica de proyectos de Digestión Anaerobia.....	42
2.13.1 Valor Presente de Costos (VPC) .....	42
2.13.2 Valor Presente Neto (VPN) .....	42
2.13.3 Tasa Interna de Retorno (TIR).....	43
2.13.4 Costo Anual Equivalente (CAE) .....	43
<b>3. METODOLOGÍA .....</b>	<b>46</b>
3.1 Propuesta metodológica para la toma de decisiones en proyectos de Digestión Anaerobia.....	46
3.2 Primera parte: Descripción del caso de estudio.....	46
3.2.1 Identificación del problema .....	47
3.2.2 Diagnóstico de la situación actual .....	47
3.2.3 Identificación de alternativas de solución .....	49
3.2.3.1 Selección de alternativas tecnológicas .....	49
3.2.4 Criterios de Evaluación de tecnologías de Digestión Anaerobia .....	51
3.2.4.1 Escala de evaluación de Criterios .....	57
3.2.5 Evaluación final de las alternativas tecnológicas de DA.....	60
3.2.6 Selección de alternativas de sitio.....	60
3.3 Segunda parte: Evaluación económica del proyecto .....	62
<b>4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA AL CASO DE ESTUDIO DEL MUNICIPIO DE ECATEPEC .....</b>	<b>63</b>
4.1 Primera parte: Descripción del caso de estudio.....	63
4.1.1 Identificación del problema .....	63
4.1.2 Diagnóstico de la situación actual .....	63
4.2 Identificación de alternativas de solución .....	69
4.2.1 Selección de alternativas tecnológicas .....	69
4.2 Segunda parte: Evaluación económica del proyecto .....	78
4.2.1 Costos por tratamiento y disposición de los RSU en Ecatepec de Morelos.....	78
4.2.2 Costos de inversión del proyecto de Digestión Anaerobia.....	78
4.2.3 Costos de operación y mantenimiento de la planta de DA.....	80

4.2.4 Costo por disposición de los residuos generados en el proceso de Digestión Anaerobia.....	81
<b>5. ENTREGABLE .....</b>	<b>82</b>
5.1 Viabilidad del proyecto de Digestión Anaerobia .....	82
5.2 Beneficios del proyecto de Digestión Anaerobia .....	83
5.2.1 Venta del biogás en México .....	83
5.2.2 Mercado del fertilizante/composta .....	84
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>86</b>
<b>7. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>87</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>96</b>

---

## ÍNDICE DE TABLAS

---

<b>Tabla 2.1</b> Caracterización física de la FORSU, en los Estados de México, Morelos y Distrito Federal, 2012.....	17
<b>Tabla 2.2</b> Caracterización química de los RSU.....	18
<b>Tabla 2.3</b> Costo por tonelada de RSU para su disposición final.....	22
<b>Tabla 2.4</b> Costo del manejo de los RSU en América Latina .....	23
<b>Tabla 2.5</b> Características generales del biogás.....	25
<b>Tabla 2.6</b> Bacterias involucradas en las etapas de la Digestión Anaerobia.....	28
<b>Tabla 2.7</b> Digestores Anaerobios.....	32
<b>Tabla 2.8</b> Etapas de la metodología FEL.....	35
<b>Tabla 2.9</b> Referencias PROMETHEE .....	38
<b>Tabla 2.10</b> Matriz de alternativas-criterios.....	39
<b>Tabla 3.1</b> Situación Actual de la Generación de RSU del Municipio.....	49
<b>Tabla 3.2</b> Criterios para la evaluación preliminar.....	50
<b>Tabla 3.3</b> Criterios para la evaluación de proyectos de DA.....	52
<b>Tabla 4.1</b> Criterios de evaluación.....	72
<b>Tabla 4.2</b> Costo total de una planta de DA, sistema seco.....	79



---

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

<b>Figura 2.1</b> Generación estimada de RSU por Entidad Federativa (INEGI, 2011).....	15
<b>Figura 2.2</b> Composición de los Residuos Sólidos Urbanos en México.....	16
<b>Figura 2.3</b> Caracterización física de la FORSU.....	18
<b>Figura 2.4</b> Emisiones generadas por sector.....	21
<b>Figura 2.5</b> Diagrama de rutas potenciales de aprovechamiento de la FORSU.....	22
<b>Figura 2.6</b> Diagrama del proceso de Digestión Anaerobia.....	27
<b>Figura 2.7</b> Metodología FEL.....	34
<b>Figura 2.8</b> Diagrama general de proyectos de inversión.....	44
<b>Figura 3.1</b> Propuesta Metodológica para la evaluación de proyectos de DA.....	47
<b>Figura 3.2</b> Selección de tecnologías de Digestión Anaerobia.....	49
<b>Figura 4.1</b> Mapa de Ecatepec de Morelos, Edo. De México.....	64
<b>Figura 4.2</b> Proyección de la población de Ecatepec de Morelos.....	65
<b>Figura 4.3</b> Proyección de la generación de RSU en Ecatepec de Morelos.....	66
<b>Figura 4.4</b> Zonas de recolección de los RSU.....	67
<b>Figura 4.5</b> Carretonero.....	68
<b>Figura 4.6</b> Relleno Sanitario Santa María Chiconautla, 2013.....	68
<b>Figura 4.7</b> Evaluación preliminar de tecnologías de DA.....	71
<b>Figura 4.8</b> Tecnologías de DA.....	72
<b>Figura 4.9</b> Diagrama jerárquico.....	74
<b>Figura 4.10</b> Evaluación final de tecnologías de DA.....	75
<b>Figura 4.11</b> Ubicación del relleno sanitario de Santa María Chiconautla.....	77
<b>Figura 4.12</b> Beneficio/Costo del proyecto de DA.....	81

---

## LISTA DE ABREVIATURAS

---

<b>RSU</b>	Residuos Sólidos Urbanos
<b>DA</b>	Digestión Anaerobia
<b>FIRSU</b>	Fracción Inorgánica de los Residuos Sólidos Urbanos
<b>FORSU</b>	Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos
<b>GEI</b>	Gases Efecto Invernadero
<b>WMW</b>	Waste Management World
<b>MADM</b>	Multi-attribute decision making
<b>STT</b>	Sólidos Totales Totales
<b>SFT</b>	Sólidos Fijos Totales
<b>SVT</b>	Sólidos Volátiles Totales
<b>DQO</b>	Demanda Química de Oxígeno
<b>N-K</b>	Nitrógeno Kjeldhal
<b>COD</b>	Carbono Orgánico Disuelto
<b>DBO</b>	Demanda Bioquímica de Oxígeno

## RESUMEN

El presente trabajo abordó la problemática de la gestión inadecuada de los residuos sólidos urbanos, dentro de esta problemática se encuentra la generación excesiva que en 2011 fue de 41.10 millones de toneladas a nivel nacional (INEGI, 2011), siendo el Estado de México el principal generador de RSU (15,000 ton/día), cuya composición física muestra que los residuos de cáscaras de frutas y vegetales son los producidos principalmente, cabe destacar que la composición o caracterización es muy importante debido a que con ello se pueden realizar los programas de manejo integral, de reciclaje, y darle un aprovechamiento a la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) por medio de procesos aerobios/compostaje, o bien procesos anaerobios como lo es la de digestión anaerobia. La digestión anaerobia es un proceso complejo que se lleva a cabo en ausencia de oxígeno; en la DA prácticamente cualquier residuo orgánico puede ser biológicamente degradado, por diversas poblaciones de microorganismos, que llevan a cabo las reacciones bioquímicas que en la mayoría de las ocasiones ocurren en forma simultánea. Como producto de la digestión anaerobia se obtiene una mezcla de gases o biogás, constituido principalmente por metano entre 55-70 %, que puede ser empleado para la generación de calor y electricidad, y como subproducto un lodo digerido que puede ser empleado en la agricultura como fertilizante o bien como un remediador de suelos.

México está en busca de alternativas como la digestión anaerobia para el tratamiento de la fracción orgánica, lamentablemente hoy en día no existen metodologías específicas para realizar un proyecto de digestión anaerobia en México, por lo cual en este trabajo además de abordar la problemática de los residuos antes mencionada, se propuso una metodología enfocada en la etapa de Visualización, en esta etapa uno de los principales objetivos fue la evaluación de tecnologías por medio de una matriz multicriterio que incluyó criterios técnicos, económicos, ambientales y sociales, en esta tesis se optó por emplear el software Visual PROMETHEE como apoyo en la toma de decisiones. Otro de los objetivos de la Visualización fue analizar la viabilidad económica del proyecto de digestión anaerobia, para realizar el análisis se determinó bibliográficamente el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Costo Anual Equivalente (CAE). Esta etapa también consideró la propuesta de un sitio para llevar a cabo el proyecto de digestión anaerobia.

Para aplicar la metodología propuesta se realizó un caso de estudio, que involucró al municipio de Ecatepec de Morelos; la digestión anaerobia seca resultó la más favorecedora para tratar los residuos procedentes del municipio antes mencionado, obteniéndose un Valor Presente Neto de \$ 2,438,105, una Tasa Interna de Retorno del 19 % y un estimado de tiempo de recuperación de la inversión del proyecto de ocho años. En conclusión se propuso como

sitio para llevar a cabo el proyecto de DA al relleno sanitario de Santa María Chiconautla, ya que el sitio cuenta con el espacio disponible para llevar a cabo el proyecto, así como con la infraestructura básica necesaria, mano de obra para laborar en la planta y lo más importante es que cuenta con la disponibilidad de materia prima para alimentar al digestor.

En conclusión el proyecto de digestión es ambiental, social, técnica y económicamente viable en esta primera etapa de evaluación de proyectos.

## 1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el Waste Management World (2012), México se encuentra en la lista de los 10 principales países generadores de Residuos Sólidos Urbanos (RSU), esto se debe a diversos factores, entre los cuales se encuentran el crecimiento de la población, el desarrollo industrial, la urbanización, y los nuevos estilos de vida de la población. En el 2000 la generación nacional de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) fue de aproximadamente 85,000 ton/día (Buenrostro, et al., 2000), lo que equivale a una generación anual de 31.02 millones de toneladas, y para el 2010 la generación ascendió a 40.02 millones de toneladas, es decir que del año 2000 al 2010 hubo un incremento anual de 900 mil toneladas de RSU (INEGI, 2011).

La mayoría de los RSU que son recolectados no tiene un tratamiento correcto, ni una adecuada disposición final, por lo que representa un grave problema para el medio ambiente y para la sociedad. En el caso de las afectaciones al medio ambiente, uno de los problemas es cuando los residuos son vertidos a cuerpos de agua afectando su calidad. El agua subterránea también es afectada, ya que puede contaminarse por la infiltración de lixiviados que contienen materiales tóxicos como metales pesados; los lixiviados se generan durante la degradación de la materia orgánica de los residuos y su infiltración se debe al manejo inapropiado en los rellenos sanitarios o sitios no controlados (Dent & Krol, 1990).

La gestión inadecuada de los residuos también daña la calidad del aire, ya que los residuos están asociados frecuentemente a la generación de malos olores, a la producción de Gases Efecto Invernadero (GEI), como el metano ( $\text{CH}_4$ ) y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), y a la generación de partículas en suspensión originadas de la quema intencional o espontánea de los residuos, que no solo provocan afectaciones al medio ambiente, sino también a la salud de la población cercana a los sitios de disposición final (Tamargo, 2005).

Lamentablemente muchos estados de la República Mexicana enfrentan serios problemas por la falta de una gestión adecuada de sus residuos y por la falta de alternativas viables y sustentables que puedan dar una solución al problema.

El Estado de México es uno de los principales generadores de RSU en la República Mexicana, y presenta los mayores problemas de gestión inadecuada. La mayoría de los residuos del Estado de México son depositados en sitios no controlados, tiraderos a cielo abierto y solo una mínima cantidad en rellenos sanitarios. El municipio de Ecatepec de Morelos es el que mayor atención requiere, pues no obstante de ser uno de los principales

generadores de residuos, no dispone de un sistema de tratamiento, ni de disposición final adecuados. Se estima que el 48 % de los residuos de Ecatepec de Morelos corresponde a la fracción inorgánica (FIRSU), y el restante 52 % pertenece a la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU).

Una alternativa ampliamente estudiada a nivel internacional para el tratamiento de la FORSU, es la Digestión Anaerobia (DA). La DA es un proceso que permite una reducción significativa de contaminación ambiental (Khalid, et al., 2011), con esta alternativa se podrá obtener como producto principal biogás y un lodo digerido o composta. El biogás ocupa el tercer lugar entre las fuentes renovables de mayor crecimiento y es empleado para la generación de electricidad, con un crecimiento anual que oscila en el 13.5 % (SENER, 2012). En lo que se refiere a la composta, ésta ofrece mayores ventajas competitivas sobre los demás fertilizantes, pero a la fecha no ha sido aprovechada debido a falta de cultura en su uso, y una escasa madurez de mercado que le permita ser un negocio redituable (Barradas Rebolledo, 2009).

Muchos proyectos de DA en zonas urbanas de países en desarrollo o bien enfrentan problemas operativos graves o han fracasado debido a diversos factores como el empleo de tecnologías inadecuadas, operadores poco capacitados, falta de mercados para la venta del biogás y del compost o lodo digerido, o bien por una falta de planeación, para resolver este último, los estudios de viabilidad, son una herramienta útil e indispensable en la toma de decisiones de proyectos de DA.

Un proyecto de DA puede ser considerado viable si puede mantenerse a nivel local y es adecuado desde perspectivas técnicas, económicas, sociales, ambientales, institucionales y legislativas (Riuji Lohri, et al., 2013). Para considerar la viabilidad de un proyecto es necesario realizar una evaluación que considere tecnologías que hayan sobresalido gracias a su capacidad en el tratamiento de la FORSU, y por su alta recuperación de energía.

## Justificación

Existe una problemática general en cuanto al manejo inadecuado de los RSU en el municipio de Ecatepec de Morelos, en particular de su fracción orgánica, que representa el 52.4 % del total de los RSU (SEMARNAT, 2012), y que genera tanto problemas en el medio ambiente (contaminando los recursos naturales en los sitios en donde se lleva a cabo su manejo y debido a la generación de gases de efecto invernadero), y de afectaciones a la salud de las poblaciones que se encuentran asentadas en los alrededores de los sitios de manejo, perjudicando de manera persistente la calidad de vida de la población.

Los proyectos de DA son considerados internacionalmente como una alternativa de solución a la disposición final de la FORSU (IDAE, 2007), con los cuales se consigue un valor agregado, al obtener biogás como producto de la degradación de los residuos, y como subproducto del proceso un lodo digerido o composta que puede ser empleado como mejorador de suelos o fertilizante para la agricultura. Adicionalmente, se espera que con los proyectos de Digestión Anaerobia se logre incrementar el tiempo de vida útil de los rellenos sanitarios y reducir los costos del manejo y disposición de los RSU.

Una de las etapas de cualquier proyecto es la planeación, y si bien es cierto que actualmente existen diversas metodologías de evaluación de proyectos, en esta tesis se propone una metodología exclusiva para proyectos que den una valorización a la Fracción Orgánica. La propuesta pretende ser una herramienta de ayuda en la toma de decisiones en proyectos de Digestión Anaerobia.

Con esta metodología los evaluadores y líderes de proyectos, tendrán un panorama general sobre la viabilidad técnica, económica, ambiental e incluso social. En muchas ocasiones los aspectos sociales son poco o nada considerados, en esta metodología será necesario plantear los beneficios que aportará el proyecto a las comunidades afectadas, así como los beneficios ambientales que se obtendrán. Para llevar a cabo la correcta ejecución de un proyecto de DA y evitar que fracase será necesario analizar a fondo la problemática existente en cuanto al manejo de la FORSU ya que sin esto difícilmente se podrán realizar planes de desarrollo realistas, si no se han identificado, formulado y evaluado los proyectos. La mejor manera de formular y evaluar proyectos es considerándolos dentro de un marco de referencia (Miranda, 2005), (Pérez Valle, 2013).

De manera general la metodología pretende dar un aporte conceptual e integrado en los proyectos de Digestión Anaerobia y ser referencia para su aplicación en futuros proyectos.

## **Objetivo general**

Desarrollar una metodología para la toma de decisiones en proyectos de Digestión Anaerobia, que considere aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales, para promover un valor agregado al tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos.

## **Objetivos particulares**

- Realizar una búsqueda de información de las herramientas de evaluación de proyectos, que sean un soporte para la elaboración de una propuesta metodológica para la toma de decisiones en proyectos de Digestión Anaerobia.
- Aplicar de forma integral la metodología propuesta a un caso de estudio que incluya al Municipio de Ecatepec de Morelos, y con ello comprobar su eficacia en los proyectos de Digestión Anaerobia.
- Evaluar tecnologías comerciales de Digestión Anaerobia, mediante una serie de criterios técnicos, económicos, ambientales y sociales, para obtener aquella o aquellas tecnologías que ofrezcan mayores ventajas al caso de estudio propuesto.
- Realizar un estudio económico del caso de estudio, para demostrar la viabilidad del proyecto y reducir el riesgo asociado al tomar una decisión de inversión.

## **Alcances**

- Analizar la caracterización de los RSU del Estado de México.
- Desarrollar una metodología para la evaluación de proyectos de Digestión Anaerobia.
- Proponer una tecnología o tecnologías, para el tratamiento de los residuos sólidos urbanos.



## 2. ANTECEDENTES

En este capítulo se aborda el concepto de RSU, así como la generación de RSU en las diferentes entidades de la República Mexicana, y composición física y química de los RSU del Estado de México, Morelos y Distrito Federal. Además se describe el proceso de la DA, en dicho proceso interviene un grupo de bacterias que son las encargadas de degradar la FORSU, de este proceso se puede obtener energía y calor, además de un subproducto sólido o composta que puede emplearse como mejorador de suelos.

### 2.2 Residuos Sólidos Urbanos

En lo que respecta al tema de residuos en México, este se rige por la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR). La LGPGIR tiene como objetivos aplicar los principios de valorización, manejo integral de residuos, bajo criterios de eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social, los cuales deben de considerarse en el diseño de instrumentos, programas y planes de política ambiental para la gestión de residuos. De acuerdo a la Ley General, los residuos se clasifican en tres principales grupos:

- **Residuos Sólidos Urbanos:** Son aquellos generados en las casas habitación, y que resultan de las actividades domésticas, de los productos que se consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública, y de los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados por la misma ley en otra categoría.

Los Residuos Sólidos Urbanos son una mezcla heterogénea de desechos, que se dividen en la fracción orgánica e inorgánica. La fracción orgánica engloba a los residuos de comida (pan, tortilla, cáscaras de frutas y verduras, cascarón de huevo, bolsas de té) y restos de jardín. Los residuos orgánicos se degradan con rapidez y pueden generar biogás que puede ser empleado como energía renovable.

- **Residuos peligrosos:** Son todos aquellos que poseen alguna característica de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos, así como envases embalajes o empaques que puedan contaminar los suelos.
- **Residuos de manejo especial:** Son los generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos ni como RSU, o

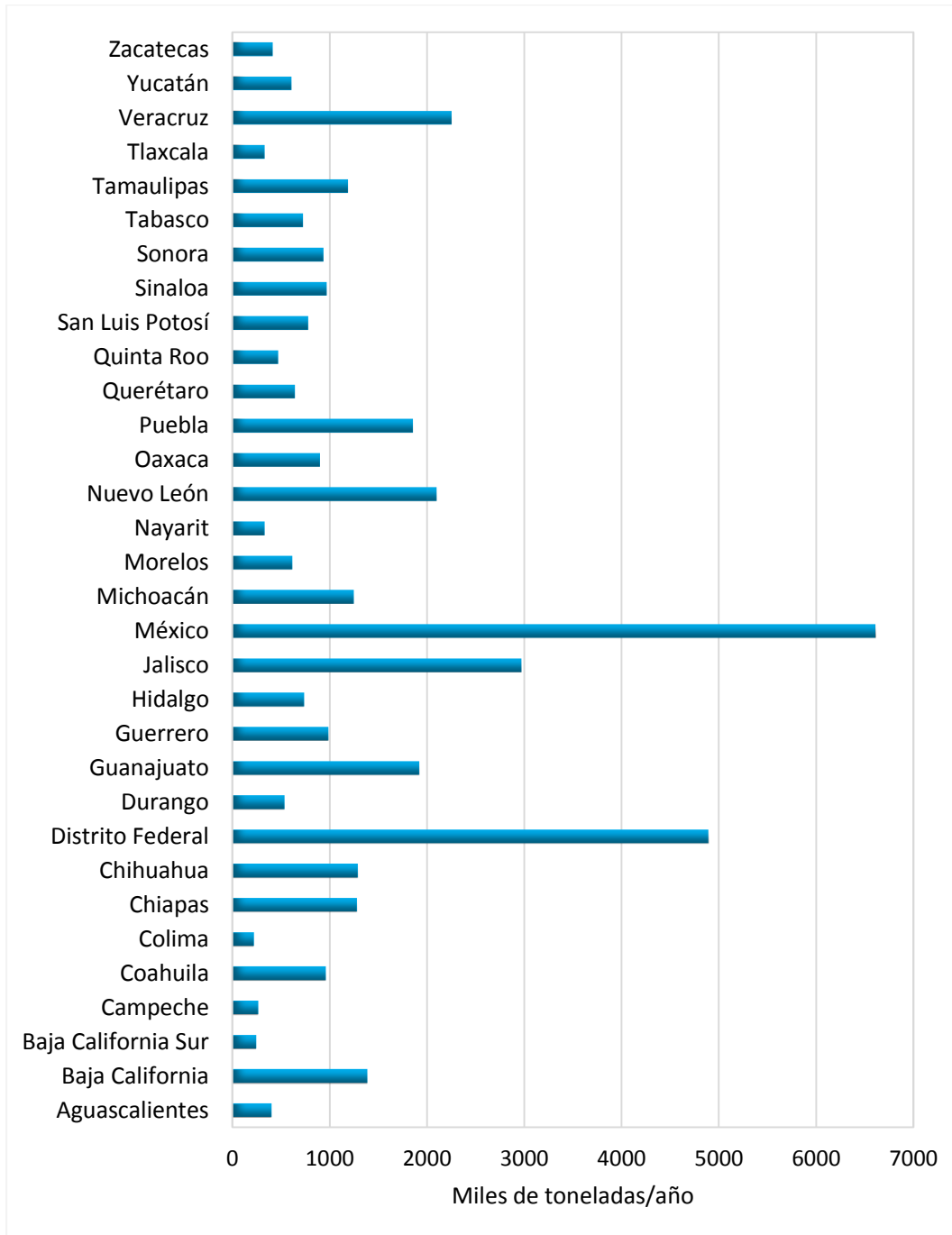
que son producidos por grandes generadores (producen más de 10 toneladas al año) de RSU. Su manejo y control es competencia de las autoridades estatales.

Así también se encuentra la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), cuyas disposiciones son de orden público e interés social, y tiene como fin la preservación, restauración y mejoramiento del ambiente. En cuanto a la normatividad ambiental de las entidades federativas, en el Distrito Federal se cuenta con la Ley Ambiental y la Ley de Residuos Sólidos. El Estado de México se encuentra legislado por el Código Administrativo, Ley Orgánica Municipal y el Código para la Biodiversidad; en el año 2009 se dio a conocer el Programa para la Prevención y Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial del Estado de México.

### **2.3 Generación de Residuos Sólidos Urbanos en México**

En 2010 se generaron 40.06 millones de toneladas de RSU a nivel nacional, de los cuales el 70.5 % (28.2 millones) fueron dispuestos en sitios controlados, 25.2 % (10.1 millones) en sitios no controlados y 4.2 % (1.7 millones de toneladas) se recuperaron para la comercialización con fines de reciclaje. Para el 2011 la generación de residuos aumento a 41.10 millones de toneladas (Quinto Informe de Gobierno Federal, 2011), lo que significó que en tan sólo un año la generación aumentó un millón de toneladas de Residuos Sólidos Urbanos.

En la Figura 2.1 se muestran las entidades que generaron mayor volumen de RSU, las cuales fueron el Estado de México, que actualmente en promedio genera 15,000 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos, provenientes de 38 municipios con sitios de disposición final no controlados, 28 municipios con sitios controlados, 13 municipios con rellenos sanitarios y 46 municipios sin sitio propio de disposición (Secretaría General del Gobierno del Edo. de México, 2012), seguido del Distrito Federal con una generación de 12,500 toneladas de residuos al día, provenientes de sus 16 delegaciones y de sus zona conurbada, en tercer lugar de generación se encuentra el Estado de Jalisco que en promedio recolecta 6,524 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos (INEGI, 2011).

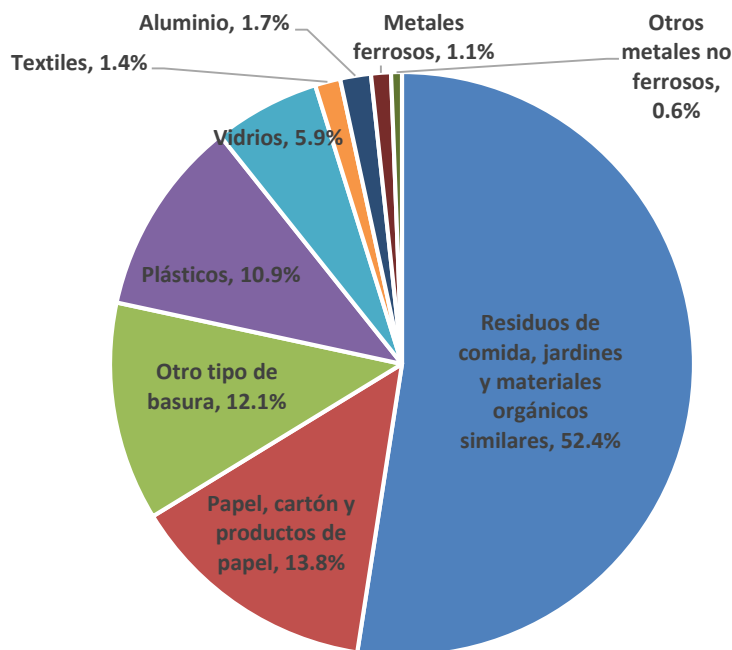


**Figura 2.1** Generación estimada de RSU por Entidad Federativa  
 Fuente: INEGI, 2011

## 2.4 Composición de los Residuos Sólidos Urbanos en el Estado de México, Estado de Morelos y Distrito Federal

La composición de los residuos sólidos no es homogénea (Figura 2.2), en gran medida depende de los hábitos de consumo y del poder adquisitivo de la población. Se estima que el 52 % de los RSU son materia orgánica, 29 % son subproductos potencialmente reciclables, destacando el papel y el cartón 15 %, Metal 3 %, Plásticos 6 % y Vidrio 6 %, y el 16 % restante son residuos misceláneos (Periódico Oficial, 2010). En 2009 la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales reportó que existe una correlación entre la composición de los residuos y las condiciones económicas del país.

Como se mencionó previamente, la composición de los residuos no es homogénea, siendo la fracción orgánica la que predomina en gran medida. La FORSU es biodegradable en presencia de oxígeno para su compostaje, y en ausencia de oxígeno, puede llevar a cabo el proceso de Digestión Anaerobia para la generación de biogás, una importante fuente de bioenergía.



**Figura 2.2** Composición de los Residuos Sólidos Urbanos en México

Fuente: Informe de la situación del medio ambiente en México. SEMARNAT, 2012

### 2.4.1 Caracterización física de los RSU

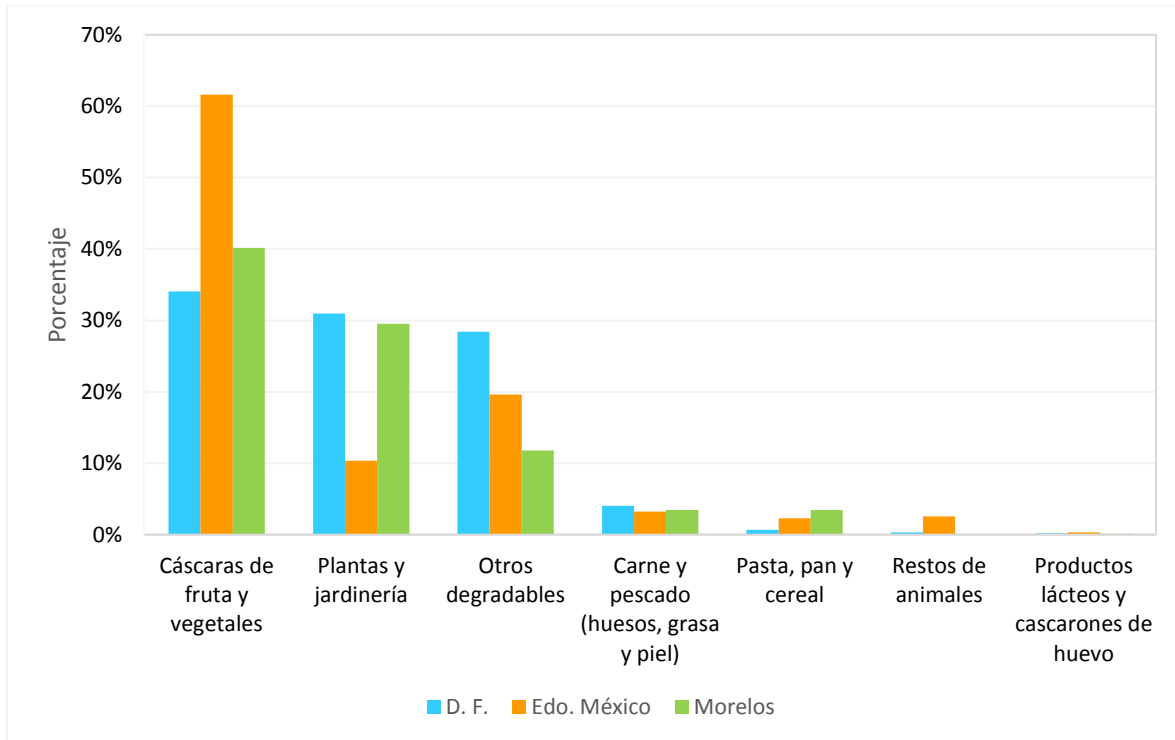
En 2012 la Facultad de Química realizó la caracterización de los Residuos Sólidos Urbanos de tres entidades, el Distrito Federal, Estado de México y Estado de Morelos. En la Tabla 2.1 se muestra la cuantificación de subproductos de las entidades mencionadas. La mayor proporción de residuos sólidos orgánicos se debe a las cáscaras de frutas y vegetales con un 45 %, seguido de plantas y jardinería (24 %) y otros residuos degradables (28 %). A pesar de que sólo se muestreó la Fracción Orgánica, dentro de ésta se encontraron residuos inorgánicos, aproximadamente el 2 % del total, cuya composición mayoritaria la presentan las bolsas de plástico, las cuales es muy probable se hayan empleado como medios de almacenamiento temporal de los residuos.

**Tabla 2.1** Caracterización física de la FORSU, en los Estados de México, Morelos y Distrito Federal, 2012

Tipo de residuo	D. F. (%)	Edo. México (%)	Morelos (%)
Cáscaras de fruta y vegetales	34.06	61.61	40.16
Carne y pescado (huesos, grasa y piel)	4.02	3.25	3.47
Pasta, pan y cereal	0.66	2.29	3.46
Productos lácteos y cascarones de huevo	0.17	0.34	0.13
Plantas y jardinería	30.95	10.37	29.55
Restos de animales	0.31	2.55	0.00
Otros degradables	28.40	19.61	11.79
Suma de residuos total	100.00	100.00	96.13

Fuente: La caracterización fue realizada por el grupo de trabajo del Doctor Alfonso Durán Moreno, de la Facultad de Química de la UNAM en 2012. Estos datos aún no se encuentran publicados oficialmente.

En la Figura 2.3, se observa que en el Estado de México predominan con un 61.61 % los residuos de frutas y vegetales, seguido de otros degradables con un 19.61 % y en tercer lugar plantas y jardinería 10.37 %.



**Figura 2.3** Caracterización física de la FORSU

Fuente: Facultad de Química, UNAM, 2012

## 2.4.2 Caracterización química de los RSU

Los residuos orgánicos poseen una gran cantidad de agua, aproximadamente 80 %, por ende el contenido de sólidos totales es del 20 %, de los cuales los carbohidratos son los que predominan. La agencia de protección ambiental de los Estados Unidos, menciona que los residuos de alimentos con un contenido de humedad entre 50-80 % tienen un rendimiento de 0.113 m<sup>3</sup> de biogás/kg de FORSU (Tchobanoglous, et al., 1993).

**Tabla 2.2** Caracterización química de los RSU

Parámetro	D.F. (%)	Edo. de México (%)	Morelos (%)
Humedad	77.4	81.6	73.8
STT	22.7	18.5	26.2
SFT	4.9	3.6	7.0

Parámetro	D.F. (%)	Edo. de México (%)	Morelos (%)
SVT	17.7	14.8	19.1
DQO	23.1	25.1	31.2
Fósforo Total	0.1	0.1	0.1
N-K	0.7	0.9	0.9
Cenizas	4.1	2.4	5.2
Grasas	1.8	1.5	1.6
Proteínas	4.3	5.8	5.7
COD	1.5	1.6	1.5
DBO	9.9	11.1	10.7
Carbohidratos	12.5	8.8	13.7
Fibras	4.7	3.4	5.3

Fuente: La caracterización química fue realizada en los laboratorios del Conjunto E, de la Facultad de Química de la UNAM, 2012-2013. Actualmente estos datos no se han publicado oficialmente.

La caracterización de los residuos resulta muy importante debido a que con ella se pueden realizar los programas de manejo integral, así como los programas de reciclaje, diseño de plantas de compostaje y el diseño de los rellenos sanitarios, con la caracterización se puede obtener información de si los residuos pueden ser tratados por un proceso anaerobio, donde los residuos sean capaces de generar energía. Las tecnologías existentes para generar energía, requieren de una composición especial para la producción de energía eléctrica (Arvizu Fernández, 2004). El éxito de cualquier esfuerzo de recuperación o reciclaje está directamente relacionado con la determinación exacta de la composición de los residuos sólidos, y la composición de los residuos está muy relacionada con factores sociales (estilos de vida), económicos y demográficos; incluso por las estaciones del año.

La Tabla 2.2 muestra la caracterización química de tres Estados de la República Mexicana, se puede observar que existen variaciones en la mayoría de los parámetros. De las tres entidades, únicamente en el Distrito Federal es obligatorio seguir un programa de separación en fuente de los Residuos Sólidos Urbanos. El programa consiste en hacer la recolección de la fracción inorgánica y orgánica por días. En lo que respecta al Estado de México, los programas de separación son prácticamente inexistentes, hasta el momento sólo el municipio de Tlalnepantla de Baz está implantando un programa piloto de separación de los residuos.

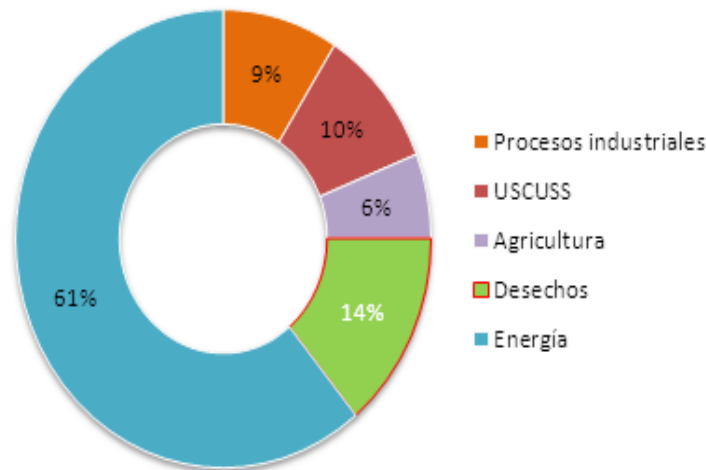
## 2.5 Disposición final y tratamiento de los Residuos Sólidos Urbanos

La disposición final de los RSU se refiere a su vertido permanente en un sitio ya sea controlado o no (Sales Heredia, 2012). Se estima que en México se recolecta solamente 86 % del total de los residuos generados, de los cuales casi 61 % se deposita adecuadamente, es decir, son dispuestos en rellenos sanitarios, 28 % en sitios no controlados o tiraderos a cielo abierto, provocando problemas ambientales y sociales, y sólo 11 % son recuperados (durante la recolección (4 %), en plantas de separación (1.5 %), en tiraderos (1.5 %) y en la industria (4 %)). Un residuo con una mala disposición impactará al suelo, al agua, al aire, a los ecosistemas y a la salud de las personas. (SEMARNAT, 2013).

Los costos de inversión, mantenimiento y operación de un relleno sanitario varían dependiendo del volumen de residuos a disponer, así como por el tipo de infraestructura disponible para su operación y medios de compactación, entre otros factores. Los costos de operación de un relleno sanitario en México, representan aproximadamente el 18 % del costo total del proceso (Organización Panamericana de la Salud, 2002). No obstante del amplio uso de los rellenos sanitarios a nivel mundial, hoy en día países desarrollados como Alemania, Reino Unido y España, entre otros, están optando por otras tecnologías de disposición final para los RSU, tecnologías en las cuales se pueda aprovechar el valor energético de los residuos sólidos urbanos, y que además generarán ahorros en el mantenimiento y operación de las instalaciones dedicadas a su manejo, además de minimizar la emisión de GEI.

México se encuentra dentro de los principales países con mayores emisiones, siendo una de las principales fuentes de emisión los desechos depositados en rellenos sanitarios, con 14 % del total de fuentes de GEI (Figura 2.4). Los desechos o residuos se dividen principalmente en fracción inorgánica y fracción orgánica, los primeros representan el 48 % del total de RSU, y el tratamiento principal que se les da es el reciclaje, que del 2007 al 2009 aumentó un 9.1 % (Martínez Fernández, 2012). En lo que respecta a la fracción orgánica, ésta es equivalente al 52 % del total de RSU, y se espera que en poco tiempo el porcentaje aumente, por lo que es urgente buscar alternativas de aprovechamiento, como la creación de nuevas fuentes de energía renovable que puedan beneficiar al medio ambiente (Shahriari, et al., 2012).





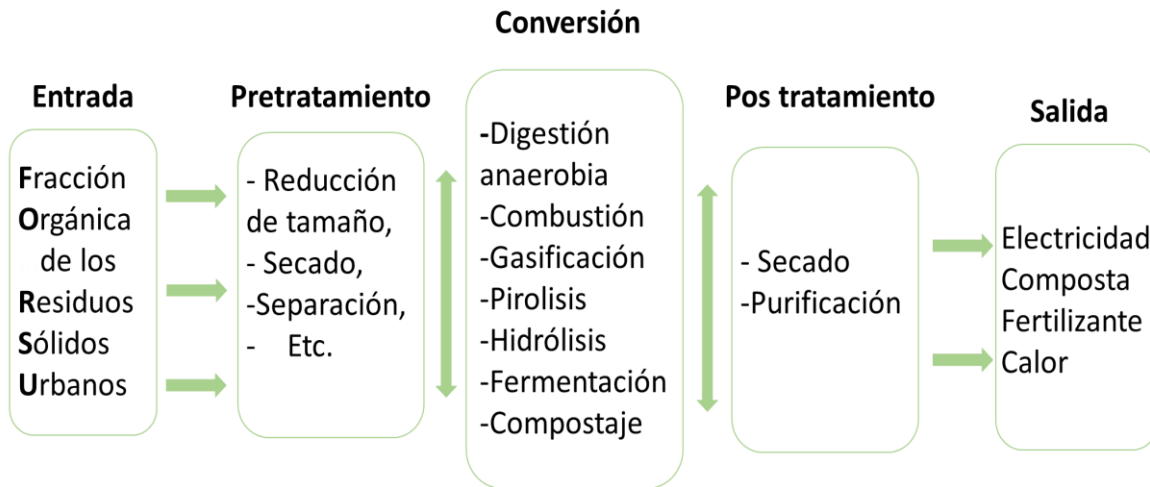
**Figura 2.4** Emisiones generadas por sector

Fuente: INEGI, 2006

Actualmente, México cuenta con el programa Estrategias de Crecimiento Verde, y entre estas estrategias se encuentran el manejo adecuado de los residuos y el uso sustentable de la energía. El manejo de residuos está encaminado a fomentar la recuperación de energía a partir de residuos, es así que la Ley General de Cambio Climático, en su artículo 33 fracción XI estipula el promover el aprovechamiento del potencial energético contenido en los residuos. La misma Ley busca promover y desarrollar acciones para la instalación de infraestructura para minimizar y valorizar los residuos, así como para reducir y evitar las emisiones de metano ( $\text{CH}_4$ ) provenientes de los residuos sólidos urbanos.

Martínez Fernández, 2012, menciona que existe un rango diverso de tecnologías disponibles para mitigar las emisiones provenientes de los residuos; estas tecnologías incluyen la recuperación de metano en rellenos sanitarios, lamentablemente uno de los problemas que presenta esta alternativa es el manejo inadecuado del biogás que se genera en los sitios de disposición final. Otra alternativa de tratamiento de los residuos es el reciclamiento postconsumo. También existen procesos térmicos que incluyen la incineración, la pirólisis, la gasificación, y la cogeneración industrial, y tratamientos mecánicos biológicos como la elaboración de composta y la Digestión Anaerobia.

La Figura 2.5 muestra un panorama general de las distintas tecnologías que ofrecen un aprovechamiento de la FORSU, y de las cuales se puede obtener un beneficio, como lo es la generación de electricidad.



**Figura 2.5** Diagrama de rutas potenciales de aprovechamiento de la FORSU

Fuente: Van Dael, et al., 2013

## 2.6 Costos por tratamiento y disposición de los RSU

Actualmente el costo unitario por la disposición final de los RSU en el Estado de México, varía entre \$ 160 y \$ 250 por tonelada de RSU por día, según datos reportados por la Dirección General de Servicios Urbanos (Tabla 2.3).

**Tabla 2.3** Costo por tonelada de RSU para su disposición final

<b>Sitios en Estado de México</b>	P.U. Granel	\$ 160.00 más I.V.A.
		\$ 250.00 más I.V.A.
	P.U. Compactados	\$ 145.00 más I.V.A.
<b>Sitio Estado de Morelos Cuautla</b>	P.U. Granel	\$140.00 más I.V.A.

Fuente: Información obtenida Dirección General de Servicios Urbanos, 2013

En 2007 Iglesias Piña reportó que en México los servicios de aseo urbano no son autofinanciables, es por esto que en muchas ocasiones los vehículos de recolección tienen que prolongar su vida útil, provocándoles un desgaste total, y es así como se recurre a empresas de prestación de servicios de recolección. También debido a la falta de sitios de disposición final o de rellenos sanitarios cercanos al lugar de generación, los costos de transporte han aumentado considerablemente.

El Estado de México reporta un gasto anual de \$ 20,620,000 por el transporte de los residuos. En la Tabla 2.4 se muestran los costos que el gobierno en el 2007 debió de pagar por la gestión de sus residuos.

**Tabla 2.4** Costo del manejo de los RSU en América Latina

Actividad	% Respecto al Total	Valor Aproximado en US \$ / ton
Recolección	43 - 50 %	30 - 80
Transferencia	10 - 25 %	10 - 20
Disposición final	10 - 20 %	10 - 20
Total (sin barrido)	100 %	70 - 150

Fuente: Iglesias Piña, 2007

Con estos datos el economista Iglesias Piña menciona que es absurdo pagar un alto precio por el tratamiento de los residuos, pues se generan problemas irreversibles como el destino de recursos monetarios que no tiene tasa de retorno alguno, a lo que le denominó “dinero basura”. Así pues la falta de financiamiento en el servicio de limpia, se debe a la falta de recuperación de los costos de inversión y de operación, esto según el autor.

## 2.7 Aprovechamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos

Pese a la gran cantidad de la Fracción Orgánica de los RSU generada en México, el aprovechamiento es nulo, y en el mejor de los casos la FORSU es dispuesta en rellenos sanitarios, donde se producen y emiten gases efecto invernadero (GEI) (Flores, 2001).

Un mínimo porcentaje de la FORSU es empleada para la alimentación de cerdos, pero sin tener un debido control y procesamiento sanitario, y sólo el 2 % recibe un tratamiento aerobio adecuado para su aprovechamiento.

En el tratamiento aerobio los residuos orgánicos son sometidos a una aireación prolongada. El proceso involucra la oxidación directa de la materia orgánica biodegradable y la autooxidación de la materia celular. Aunque pareciera ser una opción viable para el tratamiento de los residuos orgánicos, no todos los residuos son aptos para este proceso.

En cuanto al tratamiento biológico anaerobio, se dedicará el siguiente apartado para explicar el proceso de la Digestión Anaerobia.

## 2.8 Digestión Anaerobia

A finales del siglo XIX la Digestión Anaerobia fue aplicada al tratamiento de aguas residuales y tiempo después al tratamiento de los residuos sólidos. La Digestión Anaerobia es un proceso complejo debido a sus condiciones de alimentación y parámetros operacionales, aun así es considerado un proceso rentable, debido a la alta recuperación de energía y sobre todo por su limitado impacto ambiental (Campos, et al., 2012).

### 2.8.1 Descripción del proceso de Digestión Anaerobia

La Digestión Anaerobia es un proceso que se realiza en ausencia de oxígeno, y en el cual prácticamente cualquier residuo orgánico puede ser biológicamente degradado. En la degradación intervienen diversas poblaciones de microorganismos, que llevan a cabo las reacciones bioquímicas, que en la mayoría de las ocasiones ocurren de forma simultánea (Monnet, 2003), (Ortega, 2006).

Como producto de la degradación de la materia orgánica, se obtiene una mezcla de gases o biogás, constituido principalmente por metano ( $\text{CH}_4 = 55-70 \%$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2 = 30-45 \%$ ). La composición del biogás está directamente relacionada con la composición del material de entrada o sustrato de alimentación al digester anaerobio (Tabla 2.5) (Deublein & Steinhauser, 2008).

El biogás producido en la DA podrá ser empleado en la generación de calor, para la cogeneración de electricidad, o para la generación de gas natural, también podrá ser empleado como un combustible de calidad, trayendo beneficios ambientales y socioeconómicos (Reith, et al., 2003).

El potencial de metano es uno de los criterios más importantes en la evaluación de las diferentes tecnologías de DA.

**Tabla 2.5** Características generales del biogás

Propiedad	Composición
Composición	55-70 % CH <sub>4</sub> , 30-45 % CO <sub>2</sub>
Contenido energético	6.0 – 6.5 kWh/m <sup>3</sup>
Equivalente de combustible	0.60 – 0.65 L petróleo / m <sup>3</sup> biogás
Límite de explosión	6 – 12 % de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 – 750 °C (con el contenido de CH <sub>4</sub> mencionado)
Presión crítica	74 – 88 atm
Temperatura crítica	-82.5 °C
Densidad normal	1.2 kg/m <sup>3</sup>
Masa molar	16.043 kg/kmol

Fuente: Deublein & Steinhauser, 2008

Además del biogás producido, se obtiene un lodo digerido, que con el debido tratamiento puede ser empleado como fertilizante y del cual se puede conseguir un valor agregado al ser empleado como mejorador de suelos o bien como fertilizante orgánico en la agricultura, ya que contiene una elevada cantidad de nitrógeno en forma de amonio, que lo hace valioso en los cultivos agropecuarios (FNR, 2010).

Con la DA se puede tratar una gran cantidad de diversos residuos orgánicos, entre los cuales están los restos de vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria, y la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos, este último residuo es un sustrato muy complejo y por lo tanto requiere de una ruta metabólica compleja, para llevar a cabo la degradación de los residuos (Durán Moreno, et al., 2014).

### 2.8.2 Etapas de la Digestión Anaerobia

La Digestión Anaerobia se lleva a cabo en cuatro etapas principales: la hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, y los microorganismos que participan en cada una de las etapas son los siguientes: hidrolíticos, acidogénicos, acetogénicos y metanogénicos. En la Figura 2.6 se muestra el proceso de degradación y los productos principales de cada etapa.

**Hidrólisis:** Consiste en el rompimiento o degradación de sustratos orgánicos complejos como las proteínas, los carbohidratos y los lípidos, que pasan a ser compuestos de cadena

corta. El proceso es llevado a cabo por la acción de enzimas extracelulares producidas por los microorganismos hidrolíticos.

La hidrólisis dependerá de la temperatura del proceso, del tiempo de retención hidráulico, de la composición del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), del tamaño de partícula, del pH, de la concentración de  $\text{NH}_4^+$  y de la concentración de los productos de la hidrólisis.

**Acidogénesis:** Durante esta etapa se da el proceso de fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico,  $\text{H}_2$ ) y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso.

- *Fermentación de carbohidratos*

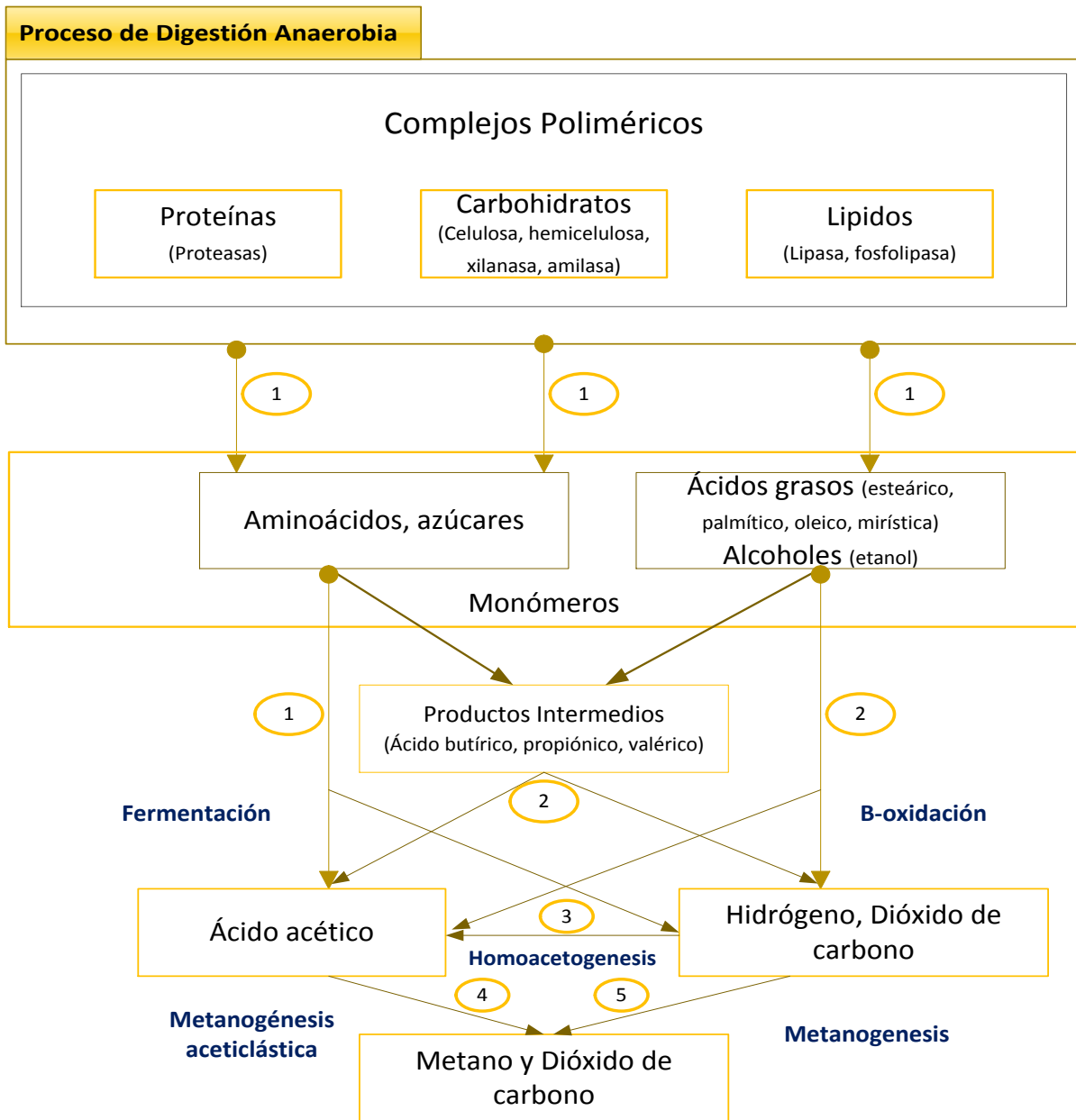
Se realiza por diversos tipos de microorganismos, y en función de éstos, la ruta metabólica y los productos finales serán diferentes.

- *Fermentación de aminoácidos*

Se considera un proceso rápido y que, en general, no limita la velocidad de degradación de compuestos proteicos.

- *Oxidación anaerobia de ácidos grasos de cadena larga*

Los ácidos grasos de cadena larga son oxidados a ácidos grasos de cadena corta por el mecanismo de  $\beta$ -oxidación, este es un ciclo en espiral que va liberando un acetil-CoA en cada bucle, y produce principalmente ácido acético.



**Figura 2.6** Diagrama del proceso de Digestión Anaerobia  
La numeración indican el grupo de bacterias involucradas en cada etapa:

1. Bacterias fermentativas
2. Bacterias acetogénicas, productoras de hidrógeno
3. Bacterias acetogénicas, consumidoras de hidrógeno
4. Arqueas metanogénicas reductoras de dióxido de carbono
5. Arqueas metanogénicas-acetoclásticas

Fuente: Campos, et al., 2012

**Etapa acetogénica:** En esta etapa los ácidos grasos volátiles de bajo peso molecular son convertidos a acetato, hidrógeno gas y dióxido de carbono, por la acción de bacterias acetogénicas.

**Etapa metanogénica:** Se da la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o que contienen dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato,  $H_2/CO_2$ , formato, metanol y algunas milaminas. En esta reacción intervienen microorganismos metanogénicos, de los más estudiados son los géneros *Methanobacterium*, *Methanosarcina*, *Metanosaeta* y *Methanococcus*.

En la Tabla 2.6 se muestran los grupos y tipos de bacterias que intervienen en el proceso de Digestión Anaerobia, y que son responsables de la degradación de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos.

**Tabla 2.6** Bacterias involucradas en las etapas de la Digestión Anaerobia

Proceso de degradación	Grupo de bacterias	Tipo de conversión	Tipo de bacterias
<b>Hidrólisis</b>	Bacterias hidrolíticas	<u>Proteínas</u> a péptidos y aminoácidos solubles.	- <i>Clostridium</i> , <i>Proteus vulgaris</i> , <i>Petococcus</i> , <i>Bacteriodes</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Vibrio</i> .
		<u>Lípidos</u> a ácidos grasos de cadena larga, alcoholes y glicerol.	- <i>Clostridium</i> , <i>Micrococcus</i> , <i>Staphylococcus</i>
		<u>Carbohidratos</u> a azúcares.	- <i>Clostridium</i> , <i>Acetovibrio celluliticus</i> , <i>Staphylococcus</i> , <i>Bacteriodes</i> .
<b>Fermentación</b>	Bacterias acidogénicas	Aminoácidos a ácidos grasos, acetato y $NH_3$	- <i>Lactobacillus</i> , <i>Escherichia</i> , <i>Staphylococcus</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Desulfovibrio</i> , <i>Selenomonas</i> , <i>Sarcina</i> , <i>Veillonella</i> ,



Proceso de degradación	Grupo de bacterias	Tipo de conversión	Tipo de bacterias
		Azúcares a productos intermedios de la fermentación.	<i>Streptococcus</i> , <i>Desulfobacter</i> , <i>Desulforomonas</i> . - <i>Clostridium</i> , <i>Eubacterium limosum</i> , <i>Streptococcus</i> .
<b>Acetogénesis</b>	Bacterias acetogénicas	Ácidos grasos o alcoholes a hidrógenos y acetato. Ácidos grasos volátiles y alcoholes a acetato	- <i>Clostridium</i> , <i>Syntrophomonas wolfeii</i>  - <i>Syntrophomonas wolfeii</i> , <i>Syntrophomonas wolinii</i>
<b>Metanogénesis</b>	Metanógenos dióxido de carbono reductores  Metanogénicas-aceticlásicas	Hidrógeno y dióxido de carbono a metano.  Acetato a metano y dióxido de carbono.	<i>Methanobacterium</i> , <i>Metranobrevibacterium</i> , <i>Methanoplanus</i> , <i>Methanospirillum</i> - <i>Methanosaeta</i> , <i>Methanosarcina</i> .

Fuente: Satoto E., 2009

## 2.9 Factores que influyen en la Digestión Anaerobia

Las bacterias y arqueas metanogénicas se ven afectadas por los cambios de las condiciones ambientales, propiedades fisicoquímicas y lógicamente por factores operacionales. Estas condiciones deben ser monitoreadas y mantenerse en el intervalo óptimo establecido.

Entre los parámetros fisicoquímicos que se consideran en la DA se encuentran el pH, pues los microorganismos no pueden soportar valores extremos de pH, algunos componentes microbianos pueden hidrolizarse o bien las enzimas pueden desnaturalizarse. En los procesos anaerobios, la caída del pH es causada frecuentemente por la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV) y por la excesiva acumulación de CO<sub>2</sub>.

Para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe de ser menor a 6 ni superior a 8. El valor de pH en el digestor no sólo determina la producción de biogás, sino también su composición.

Otro parámetro fisicoquímico importante es el tamaño de partícula del sustrato, entre más pequeña sea la partícula, mayor será el área superficial, y por ende la degradabilidad aumentará, de este modo el rendimiento del biogás será mayor. Es por esto que en muchas ocasiones es necesario que en el proceso de DA se lleve a cabo un pretratamiento de los sustratos; aunado a los beneficios anteriores, los pretratamientos podrán disminuir el tiempo de residencia. Algunos pretratamientos también permiten obtener una mayor calidad higiénica en el lodo digerido reduciendo riesgos para la salud humana o animal (Pascual, et al., 2011). Las tecnologías de pretratamiento se pueden clasificar en mecánicos, térmicos, químicos y biológicos:

- **Pretratamientos mecánicos:** Consisten en reducir el tamaño de partícula, aumentando así la superficie específica del material, de manera que se consiga eventualmente una mayor solubilización de la materia orgánica y una mayor biodisponibilidad. Entre los pretratamientos mecánicos se incluye la maceración, trituración, homogeneización a alta presión, etc. En un reactor mecánico el tipo de pretratamiento dependerá del tipo de sustrato que ingrese.

- **Pretratamientos térmicos:** El objetivo de los pretratamientos térmicos es doble, por una parte facilitar la degradación de algunas macromoléculas al solubilizar la materia orgánica (aumentar la biodisponibilidad) y, por otra parte, dependiendo de la temperatura y el tiempo, ayudan a higienizar la materia orgánica y se reduce o eliminan microorganismos patógenos. Existen diversas tecnologías que se diferencian en la forma de aplicar el calor, como ejemplo están los pasteurizadores y otros métodos incluyen el uso de corrientes de vapor y/o de altas presiones.

- **Pretratamientos químicos:** El objetivo de los tratamientos químicos es romper las macromoléculas poco biodegradables mediante la adición de compuestos químicos tales como ácidos o bases fuertes, o mediante otros métodos como la ozonización. Los pretratamientos químicos también pueden tener otros objetivos, como el ajuste de pH en el caso de sustratos ácidos, o el aumento de la capacidad tampón.

- **Pretratamientos biológicos:** En este tipo de pretratamientos se consigue la degradación de determinados compuestos mediante la inoculación con bacterias específicas o la adición de determinadas enzimas.

Entre los parámetros operacionales más destacados están la temperatura y el tiempo de retención. La temperatura juega un papel muy importante debido a que cada microorganismo posee un intervalo óptimo de crecimiento y reproducción, y los valores mínimos y máximos de temperatura que un microorganismo puede tolerar determinan su supervivencia (Durán Moreno, et al., 2014).

En cuanto el tiempo de retención hidráulico (TRH), es una medida del tiempo promedio que el sustrato reside en el digestor y es igual al volumen del digestor entre el flujo diario de entrada. El TRH típico para el tratamiento de residuos orgánicos es de 10 a 25 días.

## **2.10 Digestores anaerobios**

Hoy en día existe una amplia variedad en cuanto al tipo de digestores anaerobios, para el tratamiento de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos; la selección de estos digestores depende de factores operacionales, así como de la composición de los residuos a tratar.

Los digestores que tratan residuos orgánicos con un porcentaje mayor o igual al 20 % de sólidos totales, se denominan secos, que a su vez pueden ser de una etapa o continuos. Los digestores con un contenido elevado de humedad y con un contenido menor al 15 % de sólidos totales, se denominan digestores húmedos. En la Tabla 2.7, se presentan los distintos tipos de digestores anaerobios y las características principales de cada uno de ellos.

**Tabla 2.7** Digestores Anaerobios

Tipo de Digestión	Características	Ventajas	Desventajas
<p><b>Seca de una etapa (&gt;20 % ST)</b></p>	<p>Estos digestores suelen emplear un sistema en el cual se introduce material de alimentación con un alto contenido de sólidos (20 a 40 % de ST), sin llevar a cabo una dilución previa, (Nizami &amp; Murphy, 2010). En muchos sistemas secos el flujo es de tipo pistón, este enfoque ayuda a mantener un equilibrio de carga orgánica en el interior del digestor mediante la adición de lixiviado parcialmente fermentado en el digestor.</p> <p>Algunas de las tecnologías que toleran un alto contenido en sólidos totales son: Dranco, Kompogas, y Valorga; las tres tecnologías consisten de un reactor de una sola etapa termofílica (mesofílica en algunas plantas de Valorga) con tiempos de retención de entre 14 y 20 días (Themelis, 2002).</p> <p>Los rendimientos obtenidos de biogás a partir de residuos de alimentos, utilizando un sistema seco de una etapa, se encuentran generalmente entre 210 y 300 Nm<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño y operación simple.</li> <li>• Pocos pretratamientos</li> <li>• Mejor tolerancia a las fluctuaciones en la materia prima.</li> <li>• Mejor separación de contaminantes (piedras, vidrio, plástico, metales) en comparación con los sistemas húmedos.</li> <li>• Menor requerimiento energético.</li> <li>• Menor consumo de agua.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No todo el material es digerido.</li> <li>• Manejo de equipo robusto y costoso.</li> </ul>
<p><b>Digestión Húmeda (&lt; 20 % ST)</b></p>	<p>Estos digestores están diseñados para procesar materia orgánica con un contenido de sólidos de entre 10 – 20 % de ST, el sistema puede operar en condiciones termofílicas o mesofílicas, con un TRH de 10 a 20 días.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor rendimiento de metano.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La Digestión Húmeda requiere 10 veces más agua que un sistema seco.</li> </ul>

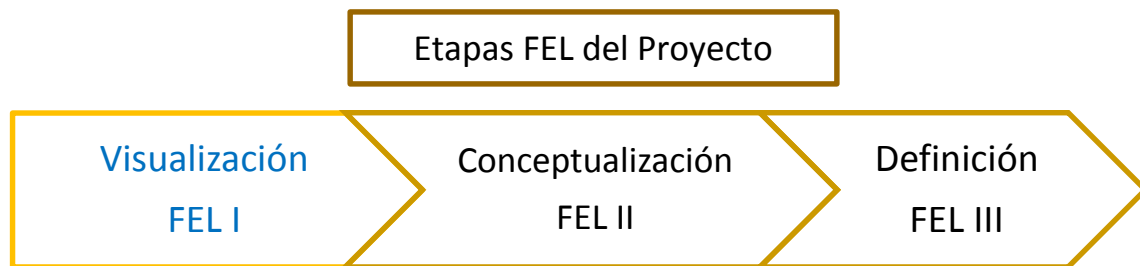
Tipo de Digestión	Características	Ventajas	Desventajas
	<p>Se asume que los sistemas húmedos alcanzan el 80 % de destrucción de sólidos volátiles. Una tonelada de residuos orgánicos produciría 52.2 Nm<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> (Yoshida, et al., 2012).</p> <p>El sistema húmedo requiere de una constante agitación, para llevar a cabo un buen mezclado, por lo cual se emplean distintos tipos de mecanismos, que van desde los agitadores mecánicos, la recirculación de lixiviado, o de gas.</p> <p>Las dos tecnologías más representativas del sistema húmedo son BTA y WELTEC.</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pretratamiento complejo.</li> <li>• Sensible a los cambios de carga.</li> <li>• Alto consumo de energía.</li> </ul>

Fuente: Braber, 1995

## 2.11 Evaluación de proyectos de Digestión Anaerobia

La evaluación tiene por objetivo establecer la viabilidad técnico-económica de ejecutar un proyecto determinado, de acuerdo a la disponibilidad de recursos materiales, y a una serie de estudios técnicos, económicos, de localización, dimensionamiento y de mercado. Cada estudio deberá de estar en concordancia con las siguientes etapas del proyecto: Prefactibilidad, Factibilidad, y Diseño del Proyecto, que con base en la metodología FEL (*Front-end loading*), es la Visualización, la Conceptualización y la Definición del proyecto (Figura 2.7).

El principal desafío de la evaluación y planificación es identificar los datos que tienen sentido y aportan información, para asegurarse de que el análisis se realice con la mejor información disponible.



**Figura 2.7** Metodología FEL

La metodología FEL permitirá realizar una mejor planeación de las actividades, incluyendo el diseño, construcción y operación del proyecto. Llevar a cabo una buena planeación proporcionará beneficios a la empresa o grupo de trabajo, pues disminuirá esfuerzos y en consecuencia disminuirá pérdidas de tiempo y de recursos monetarios. En la Tabla 2.8 se presentan las principales actividades de cada etapa de la metodología FEL.

Para fines de este trabajo la metodología propuesta estará enfocada en la Visualización o FEL I del proyecto, los principales estudios que se realizan en esta etapa son el técnico, el económico y de mercado, aunque también se puede completar la evaluación con estudios de aspectos legales, ambientales y sociales, todo esto determinará que un proyecto sea considerado viable y sustentable.

**Tabla 2.8** Etapas de la metodología FEL

Etapa	Principales Actividades
FEL I	Definir objetivos del proyecto Generar y analizar alternativas tecnológicas Generar y analizar alternativas del sitio del proyecto
FEL II	Evaluar y seleccionar tecnologías Seleccionar y/o proponer el sitio Definir el alcance definitivo del proyecto Desarrollar paquete de ingeniería básica
FEL III	Actualizar objetivos y prioridades del proyecto y su alineación con el plan de negocios Detallar el alcance definitivo del proyecto Detallar plan para el desarrollo de la fase de ejecución del proyecto Acreditar la etapa FEL I

### 2.12 Evaluación de alternativas tecnológicas

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), menciona que en México se ha luchado por introducir tecnologías novedosas para el tratamiento de los residuos, pero desafortunadamente no se han sabido implantar, una de las razones puede ser la falta de herramientas en la evaluación de proyectos.

Para llevar a cabo un proyecto lo primero a realizar es la identificación de un problema de índole social, que más allá de verlo como una situación negativa, es un área de oportunidad de mejora. En el planteamiento del problema, se establecen las causas que lo originan y los efectos que tiene la falta de solución. Así pues la solución requerirá de la identificación y evaluación de alternativas tecnológicas, para la cual actualmente existen diferentes metodologías y criterios para su valoración. Uno de los objetivos de la evaluación es fundamentar la toma de decisiones para poder seleccionar aquella o aquellas que mejor se adapten a las necesidades del proyecto, exponiendo de manera sistemática sus características de relevancia, mediante el uso de criterios (Musango & Brent, 2011).

Los criterios podrán estar divididos en: criterios técnicos, económicos, ambientales y sociales.

**Criterios técnicos:** Cualquier proyecto tendiente a mejorar el proceso de DA, aumentando la capacidad de residuos a tratar y con ello la generación de biogás, tendrá que poner particular atención en los criterios técnicos. En este tipo de criterios se evalúa básicamente la experiencia de las diferentes empresas, su capacidad organizacional, el tipo y alcance de la tecnología, entre otros.

**Criterios económicos:** Cuando se trata de tomar una decisión, para llevar a cabo un proyecto de DA, se tendrán que considerar varios costos asociados.

**Criterios ambientales:** Una parte fundamental en la evaluación de proyectos son los criterios ambientales, es preciso identificar antes de la posible construcción, los impactos que la tecnología causará en el medio.

**Criterios sociales:** Los criterios sociales tienen como objetivo evaluar si el proyecto apoyará o beneficiará a la población, la mayoría de los aspectos sociales son medidos de manera cualitativa.

Para comparar las diversas alternativas con base en los criterios antes mencionados, existen modelos de análisis multicriterios.

### 2.12.1 Modelos de análisis multicriterio

El análisis multicriterio es una herramienta que se emplea como apoyo en la toma de decisiones de problemas complejos, con una diversidad de criterios a evaluar, y con diferentes escenarios o alternativas.

Existe una variedad de modelos multicriterio, entre los cuales están: el método de suma ponderada o WSM por sus siglas en inglés (Weighted Sum Method), método del producto ponderado (WPM), el proceso de jerarquía analítica (AHP), el método de eliminación y selección traduciendo la realidad (ELECTRE por sus siglas en francés de *ELimination Et Choix Traduisant la REalité*), la teoría de la utilidad multiatributo (TUMA), y la preferencia de método de organización de clasificación para la evaluación de enriquecimiento (PROMETHEE) (Rao & Baral, 2011). Dichos métodos han demostrado ser capaces de arrojar resultados confiables.

Actualmente existen varios ejemplos del tratamiento de los Residuos Sólidos Urbanos, en los cuales se aplica el análisis multicriterio o MADM, especialmente empleando los métodos



ELECTRE III y PROMETHEE (Herva & Roca, 2013). En 2009, Madlener et al. publicaron un artículo sobre la evaluación de 41 plantas generadoras de biogás en Australia, empleando la herramienta de evaluación multicriterio ELECTRE, método desarrollado por Bernard Roy y colaboradores. En el trabajo los criterios evaluados fueron: (1) suministro de sustrato y pre-tratamiento, (2) producción de biogás (por medio de la Digestión Anaerobia), (3) uso neto de energía, (4) manipulación y disposición del fertilizante, y (5) las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) (Madlener, et al., 2009).

En 2009 Karagiannidis y Perkoulidis, realizaron una evaluación multicriterio de las tecnologías Waasa, Valorga, Dranco, Kompogas y BTA, evaluando cuatro criterios (1) emisiones de GEI, (2) energía recuperada, (3) material -fertilizante- recuperado, y (4) costos de operación; empleando como herramienta de toma de decisiones el programa ELECTRE. En el trabajo mencionado el proceso Dranco ocupó la mejor posición, seguido de la tecnología Valorga y Waasa, y en las últimas posiciones estuvieron las tecnologías Kompogas y BTA, esta última se vio fuertemente afectada por los altos costos que parecen ser una limitante en la evaluación (Karagiannidis & Perkoulidis, 2009).

Otro método ampliamente usado y que puede procesar un conjunto finito de alternativas, se es el método PROMETHEE, su software es de aplicación simple y ofrece excelentes resultados en comparación con otros métodos multicriterio. El número de publicaciones que emplean este método ha ido en aumento (Tabla 2.9). En 2010, Behzadian y colaboradores reportaron un total de 217 artículos publicados en 100 revistas especializadas desde 1985.

### **2.12.2 Método PROMETHEE**

El método PROMETHEE ha sido empleado en diversas áreas y se ha calificado como un programa útil en la evaluación de alternativas. Por lo anterior, en el presente trabajo se ha seleccionado esta herramienta para realizar la evaluación de ocho alternativas tecnológicas para el tratamiento biológico de los RSU vía Digestión Anaerobia. La ventaja de PROMETHEE es que puede evaluar criterios cuantitativos y cualitativos (una escala cualitativa puede definirse con un número de niveles ordenados, tales como muy malo, malo, medio, bueno o muy bueno) (Visual PROMETHEE, 2013).

**Tabla 2.9** Referencias PROMETHEE

Área de aplicación	Tema
<b>Hidrología</b>	Metodología PROMETHEE para evaluar una ecotecnología, en un estudio de caso en la cuenca del embalse de Shihmen, Taiwan, (Chou, Lin, & Lin, 2007).
<b>Medio ambiente</b>	Clasificación y selección de proyectos ambientales
<b>Negocios y finanzas</b>	Evaluación de la viabilidad de las empresas sobre la base de los criterios financieros
<b>Manufactura y ensamble</b>	Análisis multicriterio en la evaluación de la tecnología de fabricación avanzada.
<b>Química</b>	Selección de la mejor alternativa para la mejora de la seguridad y la fiabilidad de procesos
<b>Energía</b>	Clasificación de energía renovables
<b>Energía</b>	Selección de una alternativa de generación eléctrica sustentable
<b>Energía</b>	Evaluación de seis escenarios energéticos renovables
<b>Social</b>	Clasificación de los grados de especialización en servicios hospitalarios
<b>Otras áreas (Gobierno)</b>	Formulación de estrategias nacionales de tecnología de la información

Fuente: Elaboración propia

PROMETHEE expresa la formulación de un problema multicriterio de la siguiente manera:

$$\max \{g_1(a), g_2(a), \dots, g_j(a), \dots, g_k(a) \mid a \in A\}$$

Donde **A** es un conjunto finito de posibles alternativas  $\{a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n\}$  y  $\{g_1(\cdot), g_2(\cdot), \dots, g_j(\cdot), \dots, g_k(\cdot)\}$  corresponde al conjunto de criterios de evaluación. En la Tabla 2.10, se presentan los datos de un problema multicriterio.

**Tabla 2.10** Matriz de alternativas-criterios

		Criterios					
		$g_1(\cdot)$	$g_2(\cdot)$	...	$g_j(\cdot)$	...	$g_k(\cdot)$
Alternativas	$a_1$	$g_1(a_1)$	$g_2(a_1)$	...	$g_j(a_1)$	...	$g_k(a_1)$
	$a_2$	$g_1(a_2)$	$g_2(a_2)$	...	$g_j(a_2)$	...	$g_k(a_2)$
	...	...	...	...	...	...	...
	$a_i$	$g_1(a_i)$	$g_2(a_i)$	...	$g_j(a_i)$	...	$g_k(a_i)$
	...	...	...	...	...	...	...
	$a_n$	$g_1(a_n)$	$g_2(a_n)$	...	$g_j(a_n)$	...	$g_k(a_n)$

$g_k(a_n)$  = evaluación de la alternativa n con respecto al criterio k

La relación de dominancia natural asociado al problema de la Tabla 2.10 se define de la siguiente manera:

Para  $(a,b) \in A$ :

$$\begin{cases} \forall_j: g_j(a) \geq g_j(b) \\ \exists_k: g_k(a) > g_k(b) \end{cases} \leftrightarrow aPb,$$

$$\forall_j: g_j(a) = g_j(b) \leftrightarrow aIb,$$

$$\begin{cases} \exists_s: g_s(a) > g_s(b) \\ \exists_r: g_r(a) < g_r(b) \end{cases} \leftrightarrow aRb,$$

Donde P, I y R representan la *Preferencia*, *Indiferencia* y la *Incomparabilidad*. Una alternativa es mejor que otra si tiene criterios buenos sobre las otras alternativas. Y si una alternativa es mejor en un criterio  $s$  y mientras que la otra alternativa tiene mejor un criterio  $r$ , entonces es imposible decidir qué alternativa es la mejor, por lo tanto ambas alternativas son incomparables. El propósito de un análisis multicriterio es reducir al máximo el número de incomparabilidades.

En todas las herramientas de análisis multicriterio, se identifican cuatro etapas principales: identificación y definición de los criterios, asignación de los pesos a los criterios, evaluación y suma total (Wang, et al., 2009)

### 2.12.3 Identificación y definición de los criterios

Los criterios son los medios por los que las distintas alternativas de solución se comparan entre sí. Primero que nada se debe de identificar y definir el conjunto de criterios de evaluación para cada una de las etapas de toma de decisiones, pues los criterios permitirán sopesar si las tecnologías que se analizan reúnen las características requeridas, en este caso para el tratamiento de los residuos sólidos urbanos. El análisis estará apoyado en el software Visual PROMETHEE, que actualmente es la versión más completa en el método multicriterio.

#### 2.12.3.1 Asignación de los pesos a los criterios

En la evaluación de tecnologías se expondrán criterios múltiples y en ciertas ocasiones contradictorios, como la madurez de la tecnología, la calidad del producto, el rendimiento del producto principal, el costo de operación, los subproductos, etc. (Khelifi, et al., 2006).

Cabe destacar que la relación entre criterios estará dada con la importancia relativa o peso ( $w_j$ ) de cada uno de ellos, el  $w_j$  de cada criterio deberá ser positivo e independiente de la unidad de medición de los criterios.

$$W = \{w_j\} \quad \forall j = 1, 2, 3, \dots, k \quad \sum_{j=1}^k w_j = 1$$

Los criterios podrán ser evaluados de manera cualitativa o cuantitativa, esta última tendrá como referencia una escala denominada de 5-puntos (1.-Muy malo, 2.-Malo, 3.-Promedio, 4.-Bueno y 5.-Muy bueno), en cuanto a los aspectos cuantitativos Visual PROMETHEE acepta datos puntuales y porcentuales. Pérez Valle, 2013, menciona que es importante que se califiquen exactamente los mismos criterios a todas las alternativas del proyecto, y en caso de que no se tenga la información de algún criterio para alguno de los escenarios, entonces este criterio no deberá ser tomado en cuenta para la evaluación y se calificará como N/A (No Aplica).

### 2.12.3.2 Criterios generalizados

Una de las etapas más importantes en la aplicación del programa PROMETHEE es la de Enriquecimiento de la Estructura de Preferencias. Para lograr tal enriquecimiento, a cada criterio inicial  $g_j$ , ( $j=1, \dots, n$ ) se le asocia una función de preferencia,  $g_j \rightarrow P_j$ , lo cual se define como *criterio generalizado*. Para cada par de alternativas (a,b) del conjunto A de alternativas factibles, y para cada criterio  $g_j$ , el número real  $P_j(a, b)$  indica el grado de preferencia de “a respecto de b”. La función de preferencia  $P_j(a, b)$  toma valores de entre 0 y 1, es decir  $0 \leq P_j(a, b) \leq 1$  y se define de forma tal que para cada criterio  $g_j$  se cumplen las siguientes relaciones:

$g_j(a) \leq g_j(b)$	$(d_j(a, b) \leq 0)$	$\Rightarrow P_j(a, b) = 0$	Preferencia o Indiferencia
$g_j(a) > g_j(b)$	$(d_j(a, b) > 0)$	$\Rightarrow P_j(a, b) \approx 0$	Preferencia Débil
$g_j(a) \gg g_j(b)$	$(d_j(a, b) \gg 0)$	$\Rightarrow P_j(a, b) \approx 1$	Preferencia Fuerte
$g_j(a) \gg\gg g_j(b)$	$(d_j(a, b) \gg\gg 0)$	$\Rightarrow P_j(a, b) = 1$	Preferencia Estricta

Más allá de la modelación de cada criterio generalizado, existe una estructura de preferencia, que se utiliza dentro del proceso de decisión, en la etapa de Modelación de las Preferencias (Fernández Barberis & Escribano Ródenas , 2006).

Una vez obtenidos los criterios ( $g_j$ ) y teniendo las alternativas ( $a_i$ ), se procede a la evaluación  $g_j(a_i)$ , estableciendo una matriz. Las evaluaciones se pueden obtener mediante la realización de diversos estudios, como encuestas, opinión de expertos, simulaciones, por mencionar algunos ejemplos.

Respecto a la jerarquía de criterios, en Visual PROMETHEE se tienen tres niveles, para este trabajo el primer nivel corresponde a los criterios individuales, el nivel intermedio incluye los grupos de criterios, cada criterio pertenece a un grupo de criterios, y en el tercer nivel se encuentran las tecnologías a evaluar.

## 2.13 Viabilidad económica de proyectos de Digestión Anaerobia

La viabilidad económica de una planta que requiere una alta inversión de capital, juega un papel muy importante en la evaluación de proyectos (Yang, et al., 2012).

Entre los principales criterios económicos a evaluar en un proyecto de Digestión Anaerobia están el Valor Presente de los Costos (VPC), Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR), y el Costo Anual Equivalente (CAE).

### 2.13.1 Valor Presente de Costos (VPC)

El valor presente de costos, permite comparar alternativas de igual vida útil. Se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula.

$$VPC = I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (2.1)$$

Donde:

$I_0$ : Inversión Inicial

$C_t$ : Costos incurridos durante el periodo t

n: Horizonte de evaluación

r: Tasa social de descuento

El criterio de decisión al utilizar el VPC es que la alternativa de solución que presente menor valor presente de costos, será la alternativa más conveniente desde el punto de vista técnico económico.

### 2.13.2 Valor Presente Neto (VPN)

El Valor Presente Neto, significa traer del futuro al presente cantidades monetarias a su valor equivalente, y se expresa con la siguiente ecuación (Baca Urbina, 2007).

$$VPN = -P + \frac{FNE_1}{(1+i)^1} + \frac{FNE_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{FNE_n}{(1+i)^n} \quad (2.2)$$

Donde:

$FNE_n$  = Flujo neto de efectivo del año  $n$ , que corresponde a la ganancia neta después de impuestos en el año  $n$ .

$P$  = Inversión inicial en el año cero

$i$  = Tasa de referencia que corresponde a la tasa mínima aceptable de rendimiento.

Si  $VPN \geq 0$  acéptese la inversión

$VPN < 0$  rechácese la inversión

$VPN = 0$  La inversión no producirá ni ganancias ni pérdidas.

### 2.13.3 Tasa Interna de Retorno (TIR)

La TIR indica la rentabilidad de realizar un proyecto y a su vez es la tasa de descuento que hace que el VPN sea igual a cero. La TIR por ser una tasa, no se puede utilizar como criterio de comparación entre proyectos y deber ser siempre acompañada por el VPN.

$$VPN = 0 = \sum_{t=0}^{t=n} \frac{FNE_t}{(1 + TIR)^t} \quad (2.3)$$

La regla de decisión para este indicador, es aceptar los proyectos cuya TIR sea igual o mayor a la tasa de descuento. La TIR sólo es útil cuando los proyectos se comportan normalmente, es decir, cuando los primeros flujos son negativos y los siguientes son positivos.

La localización óptima de un proyecto contribuye en mayor medida a que se logre la mayor tasa de rentabilidad sobre el capital (criterio privado) u obtener el costo unitario (criterio social) (Baca Urbina, 2007).

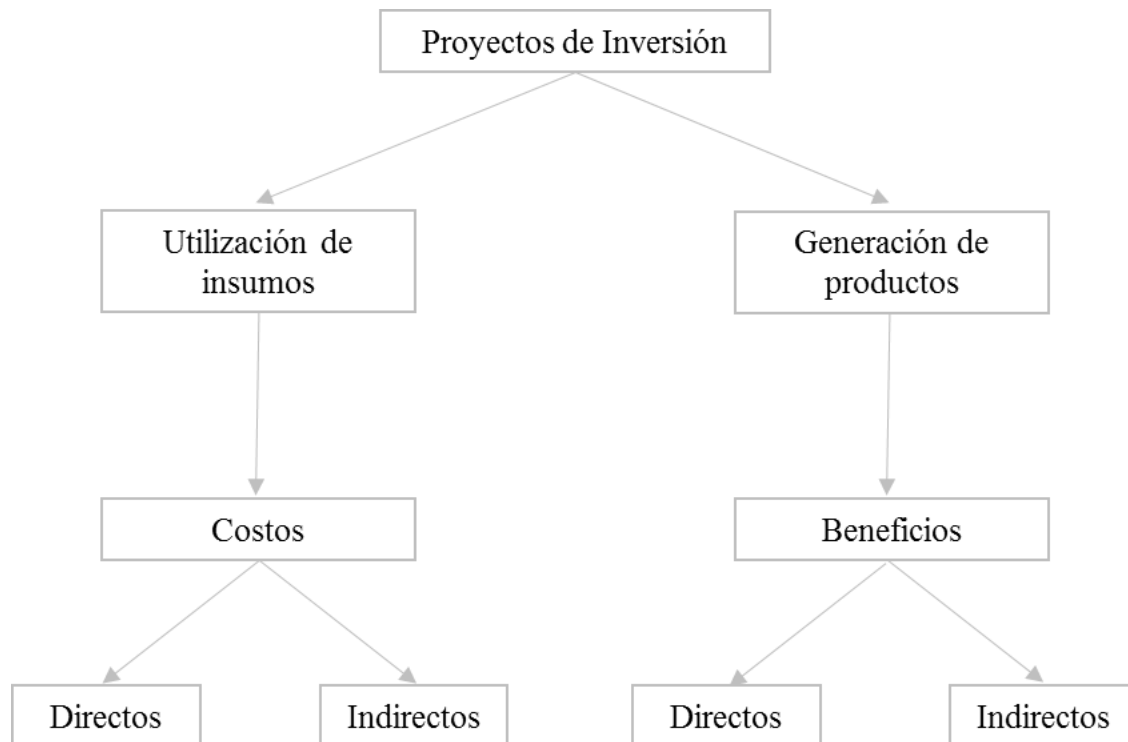
### 2.13.4 Costo Anual Equivalente (CAE)

Con el VPN se puede obtener el CAE. Para proyectos en donde no existen ingresos en el análisis, se recurre al costo anual uniforme equivalente, que es un indicador utilizado en la

evaluación de proyectos de inversión y corresponden a todos los ingresos y desembolsos convertidos en una cantidad anual uniforme equivalente que es la misma cada período.

$$CAE = \frac{VPN * i}{1 - (1 + i)^{-n}} \quad (2.4)$$

En la Figura 2.8 se muestra el diagrama general de los proyectos de inversión. En una evaluación social se identifican los costos y beneficios del proyecto, y ambos se subdividen en directos e indirectos.



**Figura 2.8** Diagrama general de proyectos de inversión



Categoría de Costos:

- Cálculo de la inversión (estudios y diseños, terrenos, obras, equipo, imprevistos)
- Operación (sueldos, servicios básicos, materiales e insumos, combustible)
- Mantenimiento (mantenimiento de equipos, reparaciones periódicas)

Beneficios:

- Ingresos monetarios
- Ahorro de costos
- Otros (impacto ambiental positivo, mejor imagen)

### **3. METODOLOGÍA**

#### **3.1 Propuesta metodológica para la toma de decisiones en proyectos de Digestión Anaerobia**

Para determinar la viabilidad de un proyecto se aplica una metodología de evaluación. Con base en los fundamentos teóricos vistos en el capítulo anterior, se propuso una metodología como apoyo en la toma de decisiones, para llevar a cabo proyectos de Digestión Anaerobia.

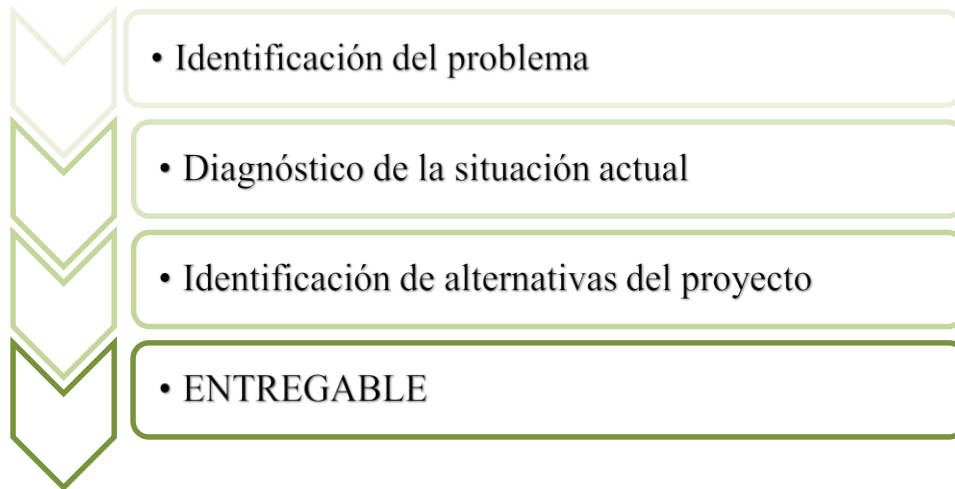
Cabe destacar que la metodología propuesta, estuvo dirigida a la etapa inicial del desarrollo de proyectos de DA, es decir a la etapa de Visualización de un proyecto. La etapa de Visualización define a groso modo la rentabilidad económica del proyecto, y esta incluye una evaluación preliminar de los costos y beneficios que aportará el proyecto de Digestión Anaerobia.

La metodología fue dividida en dos partes, la primera se refirió a la “Descripción del caso de estudio” y la segunda fue la “Evaluación económica del proyecto” o “caso de negocio”.

Al término de cada etapa de la metodología hubo elementos denominados Entregables, que sirvieron como base para sustentar la definición del proyecto, y para la toma de decisiones respecto a la continuidad, cancelación o reevaluación del proyecto de Digestión Anaerobia. Es preciso mencionar que para este trabajo, el entregable se representa como la aplicación de la metodología y la discusión de resultados de la misma.

#### **3.2 Primera parte: Descripción del caso de estudio**

El objetivo de esta primera parte fue recabar toda la información posible que permitiera justificar la ejecución del proyecto de DA. Los principales puntos considerados en esta etapa se muestran en la Figura 3.1:



**Figura 3.1** Propuesta Metodológica para la evaluación de proyectos de DA

### 3.2.1 Identificación del problema

El propósito de la identificación es definir claramente el problema que se intenta resolver en una determinada localidad, así como determinar el objetivo principal del proyecto. Con la identificación del problema se justifican las razones por las cuales es necesaria la ejecución del proyecto de Digestión Anaerobia.

Para el planteamiento se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- Volumen y caracterización de los residuos
- Infraestructura del manejo y disposición final de los residuos
- Idoneidad de la gestión de los residuos
- Sistema de recolección

### 3.2.2 Diagnóstico de la situación actual

Es importante conocer la situación actual de la gestión integral de RSU, para dar una mayor especificidad y definición al problema que se pretende resolver. Como parte del diagnóstico se definió el área de estudio, es decir el lugar donde se focaliza el problema.

En este diagnóstico se recomendó hacer una caracterización de la zona de estudio, en la que se describió lo siguiente:

- Extensión territorial (km<sup>2</sup>)
- Ubicación geográfica
  - Colindancia
  - Coordenadas
- Edafología
  - Suelo dominante
- Uso del suelo
- Condiciones meteorológicas
- División del municipio
- Proyección demográfica
- Proyección de la generación de RSU
- Tratamiento y disposición actual de los RSU
  - Sistema de recolección

La Tabla 3.1 muestra los datos recopilados para realizar la proyección de la generación de RSU, y con ellos se estimó la demanda y la oferta actual que tiene el municipio para tratar y/o disponer a sus RSU.

Para la proyección de los residuos se empleó la siguiente fórmula.

$$Res_F = Res_A(1 + r)^n \quad (3.1)$$

Donde:

Res<sub>F</sub> = Residuos futuros

Res<sub>A</sub> = Residuos actuales

r = Tasa de crecimiento (se supone una r de generación anual de RSU de 1.5 %)

n = Años de proyección.

Para la descripción se recurrió a ilustraciones y mapas, donde se visualiza el sitio afectado.

**Tabla 3.1** Situación Actual de la Generación de RSU del Municipio

Municipio (s)	Composición de RSU	Generación de RSU	Generación diaria	Generación per cápita

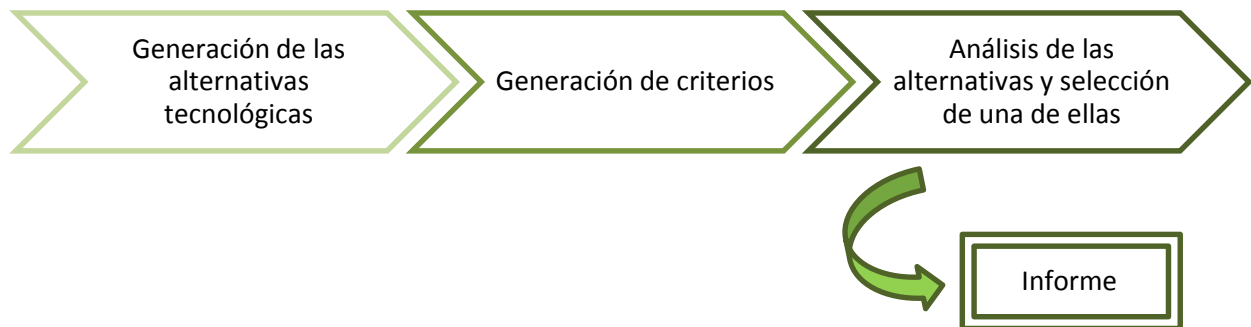
En caso de haberse tratado de un proyecto intermunicipal, se habría tenido que recopilar la información de todos los municipios involucrados en el proyecto.

### 3.2.3 Identificación de alternativas de solución

En este punto de la metodología se identifican las alternativas tecnológicas y de sitio para llevar a cabo el proyecto, estimando sus costos y beneficios aproximados.

#### 3.2.3.1 Selección de alternativas tecnológicas

En los proyectos de ingeniería es necesario hacer una selección de alternativas tecnológicas que darán solución al problema planteado. En la Figura 3.2, se muestran los pasos que se siguieron para la evaluación de las alternativas.



**Figura 3.2** Selección de tecnologías de Digestión Anaerobia

## Generación de las alternativas tecnológicas

La evaluación de alternativas involucró la generación de una lista amplia de opciones tecnológicas de Digestión Anaerobia, para este trabajo se seleccionaron ocho tecnologías, que posteriormente se sometieron a una evaluación basada en criterios técnicos, económicos, ambientales y sociales.

## Generación de criterios

Una vez que se realizó la identificación de tecnologías de Digestión Anaerobia, para el tratamiento de la FORSU, éstas se evaluaron con una matriz multicriterio, con la finalidad de obtener aquella o aquellas que mejor se adaptaran a las necesidades del proyecto, para esto fue necesario proponer los criterios de evaluación de las distintas alternativas tecnológicas.

## Análisis de las alternativas y selección de una de ellas

### Evaluación preliminar de las tecnologías de DA

Se realizó una evaluación preliminar de las tecnologías de DA, lo que significó un ahorro de tiempo en el proceso de evaluación. Esta evaluación fue un filtro, donde únicamente aquellas tecnologías que cumplieron con los criterios mínimos planteados por el evaluador, fueron las tecnologías que continuaron con el proceso de evaluación. La Tabla 3.2, muestra los criterios mínimos considerados en la evaluación preliminar, se descartaron definitivamente del proyecto aquellas que no cumplieron positivamente con la mayoría de los criterios.

**Tabla 3.2** Criterios para la evaluación preliminar

Aspectos	Decisión Sí / No
Experiencia en el tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos	
Información en el proceso de operación de la tecnología	
Experiencia internacional de la tecnología	
Cumplimiento con criterios normativos	
Flexibilidad de la tecnología	

### **3.2.4 Criterios de Evaluación de tecnologías de Digestión Anaerobia**

Las tecnologías que pasaron el filtro fueron evaluadas por un grupo de expertos en el tema de residuos, conformado por el Maestro Constantino Gutiérrez Palacios de la Universidad Nacional Autónoma de México, la Doctora Sylvie Jeanne Turpin Marion y la Doctora Alethia Vázquez Morillas, ambas de la Universidad Autónoma de México. Este grupo de expertos calificó de manera objetiva los criterios técnicos, económicos, ambientales y sociales. No existe un número establecido para formar un grupo de expertos, pero se recomienda que se invite a que participe al menos un experto por área. Lo ideal y altamente recomendable es realizar reuniones del grupo de expertos, para que estos obtengan resultados en consenso. Lamentablemente no fue posible hacerlo en el presente caso.

Cabe destacar que los criterios evaluados, pueden ser diferentes en todos los proyectos de DA, pero esto dependerá del planeador y de las necesidades del proyecto.

En la Tabla 3.3 se muestran los criterios típicos propuestos a ser evaluados en un proyecto de Digestión Anaerobia, para esta tesis se hizo una selección de criterios, que fueron considerados por el evaluador de proyectos como los más destacados.

**Tabla 3.3** Criterios para la evaluación de proyectos de DA

<b>Criterio</b>	<b>Subcriterio</b>	<b>Descripción</b>	<b>Bibliografía</b>
<b>Técnico</b>	Conocimiento de la Tecnología	Se refiere a la información que se tiene de la tecnología a evaluar.	Doukas, et al., 2007
	Eficiencia	Expresa la capacidad de la tecnología para degradar a la FORSU y obtener de ello el máximo producto principal que es el biogás.  La eficiencia puede variar ampliamente entre una tecnología y otra.	Dinca, et al., 2007 Doukas, et al., 2007 Begic & Afgan, 2007 Wang, et al., 2008 Chatzimouratidis & Pilavachi, 2009 Evans, et al., 2010 Jing, et al., 2012
	Equipo	Se refiere a si el sistema es automatizado y si es o no de fácil control.  También puede referirse a si el equipo es nuevo u obsoleto para el proyecto de DA.	Wang, et al., 2008 Jing, et al., 2012
	Tratamientos	Se refiere al número de pretratamientos o postratamientos que deben de recibir los residuos, para poder llegar a un producto principal (biogás).	Madlener, et al., 2009
	Madurez de la tecnología	Mide el grado de fiabilidad de la tecnología adoptada, así como la forma generalizada de la tecnología a nivel internacional. Esto se aprecia mediante una medida cualitativa.	Beccali, et al., 2003 Cavallaro & Ciraolo, 2005 Wang, et al., 2008 Jing, et al., 2012
	Flexibilidad del proceso	Hace referencia a la facilidad con que la tecnología puede aceptar cambios en la operación, sin afectar el objetivo principal, que es la generación de biogás.	Kalbar, et al., 2012



criterio	Subcriterio	Descripción	Bibliografía
	Capacidad	La cantidad de electricidad que una planta de DA puede producir en un determinado periodo.	Chatzimouratidis & Pilavachi, 2009
	Producción de energía	Cuantifica la energía total generada por las plantas y se mide en MWh/año.	Cavallaro & Ciraolo, 2005
	Ahorro de energía	Es la cantidad de energía eléctrica utilizada actualmente por la planta menos la cantidad de energía producida a partir del proceso de degradación.	Beccali, et al., 2003 Cavallaro & Ciraolo, 2005
	Tiempo de construcción de la planta	Mide el tiempo para realizar y poner en operación a las plantas de DA. Se expresa en número de meses.	Cavallaro & Ciraolo, 2005
	Disponibilidad tecnológica	Hace referencia a la posibilidad de que la tecnología esté utilizable. La falta de disponibilidad hace que los precios de las tecnologías sean más elevados ya que la demanda es superior a la oferta.	Dinca, et al., 2007 Evans, et al., 2010
	Información técnica	Este subcriterio es importante en la evaluación de tecnologías, pues entre mayor información se tenga del proceso, mejor será el análisis.	Wang, et al., 2008
<b>Económico</b>	Costo de inversión	Expresa el costo para la introducción de una tecnología. Comprende los gastos necesarios de todas las fases de ejecución del proyecto, así como la compra de equipos mecánicos.  En diversas ocasiones las tecnologías aun se encuentran en etapa piloto por lo que se imposibilita el cálculo del costo de inversión.	Cavallaro & Ciraolo, 2005 Begic & Afgan, 2007 Doukas, et al., 2007 Dinca, et al., 2007 Wang, et al., 2008 Chatzimouratidis & Pilavachi, 2009 Evans, et al., 2010 Jing, et al., 2012

<b>Criterio</b>	<b>Subcriterio</b>	<b>Descripción</b>	<b>Bibliografía</b>
	Costos de operación y mantenimiento	Este criterio incluye todos los costos relacionados con las plantas, los salarios de los empleados, los materiales y las instalaciones, el transporte y los gastos de alquiler, y todo tipo de arrendamientos de tierra a pagar. El costo de mantenimiento oscila entre 3 y 5 % del costo total de la inversión. Se puede expresar en miles de dólares o euros.	Cavallaro & Ciraolo, 2005 Dinca, et al., 2007 Chatzimouratidis & Pilavachi, 2009
	Costo anual de operación	Se refiere a los costos que se pagarán en un año.	Wang, et al., 2008 Jing, et al., 2012
	Costos de combustible	Los costos de combustible pueden incluir el transporte de los residuos y el posible procesamiento de combustible para ser utilizado en la planta de energía.	Chatzimouratidis & Pilavachi, 2009
	Costo Anual Equivalente (CAE)	Corresponden a todos los ingresos y desembolsos convertidos en una cantidad anual uniforme equivalente, que es la misma cada período.	Wang, et al., 2008
	Período de recuperación	Sirve para evaluar y determinar en un proyecto de inversión el tiempo en el cual se recuperará la misma.	Doukas, et al., 2007
	Valor Presente Neto (VPN)	Permite determinar si una inversión cumple con el objetivo básico financiero que es MAXIMIZAR la inversión.	Jing, et al., 2012
	Tasa Interna de Retorno (TIR)	Se refiere a la tasa de descuento que iguala los valores actualizados de costos y beneficios del proyecto.	Jing, et al., 2012
<b>Ambiental</b>	Efectos al ambiente (Ruido, alteración a	Refleja la tasa de intervención de la tecnología en el medio ambiente natural.	Cavallaro & Ciraolo, 2005 Doukas, et al., 2007 Wang, et al., 2008

<b>Criterio</b>	<b>Subcriterio</b>	<b>Descripción</b>	<b>Bibliografía</b>
	la estética, olores, Impactos visuales)		Jing, et al., 2012
	Uso de suelo	Mide el área que ocupa cada planta de DA, en muchas ocasiones el impacto ambiental será proporcional al área requerida, y será diferente si el terreno empleado se encuentra en la zona metropolitana o en sus alrededores.	Beccali, et al., 2003 Wang, et al., 2008 Chatzimouratidis & Pilavachi, 2008 Evans, et al., 2010
	Uso de agua	Cantidad de agua utilizada durante el proceso de Digestión Anaerobia.	Evans, et al., 2010
	Reducción de GEI	Se refiere a la reducción de los efectos potenciales sobre el cambio climático durante su funcionamiento. Se utiliza como una medida de los gases de efecto invernadero emitidos en la atmósfera.	Beccali, et al., 2003 Cavallaro & Ciraolo, 2005 Begic & Afgan, 2007 Doukas, et al., 2007 Diakoulaki & Karangelis, 2007 Wang, et al., 2008 Chatzimouratidis & Pilavachi, 2008 Evans, et al., 2010 Jing, et al., 2012
	Impacto al ecosistema	Se refiere a los posibles riesgos para los ecosistemas causados por la producción de los diversos proyectos que se incluyen en las estrategias y se evalúa en términos cualitativos.	Cavallaro & Ciraolo, 2005
	Agotamiento de los recursos naturales	Este criterio es similar al denominado uso de suelo, pues se refiere a los recursos que pueden ser agotados con la construcción de determinada planta de DA.	Dinca, et al., 2007

criterio	Subcriterio	Descripción	Bibliografía
	Cambio climático	Reduce el impacto al disminuir la generación de gases efecto invernadero. Este criterio es similar al de reducción de GEL.	
<b>Social</b>	Aceptación de la ciudadanía	Expresa el índice de aceptación por parte de la población local con respecto a la hipótesis de la realización de los proyectos que se examinan. Este criterio es muy importante, ya que la opinión de la población y de los grupos de presión puede influir mucho en el tiempo que se necesita para continuar con el proyecto. Es vital para reunir la opinión pública en una etapa temprana, antes de la evaluación de la viabilidad del proyecto.	Cavallaro & Ciraolo, 2005 Chatzimouratidis & Pilavachi, 2008
	Mejora de condiciones de salud	Se refiere a si la tecnología será capaz de dar solución a la problemática y beneficiará a la población afectada mejorando su calidad de vida.	Wang, et al., 2008
	Contribución a la infraestructura	Expresa el progreso inducido en las regiones menos desarrolladas del país mediante la introducción de una nueva tecnología.	Doukas, et al., 2007 Wang, et al., 2008 Evans, et al., 2010
	Generación de empleos	Refleja el número de empleos creados con el proyecto.	Doukas, et al., 2007 Begic & Afgan, 2007 Wang, et al., 2008 Chatzimouratidis & Pilavachi, 2008 Evans, et al., 2010

Fuente: Elaboración propia, con base a información obtenida de bibliografía

### 3.2.4.1 Escala de evaluación de Criterios

La escala de evaluación propuesta para los criterios cualitativos fue la denominada de 5-puntos (muy mala, mala, media, buena, muy buena), y para los criterios cuantitativos (criterios económicos) la evaluación fue puntual.

A continuación se describe la escala de 5 puntos para algunos de los criterios de la Tabla 3.3.

#### Criterios Técnicos

##### Pre o post tratamientos

Calificación	Descripción
1	Se requieren más de dos tratamientos previos o posteriores al proceso
2	Se requieren dos tratamientos previos o posteriores al proceso
3	Se requiere un tratamiento previo o posterior al proceso
4	Se requiere un solo tratamientos previo
5	No son necesarios tratamientos previos o posteriores al proceso.

##### Equipo

Calificación	Descripción
1	Equipos globalmente inadecuados/insuficientes, para el proyecto de estudio
2	Equipo insuficiente para el proyecto
3	Equipo suficiente que medianamente contribuye al desarrollo del proyecto
4	Equipos adecuados
5	Equipos planteados totalmente para la ejecución del proyecto

##### Flexibilidad

Calificación	Descripción
1	Proceso inflexible, no permitirá adecuaciones ni cambios en la capacidad, ni composición de la materia prima.
2	Proceso poco flexible, admite mínimos aumentos de capacidad y cero cambios en la composición de la materia prima.
3	Proceso medianamente flexible, que admite cambios mínimos en capacidad y mínimas alteraciones en la composición de la materia prima.

Calificación	Descripción
4	Proceso flexible, que admite cambios y adecuaciones y es probable un aumento considerable en la capacidad y de la composición de la materia prima.
5	Proceso muy flexible, admite cambios fácilmente, su capacidad puede ser aumentada al doble y no existen problemas en las variaciones de la composición de la materia prima.

### Madurez de la tecnología

Calificación	Descripción
1	Tecnología obsoleta, sin modificaciones desde su creación
2	La tecnología será obsoleta o necesitará actualización en 1 o 2 años
3	La tecnología será obsoleta o necesitará actualización dentro de 5 a 10 años
4	La tecnología será obsoleta o necesitará actualización dentro de 10 a 20 años
5	La tecnología se volverá obsoleta o necesitará actualización después de los siguientes 20 años

### Información técnica

Calificación	Descripción
1	La información técnica es insuficiente y no menciona todos los puntos clave del proceso
2	La información técnica es de buena calidad, pero escasa
3	La información técnica es suficiente pero presenta aspectos poco claros
4	Información técnica de buena calidad y suficiente
5	La información técnica está muy completa, clara y es de excelente calidad

### Criterios Ambientales

#### Generación de olores

Calificación	Descripción
1	Olor excesivo fuera de las instalaciones
2	Olor perceptible fuera de las instalaciones
3	Olor excesivo dentro de las instalaciones
4	Olor moderado dentro de las instalaciones
5	No se produce olor

### Uso de suelo

Calificación	Descripción
1	Erosión potencial del suelo
2	N/A
3	La erosión es moderada
4	La erosión es despreciable
5	No hay erosión del suelo

### Uso de agua

Calificación	Descripción
1	Consumo excesivo de agua
2	Consumo abundante de agua
3	Consumo moderado de agua
4	Consumo despreciable de agua
5	No existe consumo de agua

### Reducción GEI

Calificación	Descripción
1	No existe reducción de GEI
2	Despreciable reducción de GEI
3	Moderada reducción de GEI
4	N/A
5	Reducción de GEI

### Criterios Sociales

En la evaluación social se consideraron los siguientes criterios, que los expertos evaluaron según su experiencia. En la parte inferior se muestran algunos subcriterios sociales, que fueron evaluados en una escala de 5 puntos.

Criterios	Calificación	Descripción
Aceptabilidad de la ciudadanía	1	Muy mala
Credibilidad del proyecto	2	Mala
Contribución a la infraestructura	3	Media
Mejora de condiciones de salud	4	Buena
Contribución a la sociedad	5	Muy buena

El peso de los criterios es un factor muy importante en una evaluación multicriterio. El peso en la evaluación es determinado por cada uno de los expertos, y el programa Visual PROMETHEE se encargó de reconocer los datos con los que fue alimentado, para posteriormente generar una serie de gráficos, que permitieron identificar de forma visual las mejores tecnologías de Digestión Anaerobia.

### 3.2.5 Evaluación final de las alternativas tecnológicas de DA

Los resultados de la evaluación preliminar y de la evaluación hecha por los expertos en residuos sólidos urbanos (Maestro Constantino Gutiérrez Palacios, Doctora Sylvie Jeanne Turpin Marion y la Doctora Alethia Vázquez Morillas), alimentaron al programa Visual PROMETHEE, que es un software relativamente sencillo, compatible con cualquier computadora y sobre todo que ha mostrado ser muy útil en la toma de decisiones, el programa fue capaz de analizar y elegir entre diversos escenarios, mostrando un resultado de fácil interpretación.

### 3.2.6 Selección de alternativas de sitio

La selección de la ubicación del sitio para la construcción de una planta de DA es determinante en la toma de decisiones, pues en gran medida condiciona el éxito del proyecto, ya que al tener una ubicación óptima se minimizan los costos de construcción, y los riesgos de pérdidas en el ciclo de vida del sitio.

En este proyecto no se realizó la evaluación de sitio, y solo se propuso un lugar, tomando en cuenta lo siguiente:



### Decisiones de localización

- a) Expandir una instalación existente.

En caso de querer expandir una instalación existente, se deberá corroborar que el sitio posee suficiente espacio disponible para ello. Esto puede ser una alternativa muy atractiva cuando la localización tiene características muy adecuadas o deseables para el proyecto.

- b) Nuevas instalaciones en nuevos sitios

Independientemente del tipo de sitio, el evaluador consideró los siguientes criterios:

- 1.- Localización: Estado, Municipio, y/o coordenadas geográficas,
- 2.- Uso de suelo actual,
- 3.- Condiciones climatológicas: Temperatura máxima y mínima
- 4.- Precipitación pluvial
- 5.- Velocidad de los vientos
- 6.- Accesibilidad. La planta deberá de estar ubicada en un sitio de fácil acceso de la materia prima, y con ellos a la entrada de vehículos y/o de transporte de carga.
- 7.- Información de las instalaciones existentes en el sitio. Se deberá garantizar que el sitio propuesto asegure el suministro de energía eléctrica, para que la planta pueda estar en funcionamiento.

Se descartaron los sitios que se encuentran en zonas con:

- Parques nacionales o zonas protegidas (reservas de la biósfera, parques nacionales, monumentos naturales, santuarios, reservas estatales y manglares o humedales).
- Zonas de minería superficial o subterránea.
- Zonas de alto riesgo por inundación marítima o fluvial.
- Zonas de recarga crítica para acuíferos.
- Zonas agrícolas altamente productivas.
- Zonas patrimonio cultural o zonas arqueológicas.

Actualmente existen herramientas para la selección del sitio, una de ellas es la realizada por Jean Currie et. al., en 2004, (Kito & Thomas, 2011) que consiste en una hoja de cálculo que incluye los aspectos demográficos del área de estudio, diseño de la planta y las consideraciones económicas, con esto se define el tamaño de la planta y por ende el área requerida.

### 3.3 Segunda parte: Evaluación económica del proyecto

Esta segunda parte tuvo como finalidad conocer la viabilidad económica del proyecto, identificando, cuantificando y valorando los costos y beneficios que generará.

Para la valorización de los costos se tomaron en cuenta los siguientes:

- Costos por tratamiento o disposición actual de los RSU
- Costos de inversión del proyecto de DA
  - Costos de operación y mantenimiento
  - Costos por disposición de los residuos generados del proceso de DA
- Costos por tratamiento de los RSU con el proyecto de DA

En cuanto a los beneficios:

- Aumento en la oferta para el tratamiento de los Residuos Sólidos Urbanos,
- Revalorización de la FORSU
- Reducción de impactos negativos al ambiente
- Mejora en la calidad de vida de la población afectada por el tratamiento y disposición inadecuados de los Residuos Sólidos Urbanos
- Ahorro de costos.
- Venta de subproductos.

Con los datos anteriores, se calcularon los indicadores de rentabilidad del proyecto:

- Tasa Interna de Retorno (TIR)
- Valor Presente Neto (VPN)
- Valor Presente de los Costos (VPC)

Finalmente con la información recabada se realizó una gráfica que mostró el tiempo estimado de recuperación de la inversión

Al final del análisis económico se presentó el Entregable (Caso de Estudio y Discusión), con el análisis de rentabilidad del proyecto de Digestión Anaerobia.

## 4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA AL CASO DE ESTUDIO DEL MUNICIPIO DE ECATEPEC

### 4.1 Primera parte: Descripción del caso de estudio

#### 4.1.1 Identificación del problema

Uno de los problemas que más aqueja al Municipio de Ecatepec de Morelos, es la gestión inadecuada de los Residuos Sólidos Urbanos. El problema del municipio se centró en el tratamiento y disposición final inadecuados de los RSU, principalmente de su fracción orgánica. Se reporta que el municipio genera 2,250 toneladas de residuos al día, el 48 % corresponde a la FIRSU y el 52 % restante a la FORSU. La problemática de la gestión inadecuada va más allá de aspectos estéticos, pues también involucra problemas sociales y ambientales.

La actual administración del municipio tiene muy poco conocimiento respecto al manejo integral de los RSU, pues gran parte de los residuos recolectados son vertidos en tiraderos a cielo abierto. Actualmente Ecatepec de Morelos no cuenta con un sistema de recolección diferenciado.

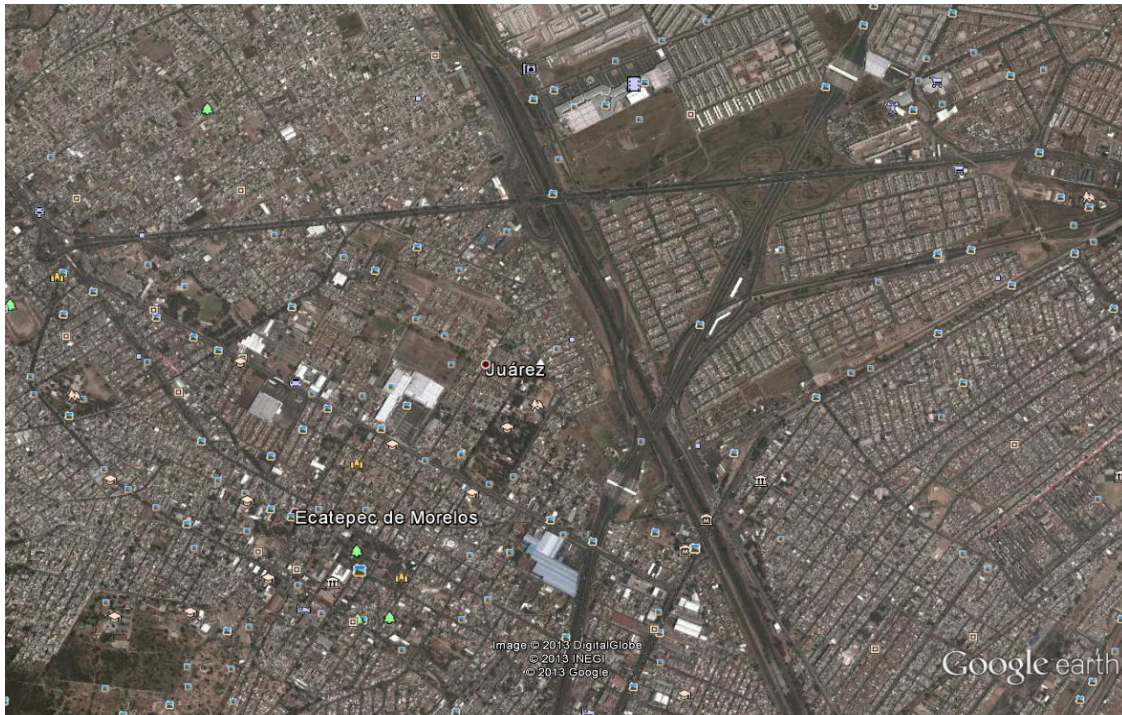
#### 4.1.2 Diagnóstico de la situación actual

##### “Municipio de Ecatepec de Morelos”

Ecatepec de Morelos tiene una extensión territorial de 186.9 km<sup>2</sup>, colinda al norte con los municipios de Coacalco de Berriozábal, Tultitlán, Jaltenco, Tonanitla y Tecámac; al este con los municipios de Tecámac, Acolman y Atenco; al sur con los municipios de Atenco, Texcoco, Nezahualcóyotl, con el Distrito Federal y con el municipio de Tlalnepantla de Baz; al oeste con el municipio de Tlalnepantla de Baz, el Distrito Federal y el municipio de Coacalco de Berriozábal. Sus coordenadas geográficas están entre los paralelos 19°29' y 19°40' de latitud norte; los meridianos 98°58' y 99°08' de longitud oeste, altitud entre 2,200 y 3,000 m (INEGI, 2009). Ecatepec está dividido en 1 ciudad, 8 pueblos, 6 ejidos, 12 barrios, 163 fraccionamientos y 359 colonias. El municipio atraviesa el Río de los Remedios que sirve como límite territorial en la parte sur con el Distrito Federal y Netzahualcóyotl. En la Figura 4.1 se muestra un panorama general del municipio de Ecatepec de Morelos.

La distribución de su tipo de suelo está en relación con la geología, topografía y procesos de arrastre y transporte de materiales. Los tipos de suelos presentes en Ecatepec de Morelos, son Leptosol (11.16 %), Solonchak (5.44%) y Phaeozem (0.49 %), estos son suelos infértiles y ácidos (Ecatepec de Morelos, 2009). Gran parte del uso del suelo es urbano con un 82.91 % y la agricultura ocupa un 0.49 %.

Actualmente gran parte de la superficie del país está dañada debido a algún proceso de degradación. En Ecatepec los efectos negativos en el suelo son numerosos, el desequilibrio del ciclo hidrológico, la disminución de la biodiversidad y la deforestación, todo ello conduce a la desertificación o erosión del suelo.



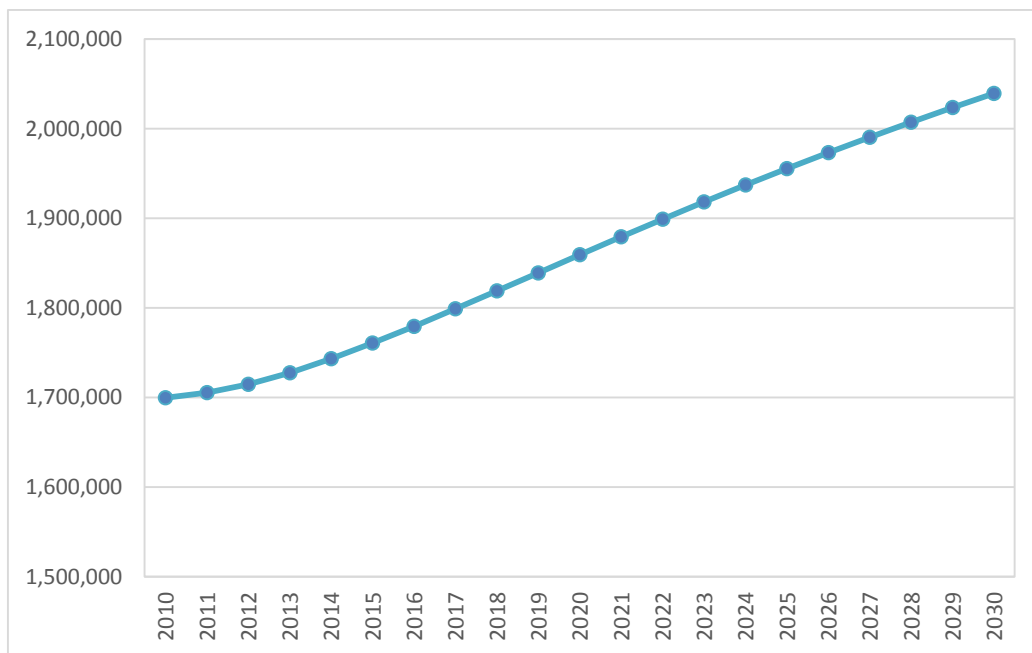
**Figura 4.1** Mapa de Ecatepec de Morelos, Edo. De México

El clima predominante en el municipio es templado subhúmedo, con lluvias en verano, y una precipitación promedio anual que oscila en los 584 milímetros. La temperatura media anual es de 13.8 °C, con una máxima de 30 °C en los meses de marzo a julio y una mínima de 7 °C en los meses de diciembre y enero.

## Población

De acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) el municipio cuenta con 1,743,268 habitantes y de acuerdo con el Consejo Nacional de Población, Ecatepec continuará con su dinámica de crecimiento al menos hasta el año 2030 (CONAPO, 2013)

En la Figura 4.2 se puede apreciar la dinámica del crecimiento acelerado de la población, dicha dinámica puede deberse a diversos factores, como el alto índice de natalidad y bajo índice de mortalidad, así como a la migración.



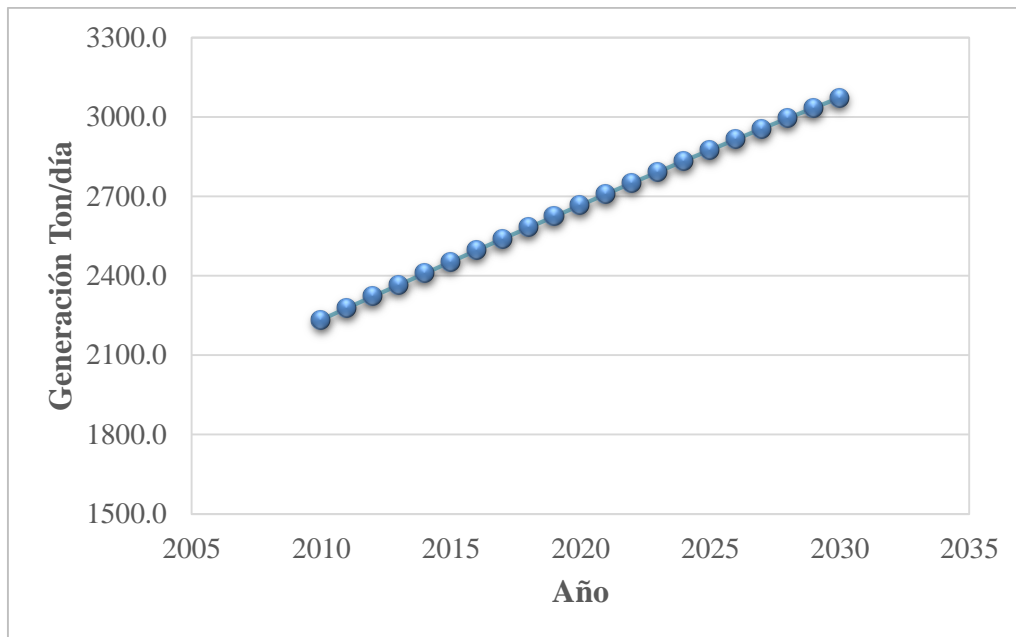
**Figura 4.2** Proyección de la población de Ecatepec de Morelos

Fuente: Estimaciones del Consejo Nacional de Población. Dirección General de Estudios Sociodemográficos y Prospectiva.

## Proyección de RSU en el municipio de Ecatepec de Morelos

Con base en la proyección del crecimiento de la población se efectuó la proyección de la generación de RSU (Figura 4.3), la cual aumentará conforme transcurra el tiempo. La tendencia al incremento de la generación de residuos sólidos en México, puede variar de 1 a 3 % anual.

Con la proyección se demuestra que una de las principales necesidades del municipio de Ecatepec de Morelos es aportar una alternativa para la disposición final de sus Residuos Sólidos Urbanos.



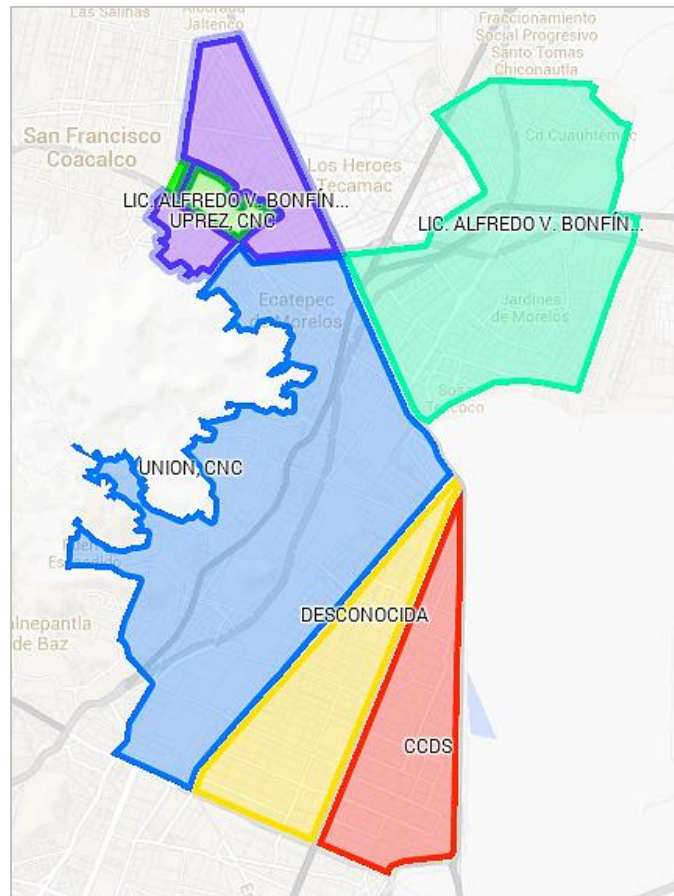
**Figura 4.3** Proyección de la generación de RSU en Ecatepec de Morelos  
 Fuente: Elaboración propia, con datos de la CONAPO

### Tratamiento y disposición actual de los RSU del municipio de Ecatepec de Morelos

Gracias a los datos proporcionados por el Instituto de Investigaciones Sociales de la UNAM, se obtuvo la siguiente información, respecto al manejo y tratamiento de los residuos sólidos urbanos en el municipio de Ecatepec de Morelos, Estado de México.

Ecatepec de Morelos cuenta con una plantilla de 350 trabajadores de limpia, y con 49 vehículos recolectores de residuos, cuyas rutas de recolección son solamente las avenidas principales, edificios gubernamentales, y escuelas. El resto del municipio es operado por cinco organizaciones (Lic. Alfredo V. Binfin A.C., UPREZ, CNC, UNION y CCDS), en las que laboran aproximadamente 1,181 personas (Figura 4.4) (La información se obtuvo por parte del Instituto de Investigaciones Sociales de la UNAM).

La recolección hecha por las organizaciones se realiza principalmente con carretas, las cuales son operadas por dos personas (Figura 4.5).



**Figura 4.4** Zonas de recolección de los RSU.

Morado (UPREZ y CNC), Verde (Lic. Alfredo V. Bonfín A.C.), Azul (UNION y CNC),  
 Amarillo (Desconocida), Rojo (CCDS).

Se estima que de las 2,500 toneladas generadas en Ecatepec de Morelos, las organizaciones privadas y públicas depositan sólo 1,700 toneladas de RSU al relleno sanitario de Santa María Chiconautla. Fuentes informales mencionan que sólo 500 toneladas son las que ingresan al relleno sanitario de Santa María Chiconautla. El resto de los RSU que no son depositados en el relleno sanitario son vertidos en tiraderos a cielo abierto, canales, o llevados a otros municipios, provocando serios problemas ambientales y sociales.





**Figura 4.5** Carretonero

Fuente: Foto tomada del reporte del Instituto de Investigaciones Sociales, 2013

Actualmente el relleno sanitario está dividido en dos secciones, la primera sección llegó al final de su vida útil y recientemente fue cerrada, la segunda sección es una nueva extensión donde el municipio deposita sus residuos. En la Figura 4.6 se muestra una foto del relleno sanitario ubicado en la localidad de Santa María Chiconautla, cuyas coordenadas geográficas son Norte 19°38'33" y Oeste 98°58'26".



**Figura 4.6** Relleno Sanitario Santa María Chiconautla, 2013



Se considera que el manejo de los RSU en el relleno sanitario es inadecuado, y está afectando la calidad de vida de los pobladores.

Una de las estrategias principales para que el municipio de Ecatepec de Morelos solucione el problema de la gestión de sus residuos, es la implantación de tecnologías de valorización energética, que permitan dar un tratamiento óptimo y una disposición final adecuada a sus residuos sólidos.

## **4.2 Identificación de alternativas de solución**

Hasta el momento el método para la disposición final de los RSU comúnmente utilizado es el de relleno sanitario, pero este no ha sido suficiente, debido a la creciente generación de residuos y a la falta de control en la disposición adecuada de los residuos. El municipio de Ecatepec ha trabajado en alternativas para la valorización de los RSU, pero por la falta de planeación no se ha podido aprovechar y recuperar la inversión de los proyectos, muestra de ello es que en julio de 2006, se promovió el proyecto denominado Ecatepec –EcoMethane Landfill Gas to Energy Project, que fue aprobado como un proyecto MDL con la finalidad de generar entre 2 y 5 MW de energía eléctrica con la recuperación de biogás del relleno sanitario, lamentablemente este proyecto por causas poco conocidas no entró en funcionamiento, a pesar de contar ya con la infraestructura.

Así surge la oportunidad de proponer al municipio nuevas alternativas para el aprovechamiento de la FORSU, una de éstas es la Digestión Anaerobia, que a nivel internacional ha demostrado excelentes resultados en la recuperación de biogás. La DA permitirá al municipio reducir la cantidad de residuos vertidos en rellenos sanitarios, alargando su vida útil y disminuyendo la generación de gases efecto invernadero.

### **4.2.1 Selección de alternativas tecnológicas**

#### **Evaluación Preliminar**

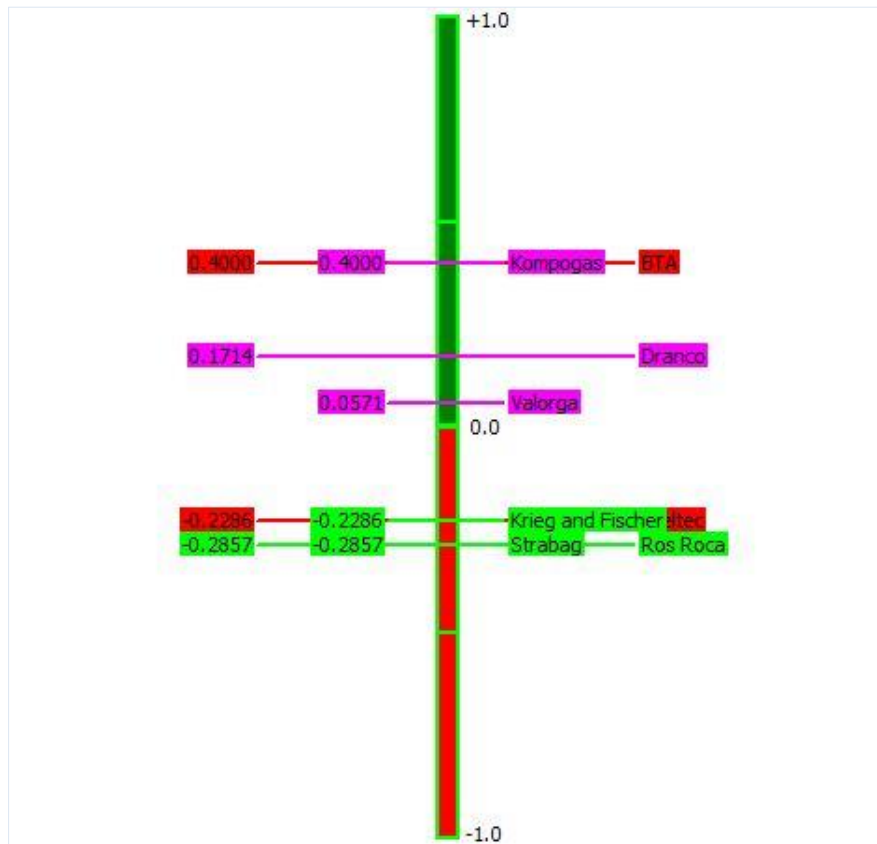
Las tecnologías que se evaluarán fueron Weltec, Valorga, BTA, Dranco, Krieg and Fischer, Kompogas, Ros Roca y Strabag, las cuales a nivel internacional son de las más importantes y han ganado prestigio debido a su experiencia e innovación, y que han dado buenos resultados en el tratamiento de la fracción orgánica de los RSU. En el anexo 1 de esta tesis,

se encuentra la lista de compañías más importantes reportada por Juniper Consultancy Services Ltd.

En la Tabla 3.2 de la metodología se muestran los criterios tomados en cuenta para la evaluación preliminar de las ocho tecnologías. La escala utilizada en la evaluación preliminar fue la denominada de dos puntos, es decir “Si cumple” o “No Cumple”.

De las ocho tecnologías evaluadas, Weltec, Strabag, Ros Roca, y Krieg and Fischer, se descartaron de las posteriores evaluaciones. El hecho de que estas tecnologías no hayan pasado la evaluación preliminar, no significa que las tecnologías sean malas, sino que no cumplieron con los criterios necesarios para integrarlas a la siguiente etapa de evaluación. Esta evaluación ahorró tiempo y esfuerzos.

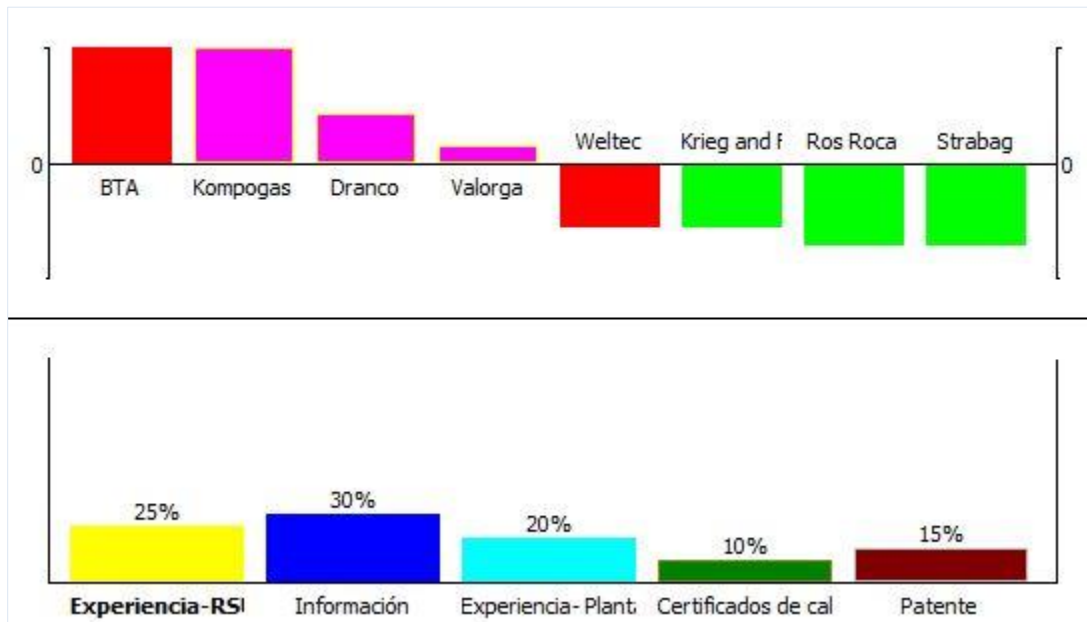
La Figura 4.7 muestra los resultados de la primera evaluación, en esta gráfica se pueden apreciar dos zonas, una roja (-) y otra verde (+). Los valores de los flujos de dominancia netos están entre -1.0 y +1.0, las alternativas que se encuentran en la zona verde o más próximas a +1.0, constituyen las mejores opciones para este proyecto. Como ya se mencionó las mejores opciones tecnológicas en esta etapa son: Kompogas, Valorga, Dranco y BTA, las tres primeras son tecnologías secas y sólo BTA es tecnología húmeda.



**Figura 4.7** Evaluación preliminar de tecnologías de DA

Las tecnologías con mayores contribuciones positivas son BTA y Kompogas, seguidas de Dranco y Valorga.

Otra forma gráfica de representar la evaluación multicriterio es con la Figura 4.8, la ventaja de esta gráfica es que se aprecian los criterios así como sus pesos, los cuales fueron considerados con base en las exigencias del proyecto. Cabe destacar que para otro tipo de proyectos estas tecnologías pueden ser diferentes, al igual que los criterios restrictivos o preliminares.



**Figura 4.8** Tecnologías de DA

### Evaluación Final

Para la evaluación final, en la Tabla 4.1 se muestran los criterios que fueron evaluados por el grupo de expertos en el tema de DA y alimentaron el software Visual PROMETHEE. Cabe destacar que algunos de estos criterios fueron tomados de la Tabla 3.3.

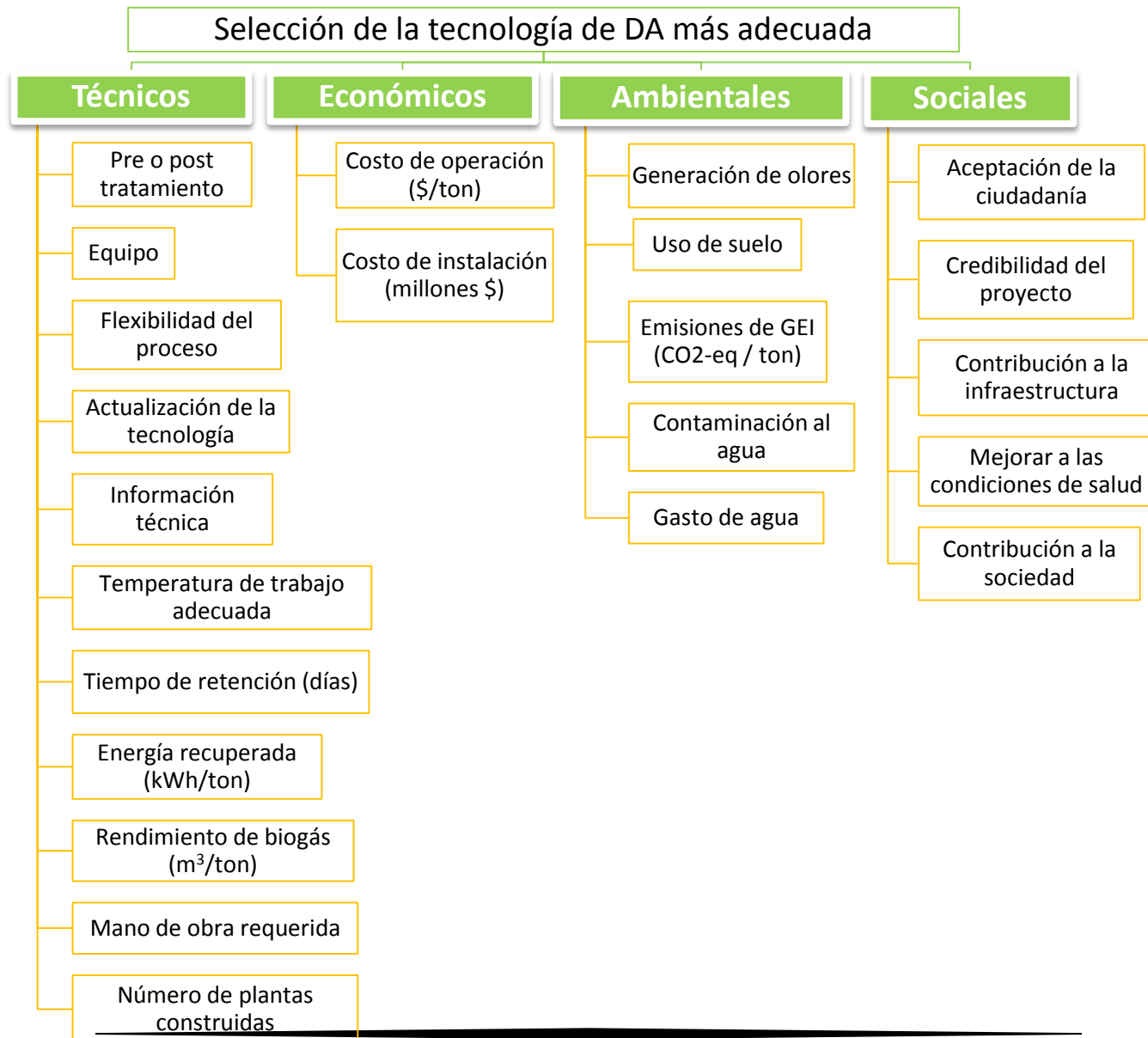
**Tabla 4.1** Criterios de evaluación

Tecnología				
Criterios	Peso	Subcriterios	Escala	Valor
Técnicos		Pre o post tratamiento	5 puntos	
		Equipo	5 puntos	
		Flexibilidad del proceso	5 puntos	
		Actualización de la tecnología	5 puntos	
		Información técnica	5 puntos	
		Temperatura de trabajo adecuada	5 puntos	
		Tiempo de retención (días)	Puntual	
		Energía recuperada (kWh/ton)	Puntual	
		Rendimiento de biogás (m <sup>3</sup> /ton)	Puntual	
		Mano de obra requerida	Puntual	

<b>Tecnología</b>				
<b>Criterios</b>	<b>Peso</b>	<b>Subcriterios</b>	<b>Escala</b>	<b>Valor</b>
		Número de plantas construidas	Puntual	
<b>Económicos</b>		Costo de operación (\$/ton)	Puntual	
		Costo de instalación ( millones \$)	Puntual	
<b>Ambientales</b>		Generación de olores	5 puntos	
		Uso de suelo	5 puntos	
		Emisiones de GEI (CO2-eq / ton)	Puntual	
		Contaminación al agua	5 puntos	
		Gasto de agua	5 puntos	
<b>Sociales</b>		Aceptación de la ciudadanía	5 puntos	
		Credibilidad del proyecto	5 puntos	
		Contribución a la infraestructura	5 puntos	
		Mejora de condiciones de salud	5 puntos	
		Contribución a la sociedad	5 puntos	

Fuente: Elaboración propia

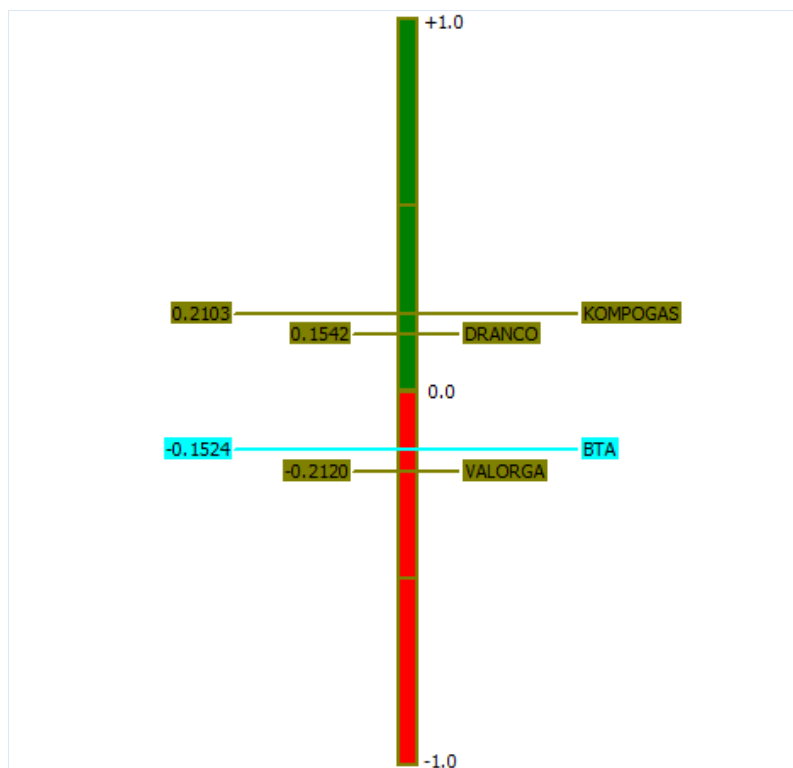
En la Figura 4.9 diagrama se pueden apreciar de manera general los criterios técnicos, económicos, ambientales y sociales, para el proyecto del municipio de Ecatepec de Morelos.



**Figura 4.9** Diagrama Jerárquico

Los resultados se obtuvieron de la misma manera que en el análisis anterior, con la diferencia de que en esta evaluación el grupo de expertos designó los pesos de cada uno de los criterios, poniendo en primer lugar a los criterios técnicos, que en promedio tiene el 35 % de peso, seguido de los criterios económicos con un 30 % y los criterios ambientales y sociales entre un 20 y 25 %. En opinión de los expertos, los aspectos sociales son de suma importancia, pues muchos proyectos se ven afectados por la falta de la aprobación ciudadana.

En la Figura 4.10 se muestra que las tecnologías secas son las más apropiadas para este proyecto, dejando nuevamente en primer lugar a Kompogas y con una diferencia mínima le sigue la tecnología Dranco, aunque la tecnología que mayor rendimiento y generación de electricidad proporciona es Dranco con 760 kWh/ton, y Kompogas sólo genera 585 kWh/ton (Karagiannidis & Perkoulidis, 2009), hubo otros criterios con mayor peso, que influyeron en el resultado presentado.



**Figura 4.10** Evaluación final de tecnologías de DA

Las ventajas de utilizar una tecnología seca, es que son consideradas rígidas, y llegan a soportar grandes cargas e inclusive toleran el que la materia prima no haya pasado por un pretratamiento exhaustivo, sin que esto dañe al digestor, lo cual resulta muy benéfico para el municipio de Ecatepec de Morelos, pues un daño en el digestor provocaría gastos no

previstos. Con el uso de una tecnología seca, el consumo de agua no sería excesivo y del total de energía generada con la tecnología, solamente se usaría el 25 %, para su autoabastecimiento y el 75 % restante podría ser destinado a la venta (Hyder Consulting, 2007).

La Digestión Anaerobia aunque es considerada costosa, es una tecnología limpia, que lejos de generar emisiones y dañar al medio ambiente, lo favorece, mitigando los GEI generados por la fracción orgánica, en comparación con otras tecnologías como la incineración e incluso el tratamiento aerobio.

### **Alternativa de localización y descripción del sitio**

Para este trabajo no se hizo una evaluación de sitios para la construcción de la planta, ya que desde un inicio se consideró utilizar el espacio aún disponible del relleno sanitario de Santa María Chiconautla. El sitio propuesto cuenta con la infraestructura adecuada para realizar el proyecto; dispone de los servicios básicos de agua, electricidad y accesibilidad para que los vehículos recolectores de residuos sólidos urbanos ingresen sin problemas a la planta de Digestión Anaerobia. Otra ventaja es que en el relleno sanitario se cuenta con mano de obra para la separación y manejo de los residuos, dentro del sitio.

El sitio propuesto está libre de reservas protegidas, zonas de alto riesgo por inundación marítima o fluvial, principalmente, en la Figura 4.11 se muestra la imagen satelital del relleno sanitario de Santa María Chiconautla.

Si bien es cierto que un digestor alto y vertical ocupa menos espacio, también es cierto que incrementa la visibilidad de la planta y estará sujeta a restricciones locales. La tecnología KOMPOGAS de sistema seco, ofrece digestores de diseño horizontal, que facilitaría el manejo de la FORSU del municipio de Ecatepec de Morelos.





**Figura 4.11** Ubicación del relleno sanitario de Santa María Chiconautla

Fuente: Google Earth, 2013

Gracias al clima estable del municipio, el digestor estaría protegido de vientos fríos y con base en las características de la localidad, se puede garantizar que el lugar mantendrá una temperatura estable, y no se alteraría la operación del digestor.

## **4.2 Segunda parte: Evaluación económica del proyecto**

### **4.2.1 Costos por tratamiento y disposición de los RSU en Ecatepec de Morelos**

Como se mencionó previamente el costo unitario por la disposición final de los Residuos Sólidos Urbanos en el estado de México, oscila entre los \$ 160 y \$ 250 por tonelada de RSU por día, con estos datos se estima que el municipio de Ecatepec de Morelos paga diariamente \$ 625,000 y este dinero hasta la fecha no se ha visto recuperado. Con esto se replantea la necesidad de buscar alternativas que permitan recuperar la inversión realizada en el tratamiento y disposición final de los residuos sólidos urbanos.

### **4.2.2 Costos de inversión del proyecto de Digestión Anaerobia**

El costo de las tecnologías juega un papel importante, sin embargo, para este estudio existieron limitaciones para la realización del análisis económico, pues los proveedores o representantes de las tecnologías no estuvieron dispuestos a dar estimaciones económicas, a menos que se garantizará que se trataba de un proyecto a punto de ser construido, es así que la escasa información disponible obligó a realizar solamente una estimación teórica del costo de inversión y de los costos de operación y mantenimiento, mediante la recopilación de datos publicados, cabe destacar que en el cálculo del costo de inversión influyen un sinnúmero de factores que hacen la diferencia de costos entre una planta y otra. Uno de estos factores es la capacidad y tipo de residuos a tratar, así como el tipo de pre y post tratamiento que se le desee dar a los residuos que entran y salen del digestor anaerobio.

En la Tabla 4.2 se presenta el costo total de una planta de Digestión Anaerobia basada en la tecnología KOMPOGAS que, según la evaluación tecnológica, resultó ser la más factible para tratar a los residuos del municipio de Ecatepec de Morelos. El proyecto considera un digestor anaerobio capaz de tratar 50 ton/día, y un tiempo de retención de 20 días.

**Tabla 4.2** Costo total de una planta de DA, sistema seco

Activos	US \$
Obra e infraestructura civil	596,062
Costo del terreno	100,000
Recepción y pre tratamiento de la FORSU	235,637
Digestor	748,543
Filtro prensa	249,514
Sistema de limpieza del biogás	241,197
Software de control y supervisión	612,142
Otros subsistemas	256,445
Prensa tornillo deshidratador	217,245
Unidad de cogeneración	1,173,590
<b>Costo total de la planta (CTP) de DA</b>	<b>4,430,375</b>
Desarrollo del proyecto (7.5 del CTP)	332,278
Contingencia (5 % del CTP)	221,519
<b>Costo Total (CAPEX)</b>	<b>4,984,172</b>

Fuente: Elaboración propia, con datos de bibliografía

La Tabla 4.2 también muestra el costo capital del proyecto de Digestión Anaerobia en el municipio de Ecatepec de Morelos y se estima tendrá una inversión de US \$ 4,984,172; este costo incluye el terreno para la construcción, el cual siempre debe de ser tomado en cuenta aun cuando el municipio sea el dueño del predio, y adicional a los costos por equipo y otros costos asociados con la instalación del sistema, también se considera un costo por desarrollo del proyecto y por contingencia con el fin de proteger al proyecto en caso de posibles riesgos no identificados y para futuros análisis se deberá considerar la variación de los precios en los equipos y materiales necesarios.

El costo reportado podrá disminuir en la medida que aumente la cantidad de residuos a tratar, propiciado que la generación de biogás aumente y por ende la generación de electricidad sea mayor. A pesar de que la construcción de una planta de DA resulta costosa en un inicio, la alternativa de Digestión Anaerobia resultará benéfica para el municipio y su medio ambiente. El incremento o la disminución de los costos dependerán de si las tecnologías requieren de algún pretratamiento y/o postratamiento, de la calidad del producto deseado, de la calidad del fertilizante, la cantidad de biogás producido y su contenido energético, y los ingresos generados por las ventas de energía (y si la electricidad y la energía térmica se venden).

#### **4.2.3 Costos de operación y mantenimiento de la planta de DA**

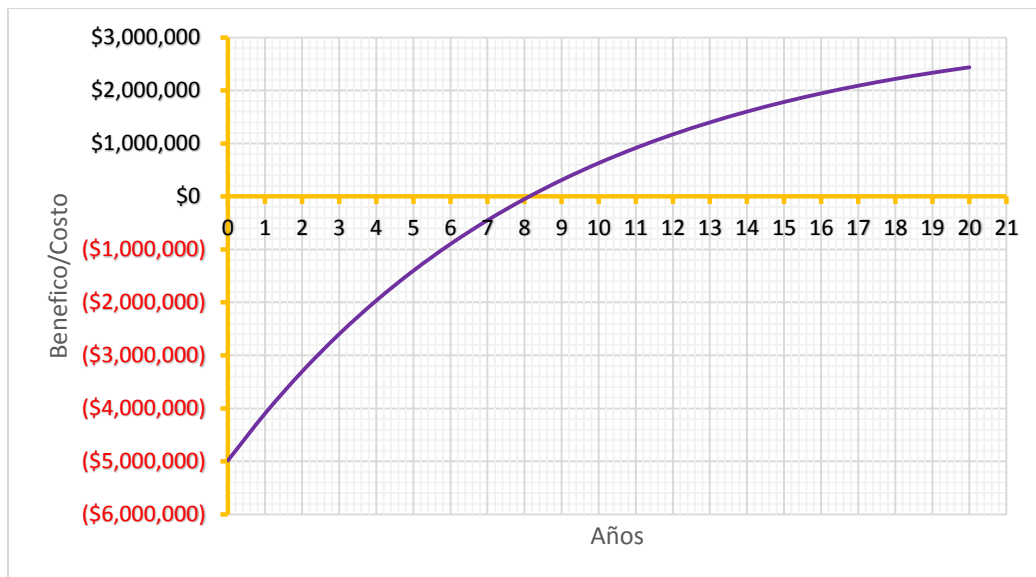
Para este proyecto se considera un costo anual de operación y mantenimiento equivalente al 5 % del costo capital, es decir una cantidad de US \$ 221,519. En países como Alemania el costo de operación por tonelada es de US \$ 218, Finlandia US \$ 66 y en Francia \$ 76 (Wannholt, 1998).

Algunas de las actividades de mantenimiento más importantes son:

- Remoción del lodo digerido (cada 1-2 años). Al digester anaerobio se le debe de eliminar el exceso de lodos. En sistemas bien diseñados, esto se realiza de manera automática, con muy poco tiempo de inactividad. Otros diseños requieren de una extracción manual de los lodos.
- Reemplazo de empaques para la limpieza del biogás (cada 6-12 meses). Es importante para eliminar los compuestos de sulfuro de hidrógeno corrosivos para evitar la sustitución del motor, esto mediante empaques de hierro, el empaque debe ser sustituido al menos cada 12 meses.
- Mantenimiento general del motor (cada semana). La producción de electricidad generada a partir del digester anaerobio debe ser inspeccionada.
- Mantenimiento preventivo del motor (cada mes).
- Válvulas de fuga (cada 6-12 meses). Para evitar riesgos de seguridad, se recomienda inspeccionar las válvulas del sistema de digestión una a dos veces al año, y evitar fugas. Las válvulas que presenten fallas deben de ser reemplazadas inmediatamente.
- Tuberías (cada 6-12 meses). Las tuberías deben de ser inspeccionadas al menos una vez por año, para evitar fugas.

#### 4.2.4 Costo por disposición de los residuos generados en el proceso de Digestión Anaerobia

Un elemento importante a considerarse en el proceso de Digestión Anaerobia es el costo de la disposición de los residuos generados del proceso. Se calcula que se genera el 60 % de la materia que entra al sistema. Y el costo para estabilizar al lodo digerido es de US \$ 15 por tonelada de residuo, por lo cual para amortiguar este gasto, la composta generada puede ser vendida como remediador de suelos, como fertilizante orgánico. Con los datos anteriores se calcularon los siguientes indicadores de rentabilidad del proyecto de Digestión Anaerobia, siendo la Tasa Interna de Retorno del 19 %, y un Valor Presente Neto de \$ 2,438,105.



**Figura 4.12** Beneficio/Costo del proyecto de DA

En la Figura 4.12 se puede observar que la inversión del proyecto se recuperará en el octavo año. Para la realización del gráfico se consideraron los costos que involucrará el proyecto, así como los beneficios que se obtendrán del mismo, en cuanto a los beneficios se consideraron los ahorros que se llevarán en la disposición final de los residuos sólidos orgánicos, la venta de la energía generada en el proceso de digestión anaerobia y la venta del fertilizante.

## 5. ENTREGABLE

Existen diversas formas de reportar los resultados o entregables de la etapa de visualización, en este capítulo se entregó como un resumen ejecutivo. Como se explicó anteriormente el entregable sustentará el correcto grado de definición del proyecto de Digestión Anaerobia.

**Nombre de la obra:**

Proyecto de Digestión Anaerobia en el municipio de Ecatepec de Morelos, Estado de México.

**Zona de influencia:**

Ecatepec de Morelos, Estado de México.

**Problemática:**

Tratamiento inadecuado de los residuos sólidos urbanos, principalmente de la fracción orgánica.

**Alternativa de solución:**

Tecnologías de Digestión Anaerobia Seca.

### 5.1 Viabilidad del proyecto de Digestión Anaerobia

Como resultado de la evaluación económica del proyecto de Digestión Anaerobia, los números muestran una buena rentabilidad. Con base en los indicadores, se deduce que el proyecto es rentable desde el punto de vista económico, pues genera la utilidad necesaria para recuperar la inversión, y se garantizó una vida útil de 20 años.

La inversión inicial del proyecto fue de US \$ 4,984,172, y su Valor Presente Neto fue positivo ( $VPN > 0$ ), la Tasa Interna de Retorno (TIR) es mayor a la tasa de descuento (19 %  $> 12$  %) y los beneficios tienen un valor de 2.5. Por lo tanto, con base en los resultados de estos indicadores se recomienda la realización del proyecto de Digestión Anaerobia en el Municipio de Ecatepec de Morelos.

A pesar de que el período de recuperación no fue inmediato, se tiene que considerar que con el proyecto de Digestión Anaerobia no sólo se podrán reducir los costos del transporte, sino que también se podrá dar una alternativa segura al municipio ya que el relleno sanitario de Santa María Chiconautla alcanzará su tiempo de vida útil.

Afortunadamente el costo de los digestores anaerobios va disminuyendo y con el tiempo el número de posibilidades de emplearlo en el tratamiento de la FORSU aumentará, así en poco tiempo será una opción mucho más viable para países en desarrollo, como México, en donde aún no existen subsidios para que los residuos sean tratados por medio de la Digestión Anaerobia, esto comparado con otras ciudades como los de la Unión Europea, los cuales cuentan con subsidios que se dan por tonelada de residuos tratados.

El municipio de Ecatepec de Morelos tiene en el proyecto de Digestión Anaerobia una oportunidad de inversión que aportará beneficios ambientales y sociales, que no son cuantificables en términos monetarios, aunque exista inversión y costos, pero sí podrán medirse bajo indicadores de la mejora en la calidad de vida de la población.

Aunque en diversas ocasiones se ha mencionado que la Digestión Anaerobia no presenta la mejor relación costo/beneficio (caso contrario a este trabajo), no se han considerado los impactos ambientales y sociales que se generan con estos proyectos (Communauté métropolitaine de Montréal, 2007).

## **5.2 Beneficios del proyecto de Digestión Anaerobia**

### **5.2.1 Venta del biogás en México**

Hoy en día México está enfrentando cambios en todas sus áreas, y una de ellas es la promoción e impulso de la generación de energía a partir de fuentes alternas o renovables, que gracias a la entrada en vigor del protocolo de Kyoto y la aparición en el mundo del mercado de bonos de carbono, la producción de electricidad a través del biogás se está convirtiendo en una alternativa muy atractiva para los municipios.

El biogás es amigable con el medio ambiente y a partir de él se puede generar energía eléctrica. Con la generación del biogás se podrán lograr ahorros en los costos de producción y operación del proceso de Digestión Anaerobia.

Si bien es cierto que a la fecha, la energía que se recupere del proyecto de DA, no podrá ser vendida (Art. 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos), sí podrá entrar en el esquema de autoabastecimiento, cogeneración o pequeña producción, esto de acuerdo, a los artículos 3 y 36 de la Ley de Servicio Público de Energía Eléctrica y a su reglamento. Lo anterior ayudará a que el proyecto sea viable y se obtenga un ahorro económico y energético. La Comisión Federal de Electricidad estará en la disponibilidad de

generar un contrato de interconexión en mediana escala, que sirva de soporte para el funcionamiento óptimo del digestor. En la actualidad existen varios contratos que se utilizan dependiendo del tipo de la fuente empleada y de la capacidad instalada de la planta (Anexo 5).

### **5.2.2 Mercado del fertilizante/composta**

La Digestión Anaerobia, además de producir biogás, genera subproductos igualmente valorizables, tal es el caso de la composta rica en nutrientes (nitrógeno, potasio y fosforo), que puede ser empleado como fertilizante en la agricultura y reducir los costos a los agricultores. El fertilizante contribuirá a mejorar las características de estructura, porosidad y aireación del suelo, y dará una alternativa de solución a otro problema existente en México, que es la erosión del suelo. Una de las causas de la erosión es la salinización, en las zonas agrícolas que emplean fertilizantes inorgánicos, se deteriora la fertilidad de los suelos. Según el Instituto Español de Comercio Exterior (ICEX) en el 2008 de las 21.9 millones de hectáreas que se sembraron en México, en el 59.5 % se adicionaron fertilizantes inorgánicos, lo que equivale a 13.04 millones de hectáreas. De los fertilizantes inorgánicos de mayor comercialización, en primer lugar se encuentran los nitrogenados 59 %, le siguen los fosforados 24 % y potásicos 17 %, dejando en un último lugar a los fertilizantes de origen animal o vegetal. El International Fertilizer Association (IFA) menciona que México destina el 50.7 % de los fertilizantes a los cultivos de maíz, el 22.1 % en frutas y hortalizas, 9.5 % en caña de azúcar, 4.3 % en trigo, 2.6 % oleaginosas, 2.0 % otros cereales, y el 8.8 % restante en otros cultivos. El Estado de México se encuentra dentro de las entidades con mayor uso de fertilizantes 4.2 % y por lo tanto mayor erosión de suelos, con el uso del fertilizante generado al término del proceso de DA, se podrán regenerar las áreas de cultivo, pues se ha observado que con el uso de abonos orgánicos el pH en suelos ligeramente ácidos o neutros, tiende a aumentar, y la capacidad de retención de agua también incrementa, esto último está directamente relacionado con la mejor infiltración del agua al suelo (SAGARPA, 2012).

El aumento en el precio del gas natural y el fosfato en los últimos años, ha impactado en el costo de producción de los fertilizantes sintéticos (Chirangano, et al., 2013). Los fertilizantes nitrogenados en 2011 reportaron un precio promedio de \$ 8,304 por tonelada y los fertilizantes fosforados \$ 10,516/ton, el cloruro de potasio en \$ 8,925/ton (Rosso Pantoja, 2011). Y para el caso de los fertilizantes orgánicos de \$ 3,125 la tonelada (Grupo Xaxeni S. de R.L. de C.V., 2013), si se considera que anualmente se producirán 5,475 toneladas de residuos, se podrá recuperar una cantidad de \$ 17,109,375.



La demanda de fertilizantes crece conforme aumenta la población y la necesidad de abastecerla de comida, se estima que los fertilizantes son responsables de entre el 40 y 60 % del suministro mundial de alimentos (Stewart, et al., 2005). En el Reino Unido es común aplicar el lodo digerido ya tratado a los campos de cultivo, bajo estrictas regulaciones gubernamentales, en México se cuenta con la NOM-003-STPS-1999, Actividades agrícolas de insumos fitosanitarios o plaguicidas e insumos de nutrición vegetal o fertilizantes- condiciones de seguridad e higiene.

La sostenibilidad de la producción agrícola depende del mantenimiento del suelo y su fertilidad y la Digestión Anaerobia es una oportunidad para desarrollar alternativas para producir fertilizantes orgánicos.

## 6. CONCLUSIONES

El trabajo consistió en realizar una propuesta metodológica para la toma de decisiones en proyectos de Digestión Anaerobia de residuos sólidos urbanos. Se pretende que la metodología sirva para futuros proyectos de DA, ubicados en otros municipios.

Se realizó una matriz de decisiones como parte de la metodología propuesta, que permitió comparar y evaluar diferentes tecnologías de Digestión Anaerobia, mediante criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales. La matriz de toma de decisiones podrá emplearse en futuros proyectos de Digestión Anaerobia, siempre y cuando se considere que los criterios pueden variar dependiendo de las necesidades del proyecto.

Con base en los criterios evaluados para este proyecto, se propone al sistema seco de Digestión Anaerobia como la tecnología que presenta la mejor tratabilidad de la fracción orgánica del municipio de Ecatepec de Morelos.

De los cuatro criterios (técnicos, económicos, ambientales y sociales) evaluados, los criterios técnicos son los que garantizan que la tecnología funcione adecuadamente.

De acuerdo a la disponibilidad de espacio y la infraestructura disponible, se propuso como sitio de ubicación de la planta de Digestión Anaerobia al relleno sanitario de Santa María Chiconautla, ubicado en el Municipio de Ecatepec de Morelos.

El costo estimado de acuerdo con la bibliografía para la inversión de un digestor anaerobio de sistema seco, con un tiempo de vida útil de 20 años y que pueda tratar 50 toneladas de FORSU al día es de US \$ 4,984,172, y su costo anual de operación es de US \$ 221,519.

La energía obtenida del proceso de Digestión Anaerobia, podrá ser empleada bajo el concepto de autoabastecimiento, con lo que se reducirán los gastos de operación del digestor. También se obtendrá un digesto que puede ser empleado como fertilizante orgánico en la agricultura.

En síntesis los resultados de la evaluación económica indican que el proyecto es viable, de acuerdo a la etapa de visualización. Pues permitirá ofrecer beneficios ambientales y sociales y significativos ahorros en los costos por tratamiento y disposición final de los RSU en el Municipio de Ecatepec de Morelos.

## 7. BIBLIOGRAFIA

ARVIZU Fernández, J. (2004). *Estimación del recurso y prospectiva energética de la basura en México*. [Fecha de consulta: 29 de Agosto de 2013].

Disponible en: [http://www.sener.gob.mx/webSener/res/168/A1\\_Basura.pdf](http://www.sener.gob.mx/webSener/res/168/A1_Basura.pdf)

BACA Urbina, G. (2007). *Fundamentos de Ingeniería Económica* (3a ed.). México: McGraw Hill.

BARRADAS Rebolledo, A. (2009). *Gestión Integral de Residuos Sólidos Municipales. Estado del Arte*. Minatitlán, Veracruz. México.

BECCALI, M., CELLURA, M., & MISTRETTA, M. (2003). *Decision-making in energy planning. Application of the Electre method at regional level for the diffusion of renewable energy technology*. *Renewable Energy*, 28, 2063–2087.

BEGIC, F., & AFGAN, N. (2007). *Sustainability assessment tool for the decision making in selection of energy system—Bosnian case*. *Energy*, 32, 1979-1985.

Behzadian, M., Kazemzadeh, R., Albadvi, A., & Aghdasi, M. (2010). *PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications*. *European Journal of Operational Research*, 200, 198–215.

BIOENERGY, I. (2001). *Biogas and More*. Oxfordshire, UK: AEA Technology Environment.

BRABER, K. (1995). *Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste: A modern waste disposal option on the verge of breakthrough*. *Biomass and Bioenergy*, 19, 365-376.

BUENROSTRO, O., & BOCCO, G. (2003). *Solid waste management in municipalities in Mexico: goals and perspectives*. *Resources, Conservation and Recycling*, 251 - 263.

BUENROSTRO, O., CRAM, S., BERNACHE, G., & BOCCO, G. (2000). *La digestión anaerobia como alternativa de tratamiento a los residuos sólidos orgánicos generados en los mercados municipales*. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 16(001), 19-26.

Cámara de Diputados. (2014). *Ley General para la prevención y gestión integral de los residuos*. México.

CAMPOS, E., ELÍAS, X., & FLOTATS, X. (2012). *Procesos biológicos: La digestión anaerobia y el compostaje*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.

CAVALLARO, F., & CIRAULO, L. (2005). *A multicriteria approach to evaluate wind energy plants on an Italian island*. Energy Policy, 33, 235–244.

CHATZIMOURATIDIS, A. I., & PILAVACHI, P. A. (2008). *Multicriteria evaluation of power plants impact on the living standard using the analytic hierarchy process*. Energy Policy, 36, 1074-1089.

CHATZIMOURATIDIS, A. I., & PILAVACHI, P. A. (2009). *Sensitivity analysis of technological, economic and sustainability evaluation of power plants using the analytic hierarchy process*. Energy Policy, 37, 788-798.

CHATZIMOURATIDIS, A. I., & PILAVACHI, P. A. (2009). *Technological, economic and sustainability evaluation of power plants using the Analytic Hierarchy Process*. Energy Policy, 37, 778–787.

CHIRANGANO, M., LIU, J., AHMAD, B. A., STEPHEN, J. A., & GAVIN, M. W. (2013). *Alternative method for producing organic fertiliser from anaerobic digestion liquor and limestone powder: High Shear wet granulation*. Powder Technology, 233, 245-254.

CHOU, W.-C., LIN, W.-T., & LIN, C.-Y. (2007). *Application of fuzzy theory and PROMETHEE technique to evaluate suitable ecotechnology method: A case study in Shihmen Reservoir Watershed, Taiwan*. Ecological Engineering, 31, 269–280.

COMMUNAUTÉ Métropolitaine de Montréal. (2007). *Comparaison des technologies et des scénarios de gestion des matières résiduelles*. Montréal (Québec).

CONAPO. (2013). *Datos de Proyecciones*. [Fecha de consulta: 14 de Enero de 2013].  
 Disponible en: [http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones\\_Datos](http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones_Datos)

CONSEJERÍA de Economía, Innovación y Ciencia. (2011). *Estudio Básico del Biogás*. España: Agencia Andaluza de la Energía.

Consejería Jurídica. (2007). *Ley de Residuos Sólidos para el estado de Morelos*. Estado de Morelos: Gobierno del Estado de Morelos.

DENT, C., & KROL, A. (1990). *Municipal Solid Waste Conversion to Energy*. Biomass, 22, 307-327.

DEUBLEIN, D., & STEINHAUSER, A. (2008). *Biogas from Waste and Renewable Resources*. Alemania: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

DIAKOULAKI, D., & KARANGELIS, F. (2007). *Multi-criteria decision analysis and cost-benefit analysis of alternative scenarios for the power generation sector in Greece*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 716–727.

DINCA, C., BADEA, A., ROUSSEAU, P., & APOSTOL, T. (2007). *A multi-criteria approach to evaluate the natural gas energy systems*. *Energy Policy*, 35, 5754–5765.

Dirección General de Servicios Urbanos. (2013). *Transparencia del Gobierno del Distrito Federal*. México.

DOUKAS, H. C., ANDREAS, B. M., & PSARRAS, J. E. (2007). *Multi-criteria decision aid for the formulation of sustainable technological energy priorities using linguistic variables*. *European Journal of Operational Research*, 182, 844–855.

DURÁN Moreno, A., CASAS Gutiérrez, D., ROJAS Zamora, U., VÁZQUEZ Cuevas, G., ROA Luna, M., & ALCÁNTARA Hernández, R. (2014). *Fundamentos de Digestión Anaerobia de Residuos Sólidos Orgánicos Urbanos*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Ecatepec de Morelos. (2009). *Plan de Desarrollo Municipal, 2009-2012*. Estado de México.

EVANGELISTI, S., LETTIERI, P., BORELLO, D., & CLIFT, R. (2014). *Life cycle assessment of energy from waste via anaerobic digestion: A UK case study*. *Waste Management*, 34, 226-237.

EVANS, A., STREZOV, V., & EVANS, T. J. (2010). *Sustainability considerations for electricity generation from biomass*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 1419-1427.

FERNÁNDEZ Barberis, G., & Escribano Ródenas, M. (2006). *Nuevos criterios generalizados para modelar las preferencias del decisor en los métodos de relaciones de superación*. Madrid.

FLORES, D. (Marzo de 2001). *Guía No. 2 Para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos*. Perú.

FNR. (2010). *Guide to biogas from production to use*. Alemania: Federal Ministry for Economic Cooperation and Development.

Disponible en:

[http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/g/u/guide\\_biogas\\_engl\\_2012.pdf](http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/g/u/guide_biogas_engl_2012.pdf)

Gaceta Municipal. (2013). *Ecatepec Progreso y Bienestar 2013-2015*. Estado de México.

Gaceta Oficial del D.F. (2010). *Programa de Gestión Integral de los Residuos Sólidos para el Distrito Federal*. México.

GIRESOL. (2008). *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. [Fecha de consulta: 01 de 10 de 2013].

Disponible en:

[http://www.giresol.org/index.php?option=com\\_content&task=view&id=1034&Itemid=96](http://www.giresol.org/index.php?option=com_content&task=view&id=1034&Itemid=96)

Gobierno del Estado de México. (s.f.). *Plan de Desarrollo Municipal 2009-2012*. Estado de México: Ecatepec de Morelos.

Grupo Xaxeni S. de R.L. de C.V. (2013). *Cosechando Natural*. [Fecha de consulta: 18 de 02 de 2014].

Disponible en:

[http://www.cosechandonatural.com.mx/vermicomposta\\_tonelada\\_fm14\\_sfm27\\_prd206.html](http://www.cosechandonatural.com.mx/vermicomposta_tonelada_fm14_sfm27_prd206.html)

HERVA, M., & ROCA, E. (2013). *Ranking municipal solid waste treatment alternatives based on ecological footprint and multi-criteria analysis*. *Ecological Indicators*, 25, 77–84.

Hyder Consulting. (2007). *KOMPOGAS, Process, description and costings*. Australia: Hyder Consulting Pty Ltd.

IDAE. (2007). *Biomasa, Digestores anaerobios*. Madrid, España: Ministerio de Industria, turismo y comercio.

Disponible en:

[http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_10737\\_Biomasa\\_digestores\\_07\\_a996b846.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_digestores_07_a996b846.pdf)

IDAE. (2011). *Resumen del Plan de Energías Renovables 2011-2010*. España: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

IGLESIAS Piña, D. (2007). *Costos económicos por la generación y manejo de residuos sólidos en el municipio de Toluca, Estado de México*. *Equilibrio Económico*, 3(2), 131-148.

INEGI. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos*. Disponible en: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/15/15099.pdf>

INEGI. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Ecatepec de Morelos, México*. [Fecha de consulta: 1 de Noviembre de 2013]. Disponible en:

<http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/15/15033.pdf>

INEGI. (2011). [Fecha de consulta: 8 de Marzo de 2012].

Disponible en: [www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/.../ambiente0.doc](http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/.../ambiente0.doc)

INEGI. (2011). Estadística básica sobre medio ambiente datos de Jalisco. México.

INEGI. (2011). Residuos Sólidos Urbanos. Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales. México.

Instituto de Investigaciones Sociales. (2013). Situación actual del manejo de los residuos sólidos en el municipio de Ecatepec y Nezahualcóyotl. Estado de México, México.

JING, Y.-Y., BAI, H., & WANG, J.-J. (2012). *A fuzzy multi-criteria decision-making model for CCHP systems driven by different energy sources*. *Energy Policy*, 42, 286–296.

KALBAR, P. P., KARMAKAR, S., & ASOLEKAR, S. R. (2012). *Technology assessment for wastewater treatment using multiple-attribute decision-making*. *Technology in Society*, 34, 295–302.

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*, 100, 2355–2360.

KHALID, A., ARSHAD, M., ANJUM, M., MAHMOOD, T., & DAWSON, L. (2011). *The anaerobic digestion of solid organic waste*. *Waste Management*, 31, 1737–1744.

KHELIFI, O., DALLA Giovanna, F., VRANES, S., LODOLO, A., & MIERTUS, S. (2006). *Decision support tool for used oil regeneration technologies assessment and selection*. *Journal of Hazardous Materials*, 437–442.

KITO, S., & THOMAS, S. (2011). *Site selection criteria and Evaluation Handbook*. Alaska: Education & Early Development.

Los Municipios de México. (2013). *Municipios.mx*. [Fecha de consulta: 25 de 09 de 2013]. Disponible en: <http://www.municipios.mx/Mexico/Municipio-de-Ecatepec-de-Morelos-en-el-Estado-de-Mexico.html>

MADLENER, R., HENGGELER, A. C., & DIAS, L. C. (2009). *Assessing the performance of biogas plants with multi-criteria and data envelopment analysis*. *European Journal of Operational Research*, 197, 1084–1094.

MARTÍNEZ Fernández, J. (22 de Julio de 2012). *Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT*. [Fecha de consulta: 15 de 12 de 2012].

Disponible en:

[http://www.ine.gob.mx/descargas/dgcenica/2012\\_taller\\_msr\\_pon\\_06\\_jmartinez.pdf](http://www.ine.gob.mx/descargas/dgcenica/2012_taller_msr_pon_06_jmartinez.pdf)

Ministerio de Desarrollo Social. (s.f.). *Criterios de decisión en la evaluación de proyectos*. Chile: División de Inversiones.

MIRANDA, J. (2005). *Gestión de proyectos: Identificación, Formulación, Evaluación* (5a ed.). Colombia: MM Editores.

MONNET, F. (2003). *An introduction to anaerobic digestion of organic waste*. Remade Scotland.

MUSANGO, J., & BRENT, A. (March de 2011). A conceptual framework for energy technology sustainability assessment. *Energy for Sustainable Development*, 15(1), 84-91.

NIZAMI, A., & MURPHY, J. (2010). *What type of digester configurations should be employed to produce biomethane from grass silage?*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 1558-1568.

Organización Panamericana de la Salud. (2002). *Evaluación regional de los servicios de manejo de residuos sólidos Municipales*. México.

ORTEGA, N. (2006). *Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process*. Boca Raton, Florida: Dissertation.com.

PASCUAL, A., RUIZ, B., & GÓMEZ, P. (2011). *Situación y potencial de generación de biogás*. [Fecha de consulta: 12 de Diciembre de 2012].

Disponible en:

[http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos\\_11227\\_e16\\_biogas\\_db43a675.pdf](http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_11227_e16_biogas_db43a675.pdf)

PÉREZ Valle, E. (2013). *Propuesta de una metodología para la evaluación integral de proyectos industriales, mediante un análisis multicriterio*. Tesis (Maestría en Ingeniería Química). México: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, 2013.



Periódico Oficial. (2010). *Periódico Oficial "Tierra y Libertad"*. [Fecha de consulta: 20 de Agosto de 2013]. Disponible en: <http://periodico.morelos.gob.mx/periodicos/2010/4822>

Quinto Informe de Gobierno Federal. (2011). *Gestión Integral de los Residuos*. [Fecha de consulta: 18 de noviembre de 2012]. Disponible en: [http://quinto.informe.gob.mx/archivos/informe\\_de\\_gobierno/pdf/4\\_7.pdf](http://quinto.informe.gob.mx/archivos/informe_de_gobierno/pdf/4_7.pdf)

RAO, P. V., & BARAL, S. S. (2011). *Attribute based specification, comparison and selection of feed stock for anaerobic digestion using MADM approach*. *Journal of Hazardous Materials*, 186, 2009–2016.

REITH, J., WIJFFELS, R., & BARTEN, H. (2003). *Bio-methane and bio-hydrogen: status and perspectives of biological methane and hydrogen production*. Países Bajos: Dutch Biological Hydrogen Foundation - NOVEM.

RIUJI Lohri, C., RODIC, L., & ZURBRÜGG, C. (2013). *Feasibility assessment tool for urban anaerobic digestion in developing countries*. *Journal of Environmental Management*, 126, 122-131.

ROBLES, J. (09 de 04 de 2013). Suman un relleno sanitario más. *El Universal*.

ROSSO Pantoja, L. (2011). *El mercado de los fertilizantes en México*. México: Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en México D.F.

SAGARPA. (2012). *Abonos orgánicos*. México: Subsecretaría de Desarrollo Rural.

SALES Heredia, F. J. (2012). *Reporte CESOP*. México: Núm. 51.

SATOTO E., N. (2009). *Anaerobic digestion of organic solid waste for energy production*. Alemania: Scientific Publishing.

Secretaría General del Gobierno del Edo. de México. (2012). *Programa de protección civil para basureros, 2012*. [Fecha de consulta: 15 de agosto de 2013]. Disponible en: [www.proteccioncivil.gob.mx](http://www.proteccioncivil.gob.mx)

SEMARNAT. (2012). *Compendio de estadísticas ambientales 2012*. [Fecha de consulta: 29 de Abril de 2013]. Disponible en: [http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/Compendio\\_2012/dgeiawf.semarnat.gob.mx\\_8080/ibi\\_a\\_pps/WFServletcb21.html](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/Compendio_2012/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_a_pps/WFServletcb21.html)

SEMARNAT. (2012). *Informe de la situación del medio ambiente en México*. [Fecha de consulta: 12 de Febrero de 2013].

Disponible en: [http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_12/07\\_residuos/cap7\\_1.html](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/07_residuos/cap7_1.html)

SEMARNAT. (2013). *Conferencia Magistral*. México: Subsecretaría de Gestión para la Protección al Ambiente .

SENER. (2012). *Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026*. México: Gobierno Federal.

SHAHRIARI, H., WARITH, M., HAMODA, M., & KENNEDY, K. (2012). *Anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste combining two pretreatment modalities, high temperature microwave and hydrogen peroxide*. *Waste Management*, 32, 41-52.

STEWART, W., DIBB, D., JOHNSTON, A., & SMYTH, T. (2005). The Contribution of Commercial Fertilizer Nutrients to Food Production. *Agronomy Journal*, 97(1), 1-6.

TAMARGO, J. (2005). SEMARNAT. [Fecha de consulta: 10 de Marzo de 2012].

Disponible en:

[http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_04/introduccion/presentacion.html](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04/introduccion/presentacion.html)

TCHOBANOGLIOUS, G., THEYSEN, H., & VIGIL, S. (1993). *Integrated solid waste management*. México: McGraw-Hill.

THEMELIS, N. (2002). *Anaerobic Digestion of biodegradable organics in Municipal Solid Waste*. Columbia University: Department of Earth and Environmental Engineering.

VAN DAEL, M., VAN PASSEL, S., PELKMANS, L., GUISSON, R., REUMERMANN, P., MARQUEZ Luzardo, N., BROEZEN, J. (2013). A techno-economic evaluation of a biomass energy conversion park. *Applied Energy*, 104, 611-622.

Visual PROMETHEE. (2013). *Manual and Help file*. [Fecha de consulta: 06 de Mayo de 2013]. Disponible en: <http://www.promethee-gaia.net/files/VPManual.pdf>

WANG, J.-J., JING, Y.-Y., ZHANG, C.-F., & ZHAO, J.-H. (2009). *Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2263-2278.

WANG, J.-J., JING, Y.-Y., ZHANG, C.-F., ZHANG, X.-T., & SHI, G.-H. (2008). *Integrated evaluation of distributed triple-generation systems using improved grey incidence approach*. Energy, 33, 1427-1437.

WANNHOLT, L. (1998). *Firs digestion plant for household waste operating in Japan*. ISWA Times, 2, 26-27.

Waste Management World. (2012). *Global Municipal Solid Waste to double by 2025*. [Fecha de consulta: 27 de Marzo de 2014]. Disponible en: <http://www.waste-management-world.com/articles/2012/07/global-municipal-solid-waste-to-double-by-2025.html>

Weltec Biopower . (2012). *Weltec*. [Fecha de consulta: 10 de Diciembre de 2012]. Disponible en: <http://www.weltec-biopower.com/>

YANG, J., CHEN, W., CHEN, B., & JIA, Y. (2012). *Economic feasibility analysis of a renewable energy project in the rural China*. Procedia Environmental Sciences, 13, 2280-2283.

YOSHIDA, H., GABLE, J., & PARK, J. (2012). *Evaluation of organic waste diversion alternatives for greenhouse gas reduction*. Resources, Conservation and Recycling, 60, 1-9.

## ANEXOS

### Anexo 1: Lista de las tecnologías de DA más importantes a nivel internacional

	Nombre de la Compañía	Ciudad		Nombre de la Compañía	Ciudad
1	AAT Abwasser- und Abfalltechnik	Austria	55	Krieg & Fischer	Alemania
2	Active Compost	Reino Unido	56	Krüger	Dinamarca
3	ADI Systems	Canadá	57	Larsen Engineering	EUA
4	Agri-Biosystems	EUA	58	Linde KCA	Alemania
5	Agri Waste Technology	EUA	59	Lipp	Alemania
6	Alkane Biogas	Reino Unido	60	Lotepro Environmental Systems	EUA
7	Alpha Umwelttechnik	Suiza	61	MAT Müll- und Abfalltechnik (MAT)	Alemania
8	AnDigestion	Reino Unido	62	MCX Environmental Energy	EUA
9	ARCADIS	Países Bajos	63	MT-Energy	Alemania
10	ArrowBio	Israel	64	Nelleman, Nielsen & Rauschenberger (NNR)	Dinamarca
11	Bedfordia Biogas	Reino Unido	65	Newbio NBE	EUA
12	BEG Bioenergie	Alemania	66	NIRAS	Dinamarca
13	Bekon Energy Technologies	Alemania	67	Novatech	Alemania
14	BioFerm	Alemania	68	Oaktech	Reino Unido
15	Biogas Nord	Alemania	69	Onsite Power Systems	EUA
16	BiogaS int	Países Bajos	70	Organic Power	Reino Unido
17	Bioplan	Dinamarca	71	Organic Resource Technology	Australia
18	Bioplex	Reino Unido	72	Organic Waste Systems (OWS) (DRANCO)	Bélgica
19	Bioscan	Dinamarca	73	OrgaWorld	Países Bajos
20	Biotech Sistemi	Italia	74	Oswald Green	EUA
21	Brouwers BioEnergy	Países Bajos	75	Oswald Schulze	Alemania
22	BRV Biowaste Technologies	Suiza	76	Paques	Países Bajos

	<b>Nombre de la Compañía</b>	<b>Ciudad</b>		<b>Nombre de la Compañía</b>	<b>Ciudad</b>
23	Biotechnische Abfallverwertung (BTA)	Alemania	77	Pinnacle Biotechnologies Int.	EUA
24	Burmeister & Wain Scandinavia	Dinamarca	78	PlanET Biogastechnik	Alemania
25	Cambi	Norway	79	Projectrör	Suecia
26	CG Jensen - AN biotec	Dinamarca	80	Proserpol	Francia
27	Clarke Energy / Clarke Haase	Reino Unido	81	Purac AB	Suecia
28	Citec	Finlandia	82	Purac Ltd	Reino Unido
29	DSD Gas und Tankanlagenbau	Alemania	83	RCM	EUA
30	EcoCorp	EUA	84	RefCom	EUA
31	Eco-Technology JVV (EcoTec)	Finlandia	85	RosRoca	Alemania
32	Energy Group (EnergiGruppen) Jutland	Dinamarca	86	RPA (Risanamento Protezione Ambiente) SpA	Italia
33	Enpure	Reino Unido	87	RTS ( Reliant Technical Services)	Reino Unido
34	Entec Umwelttechnik	Austria	88	Schmack	Alemania
35	Entek BioSystems	EUA	89	Schradenbiogas	Alemania
36	Enviro-Control	Reino Unido	90	Schwarting Umwelt	Alemania
37	Environmental Energy Corporation	EUA	91	Seghers Keppel	Bélgica
38	Farmatic Biotech Energy	Alemania	92	Sharp Energy	EUA
39	Farmatic Anlagenbau	Alemania	93	Strabag	Reino Unido
40	Farmatic Biotech Energy UK	Reino Unido	94	Sustainable waste systems	Reino Unido
41	Gas & Technology Institute (GTI)	EUA	95	Super Blue Box (SUBBOR) Recycling Corp	Canadá
42	GBU	Alemania	96	Thöni Industriebetriebe	Austria
43	Global Renewables	Australia	97	TBW	Alemania
44	Greenfinch	Reino Unido	98	Umwelt Technik Süd (UTS)	Alemania
45	Grontmij Vandenbroek International, Grontmij Water and Waste Management	Países bajos	99	Unisyn Biowaste Technology	EUA
46	Haase	Alemania	100	Valorga	Francia

	Nombre de la Compañía	Ciudad		Nombre de la Compañía	Ciudad
47	Harvestore Deutschland	Alemania	101	Van Boekel Zeeland	Países Bajos
48	Hese	Alemania	102	Vinci	Francia
49	Horstmann Recyclingtechnik	Alemania	103	Weda UK	Reino Unido
50	IBtech	México	104	Wehrle Umwelt GmbH	Alemania
51	Ionics Italba	Italia	105	Weltec	Alemania
52	ISKA (U-Plus Umweltservice)	Alemania	106	Xergi	Dinamarca
53	Jysk Biogas	Dinamarca	107	YIT	Finlandia
54	Kompogas	Suiza			

**Fuente:** Juniper Consultancy Services Ltd.

## Anexo 2: Inventario de plantas de Digestión Anaerobia

	BTA	Dranco	Krieg & Fischer	Weltec	Kompogas	Valorga	Strabag	Ros Roca
Alemania	25	7	105	54	14	3	9	6
Australia	1							
Austria	1	2	1		3		1	1
Bélgica	1	3		1		1		1
Bulgaria			1					
Caribe					1			
China						2		
Chipre				7				
Estonia								1
España	3	3	8		1	5	3	9
Escocia	1						1	
Eslovaquia			1					
Francia		1	2	4	4	11	1	
Finlandia				2				
Grecia				3				
Holanda					4	1		
Hungría				3				
Irlanda			1					
Italia	3	1	4	2	4	1	1	2
Japón	3	1	2		3		1	
Corea	1	2						
Letonia				2				
Lituania			1					
Luxemburgo	1							1
Países bajos		2						
Polonia	2	1		1	1			1
Portugal	2	1				1		3
Reino Unido	2	1	3	9		1	2	2
Republica Checa				7				
Rusia			1					
Suecia				2				1
Suiza		2	1	3	25	1	1	
USA			1	2				
Canadá	2		2					
Sudamérica				1				
<b>TOTAL</b>	<b>48</b>	<b>27</b>	<b>134</b>	<b>103</b>	<b>60</b>	<b>27</b>	<b>20</b>	<b>28</b>

### Anexo 3: Descripción de tecnologías de Digestión Anaerobia

**Tecnología:** VALORGA International  
**Tipo de proceso:** Seco

Desde 2005 Valorga International es subsidiaria de Urbaser Environnement SAS (compañía Española especializada en la gestión y el tratamiento de residuos).

#### Descripción del proceso

Los residuos son pretratados de forma eficiente para remover todos los materiales reciclables antes del proceso de digestión. En esta fase se incluyen mecanismos de pulverización y clasificación, comenzando por un tanque que contiene un tromel de 6 pulgadas y otro con una malla de 2.4 pulgadas con cuchillas para rasgar las bolsas de plástico que aún contengan residuos, separadores magnéticos, y mesas de clasificación manuales operando en paralelo para separar los residuos reciclables de mayor tamaño. Los residuos son mezclados por medio de la recirculación del biogás presurizado. Esta corriente inyecta biogás comprimido a 5 atmósferas de presión en el fondo de los digestores, donde hay aproximadamente 200 puntos de inyección.

Aproximadamente 45 % de los sólidos que se reciben en las plantas son rechazados (incluyendo las bolsas que contienen los residuos) debido a que son materiales no reciclables, además de los materiales reciclables que son recuperados los cuales corresponden al 5 % del total de residuos. El 50 % restante es llevado a los digestores para la DA.

La temperatura del digestor se mantiene en 37 °C (rango mesofílico), aunque también pueden operar en el rango termofílico sin requerir de modificaciones considerables. El volumen de los digestores se encuentra entre 2,000 y 4,500 m<sup>3</sup>, con una relación longitud sobre diámetro de 1/4. El tiempo de residencia varía de acuerdo a la cantidad de residuos alimentados que se encuentra desde 20 hasta 30 días.

La producción de biogás en promedio es de 100 Nm<sup>3</sup>/ton de alimentación al digestor. Su contenido es de 65 % de CH<sub>4</sub>, 35 % de CO<sub>2</sub> y 2,000 a 3,000 ppm de H<sub>2</sub>S, por lo que es necesaria una desulfuración biológica hasta 200 ppm antes de que el biogás sea utilizado para



la cogeneración de energía eléctrica y calor. Una planta con este proceso produce en promedio 4 MW de energía eléctrica equivalente a 59.98 barriles de petróleo al año.

El post-tratamiento representa una parte significativa del proceso. El efluente de cada digestor es deshidratado por medio de una serie de filtro-prensas para separar la fase líquida de la sólida. La fase líquida filtrada se lleva a dos secadoras centrífugas en serie; una parte de éste se utiliza para la dilución de la alimentación al digestor y otra se desecha. Los sólidos recuperados en los filtros-prensa y en las secadoras centrífugas reciben un tratamiento aerobio, el cual es realizado en túneles cerrados en presencia de oxígeno, a una temperatura de 40 °C durante un periodo de dos semanas, esta etapa es necesaria para garantizar la estabilización total de la composta y así ser un producto utilizable por la industria agrícola.

### Referencias

La tecnología Valorga ha construido plantas de DA con una capacidad para tratar desde 10,000 hasta 300,000 toneladas de residuos al año.

Ubicación	Capacidad (ton/año)	Alimentación	Arranque	Digestores (m <sup>3</sup> )	Tiempo de retención (días)	Biogás (Nm <sup>3</sup> /ton)
Barcelona, España	218,000	FORSU pretratada	2004	3 x 4,500	25	114
Hannover, Alemania	100,000	FORSU pretratada	2005	3 x 4,200	25	90
Amiens, Francia	85,000	FORSU pretratada	1998	2 x 2,400 y 1 x 3,500	20-22	130
Tilburg, Países bajos	52000	Residuos de vegetales, jardinería y de fruta	1994	2 x 3300m <sup>3</sup>	20	70
Abrunheira, Portugal	160 000	FORSU	2010	2 x 3 700	20-22	130-150
Shangai, China	227 500	FORSU	2008	6 x 4 500	25	100
Geneva, Suiza	10 000	Biosólidos	2000	1 x 1 300	24	110 - 120

**Tecnología:** BTA International GmbH  
**Tipo de proceso:** Húmedo

BTA International GmbH es una de las compañías más avanzadas en cuanto al tema de digestión anaerobia. La compañía surgió en 1984, Alemania. En 1991, construyó y puso en marcha la primera planta de DA para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos.

Los digestores generalmente se construyen de concreto y están térmicamente aislados; en promedio, cada digestor tiene una capacidad de 1800 m<sup>3</sup> y están equipados con sistemas mecánicos de agitación.

### **Descripción del proceso**

El proceso BTA está compuesto por dos etapas principales, el pretratamiento hidromecánico y la etapa de digestión. El pretratamiento húmedo BTA se lleva a cabo en dos fases:

En la primera se forma una suspensión de toda la materia orgánica fermentable contenida en los residuos al agregar la cantidad de agua para formar una pulpa con 8.5 % de ST y 75 % de SV aproximadamente. Este proceso se realiza mediante el equipo “BTA Waste Pulper”, que se encarga de transformar un flujo de residuos de distinta composición en una pulpa orgánica homogénea, con aproximadamente un 10 % de ST y un tamaño de partícula máximo de 10 mm.

En la segunda fase, la fracción fermentable es separada de la no fermentable, es decir, se separan los inorgánicos restantes y la arena que contengan los residuos orgánicos. Este procedimiento se realiza mediante otro equipo, el “BTA Grit Removal System”, un separador hidrodinámico que permite remover los residuos pequeños (arena, fragmentos de vidrio y materiales inertes) que aún están presentes en la suspensión.

Con el fin de utilizar el subproducto producido directamente como fertilizante líquido o como composta en el sector agrícola, la suspensión resultante de la DA es sometida a una fase de pasteurización, la cual es necesaria para la eliminación de agentes patógenos. Para esta fase la suspensión se calienta hasta los 70 °C y se mantiene esta temperatura durante una hora, por tanto se requiere de tres tanques en operación por lotes. Después de esta fase, la suspensión pasteurizada se bombea hacia los digestores, antes de llegar a estos se encuentra un tanque donde se mezcla la corriente pasteurizada con una corriente que recircula el lodo, para formar una suspensión “amortiguadora” de nutrientes para el proceso. La temperatura del proceso de digestión se mantiene a 37 °C. El lodo remanente en los digestores se lleva a

un filtro prensa para separar la fase líquida de la fase sólida. La fase líquida se envía a tanques acumuladores y puede ser utilizada directamente en el sector agricultor como fertilizante, además de recircularse hacia el pretratamiento. La fase sólida es sometida a un tratamiento aerobio, el cual permite la generación de composta de alta calidad.

El biogás producido se acumula en recipientes anclados a la estructura superior de los digestores, los cuales son membranas elásticas capaces de expandirse al aumentar la cantidad de biogás generado. El volumen máximo de almacenamiento de estos recipientes para cada digestor es de 500 m<sup>3</sup> aproximadamente. El biogás acumulado se lleva a un proceso biológico de desulfuración, donde el H<sub>2</sub>S se convierte en azufre elemental. Después del proceso de desulfuración, el biogás es enviado a la unidad de cogeneración para producir electricidad y calor a través de motores de combustión interna. En promedio, las plantas BTA constan de dos o más motores de 1.5 MW de capacidad aproximadamente. Una pequeña parte de la energía eléctrica generada es consumida por la misma planta y la restante se alimenta a la red local. La energía térmica se consume en gran parte por el acondicionamiento de las corrientes del proceso de digestión y saneamiento, y en casos de instalaciones localizadas en países nórdicos, también es empleada para calefacción.

La tecnología cuenta con certificaciones de la European Compost Network e.V., y del Center for Research, Education and Demonstration in Waste Management, además de ser Miembro del German Biogas Association,

### Referencias

Localización	Capacidad (ton/año)	Tipo de residuos	Año	Secciones de la planta
Dietrichsdorf, Alemania	17,000	FORSU, residuos comerciales y de comida	1995	Recepción de residuos. Pretratamiento hidromecánico. Digestión y Separación sólido-líquido. Compostaje del lodo digerido.
Castelleone, Italia	100,000	FORSU, residuos de agricultura y ganado.	2010	Recepción de residuos. Pretratamiento hidromecánico. DA de una etapa húmeda. Separación sólido-líquido.
Kirchstockach, Alemania	30,000	Biosólidos	1997	Recepción de residuos. Pretratamiento hidromecánico. DA de dos etapas, que trabajan en condiciones mesofílicas.
Mülheim a.d. Ruhr, Alemania	22,000	Residuos comerciales y de comida	2003	Recepción de residuos. DA de una etapa húmeda, bajo condiciones mesofílicas.
Leoben, Austria	18,000	Biosólidos	2009	Recepción de residuos. Pretratamiento mecánico, DA, y compostaje.
Toronto Dufferin	25,000	Residuos orgánicos	2002	Recepción de residuos. Pretratamiento hidromecánico BTA

**Tecnología: DRANCO**

**Tipo de proceso: Seco**

DRANCO (*DRy ANaerobic COMposting*) es una compañía especializada en el tratamiento biológico de sustratos sólidos y semisólidos con un porcentaje de ST mayor al 20 %. La tecnología fue desarrollada optimizando los parámetros de la DA seca que tienen lugar en un relleno sanitario. Primero se realizaron experimentos por lotes que permitían que el proceso de digestión se completara durante un periodo de 2 a 5 años, posteriormente se realizaron mejoras al proceso por lotes y se alcanzaron tiempos de 6 meses, luego de 3 meses, hasta un tiempo de digestión de 2 a 3 semanas, lo que hizo posible un proceso continuo.

### **Descripción del proceso**

El proceso consiste en una digestión con condiciones termofílicas de una sola etapa, seguida por otra etapa corta de maduración aerobia (compostaje). Para que se lleve a cabo la digestión, el tamaño de partícula de los residuos sólidos orgánicos debe reducirse a menos de 40 mm, por lo que los residuos de mayor tamaño como los plásticos y los textiles se separan o se reduce su tamaño a través de una trituradora, los materiales metálicos y los no metálicos son recuperados para procesos de reciclaje, mientras que las piedras, fragmentos de vidrio y los plásticos duros son eliminados lo más eficientemente posible. El proceso puede manejar altas concentraciones de materiales no biodegradables, sin embargo remover este tipo de materiales aumenta el consumo de energía y la abrasión de los equipos. El pretratamiento que se le da a los residuos sólidos varía dependiendo de las condiciones y composición de estos.

Los residuos pretratados son mezclados con una considerable cantidad de lodo proveniente de una recirculación del efluente del digestor. La relación de mezclado de residuo pretratado y de lodo digerido recirculado es aproximadamente de 1/6-8; esto se lleva a cabo dentro de un mezclador donde se utiliza un sistema de inyección de vapor con el cual se eleva la temperatura a un intervalo entre 50 y 55 °C, la temperatura dentro del digestor se mantiene debido a que los residuos contienen altas concentraciones de ST y por lo tanto reducen las pérdidas de calor por convección, aunque debe estar aislado térmicamente para permitir que la temperatura sea constante durante varios días y no causar una alteración en el proceso bioquímico. La corriente mezclada ingresa al digestor transcurren entre dos y cuatro días dependiendo de la velocidad de alimentación, para que ésta llegue al fondo el descenso ocurre

solamente por gravedad y no se utiliza ningún equipo de mezclado o inyección de biogás presurizado. El tiempo de retención es de 20 días. La mezcla precalentada de los residuos y el lodo digerido recirculado se bombea hacia la parte superior del digestor a través de tres tubos que se insertan desde la parte inferior hasta llegar aproximadamente a 1 m del techo del reactor, estos tubos tienen un diámetro demasiado amplio (30 pulgadas), que permite minimizar la fricción y por tanto el consumo de energía en el bombeo. El biogás sale por la parte superior para ser tratado y almacenado, mientras que el lodo sale por el fondo a través de tornillos instalados en la base cónica del reactor anaerobio, en donde la pequeña parte de éste que no se recircula se traslada a un tratamiento de compostaje.

Los residuos que ingresan al digestor se mueven en dirección vertical desde la parte superior hasta el fondo. La operación con residuos de tales concentraciones permite una mayor producción de biogás, que es aproximadamente de 10 m<sup>3</sup> por cada m<sup>3</sup> de volumen ocupado en el digestor por día. Dranco sugiere que para una planta de digestión anaerobia que trate 50,000 toneladas por año, se considere un tamaño de terreno de aproximadamente 10,000 metros cuadrados, este espacio será suficiente para el reactor vertical (aproximadamente 400 metros cuadrados), espacio para oficinas, área de recepción y procesamiento de materia prima.

La compañía reporta que la producción de electricidad está en un rango de 0.15 a 0.32 MWh/ton).

La tecnología Dranco cuenta con la ISO 17025, Vincotte, OVAM, TUV Rheinland

### Referencias

Ubicación	Capacidad (ton/año)	Alimentación	Año	Digestores (m <sup>3</sup> )	Tiempo de retención (días)	Biogás (Nm <sup>3</sup> /ton)
Bassum, Alemania	105,000	RSU, residuos industriales.	1997	1 x 1,500	20	100
Alicante, España	180,000	RSU residuos de papel y cartón	2008	1 x 2,600	25 a 30	150
Pohlsche-Heide, Alemania	100,000	RSU	2005	1 x 2,260	23	100
BRECHT II, Bélgica	55,000	RSU	2000	NE	20	122

**Tecnología: KOMPOGAS**

**Tipo de proceso: Seco**

La compañía se cataloga como líder en tecnología de DA seca, con experiencia en planeación, diseño, construcción y operación de plantas para obtener energía a partir de la digestión de residuos orgánicos. En 2006 Kompogas se unió al grupo Axpo (compañía líder en energías renovables en Suiza), con el cual se obtuvieron los recursos suficientes para seguir desarrollando la tecnología y perfeccionando el proceso, además de la búsqueda de nuevos mercados en el mundo. La tecnología Kompogas utiliza al máximo el potencial energético de los residuos orgánicos. Una tonelada de RSU puede llegar a producir entre 100 y 140 Nm<sup>3</sup> de biogás con un contenido de metano de aproximadamente 60 % de metano en promedio, lo que corresponde a aproximadamente 70 litros de petróleo. La construcción modular de las plantas las hace compactas, por lo que no ocupan mucho espacio; incluso, si ya se cuenta con una planta de compostaje, se puede complementar con un módulo de digestión para la producción de biogás, el material del que están hechas las plantas pueden ser de concreto o de acero.

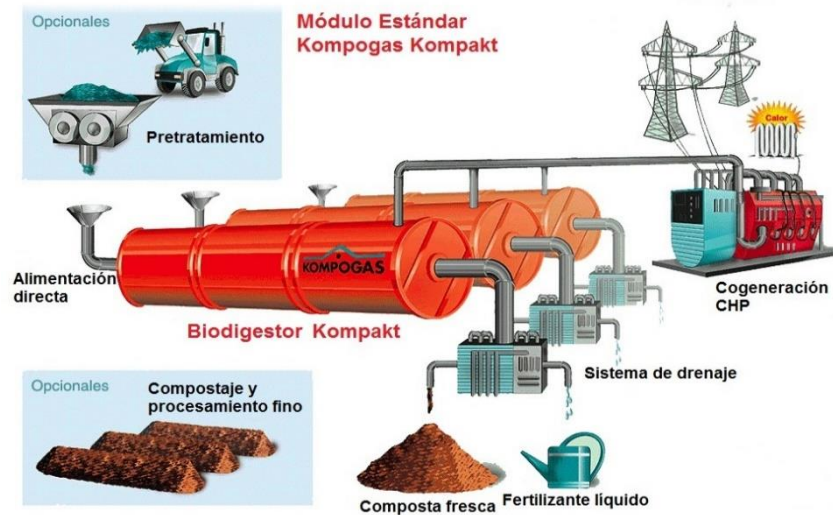
Las plantas de DA Kompogas están diseñadas para recibir los residuos durante el turno de día de Lunes a Viernes. El proceso tiene la capacidad de operar totalmente automatizado durante los 365 días las 24 horas, el único requisito es que cuente con al menos dos operadores por día, lo que se minimizarán los costos operacionales, y con un sistema de alarma de emergencia como respaldo.

### **Descripción del proceso**

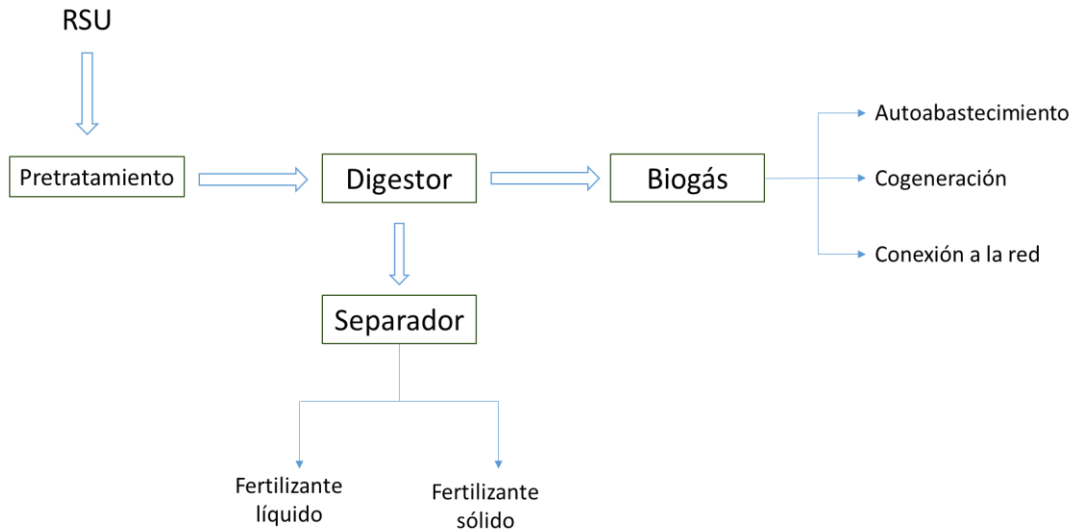
El proceso Kompogas es un sistema de una sola etapa, que opera a temperaturas termofílicas entre 55 °C y 60 °C (la temperatura es controlada por un sistema de calentamiento en las paredes del digestor), el tiempo de residencia es de 14 días, lo que asegura una producción óptima y una pasteurización completa de los residuos. El principal componente del sistema KOMPOGAS es el digestor, donde se lleva a cabo la fermentación del material orgánico. El diseño es horizontal y tiene un sistema de flujo pistón. Estos residuos recolectados se depositan en un “búnker” cuyo tamaño depende de la capacidad de la planta y el bunker tiene instalados sensores que registran los materiales orgánicos contenidos en cada descarga. Una vez descargados los residuos, una grúa se encarga de transportarlos a la siguiente etapa donde

son triturados y filtrados. Este primer sistema en la planta permite una carga totalmente automática para poder tener una producción continua durante todo el año. Así también la trituradora permite obtener un tamaño de partícula de 60 mm aproximadamente y las partículas mayores a este tamaño son separadas a través de un filtro y regresadas al búnker para volver al proceso de trituración. Materiales inorgánicos o no degradables pueden tolerarse durante el proceso, sin embargo se recomienda que si la cantidad de estos es elevada sea añadida una etapa de selección, ya sea manual o automática.

Después de la etapa de filtración los residuos ingresan al digestor por medio de bandas transportadoras. Una parte del efluente del digestor se recircula y se mezcla con la alimentación para inocular y acelerar el proceso de digestión; al mismo tiempo se añade agua para asegurar un porcentaje óptimo de ST.



Proceso Kompostogas



El biogás producido en el digestor se utiliza para generar calor y energía eléctrica en una unidad de cogeneración (CHP), aunque también puede tratarse para elevar el porcentaje de metano y así poder unirse a la red municipal de gas natural o utilizarse como combustible para automóviles. Una pequeña porción del calor y la electricidad generada se emplea en la misma planta para hacerla autosuficiente. El lodo extraído del digestor se lleva a un filtro prensa para separarlo en una fase sólida y otra líquida, donde la cantidad de ST de la fase sólida puede ajustarse directamente en el filtro prensa. Esta fase puede llevarse a una etapa de compostaje en túneles con presencia de oxígeno para estabilizar el subproducto, mientras que la fase líquida puede ser utilizada directamente como fertilizante. El aire utilizado en los túneles es purificado por medio de un “biofiltro” para poder ser liberado al ambiente.

Las plantas KOMPOGAS, deben de considerar el área de recepción de residuos, un removedor de contaminantes, área de fermentación y un cuarto de control, en caso de que ocurra un mal funcionamiento, se activará una alerta. Durante las noches y los fines de semana la planta podrá operar completamente de manera automatizada.

En la siguiente tabla se resume un estimado del balance de masa. El estimado puede cambiar dependiendo de la composición de la materia prima que ingresa al digestor.

La tecnología cuenta con la ISO 9001: 2008, ISO 14001:2004, y un certificado de calidad, otorgado por la Swiss Association for Quality and Management Systems.



### Referencias

Ubicación	Capacidad (ton/año)	Alimentación	Año	Digestores	Tiempo de retención (días)	Biogás (Nm <sup>3</sup> /ton)
Otelfingen	13,800	70% Residuos agrícolas, 30% FORSU	1996	Concreto	14 - 20	120
Lenzburg	5,000	FORSU	2005	Acero	15	105
Villeneuve	20,000	FORSU	2010	Acero	14 a 18	105 - 115

#### Anexo 4: Evaluación de tecnologías

#### Evaluación Preliminar

Criterios excluyentes	WELTEC		BTA		KRIEG & FISCHER		VALORGA	
	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No
Experiencia en el tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos	😊		😊		😊		😊	
Suficiente información en el proceso de operación		😞	😊			😞	😊	
Experiencia internacional de la tecnología (Más de 40 plantas)	😊		😊		😊			😞
Certificados de calidad reportados (más de 2)		😞	😊			😞		😞
Tecnología patentada		😞	😊			😞	😊	

Criterios excluyentes	DRANCO		KOMPOGAS		ROS ROCA		STRABAG	
	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No
Experiencia en el tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos	😊		😊		😊		😊	
Suficiente información en el proceso de operación	😊		😊			😞		😞
Experiencia internacional de la tecnología (Más de 40 plantas)		😞	😊			😞		😞
Certificados de calidad reportados (más de 2)	😊		😊		😊	😞		😞
Tecnología patentada	😊		😊		😊		😊	

## Evaluación Final

Tecnología Seca -DRANCO-								
Criterios	Peso CG	Peso TSJ	Peso AVM	Subcriterios	Escala	Valor CG	Valor TSJ	Valor AVM
<b>Técnicos</b>	50	30	30	Pre o post tratamiento	5 puntos	3	2	4
				Equipo	5 puntos	4	4	3
				Flexibilidad del proceso	5 puntos	4	3	4
				Actualización de la tecnología	5 puntos	4	3	3
				Información técnica	5 puntos	2	3	2
				Temperatura de trabajo adecuada	5 puntos	4	3	3
				Tiempo de retención (días)	Puntual	20	20	20
				Energía recuperada (kWh/ton)	Puntual	760	760	760
				Rendimiento de biogás (m <sup>3</sup> /ton)	Puntual	110	110	110
				Mano de obra requerida	Puntual	3	3	3
				Número de plantas construidas	Puntual	27	27	27
<b>Económicos</b>	30	25	35	Costo de operación (dolares/ton)	Puntual	83.94	83.94	83.94
				Costo de instalación	Puntual	8.418	8.418	8.418
<b>Ambientales</b>	10	25	25	Generación de olores	5 puntos	4	3	2
				Uso de suelo	5 puntos	3	3	3
				Emisiones de GEI (CO <sub>2</sub> eq / ton)	Puntual	226	226	226
				Contaminación al agua	5 puntos	3	4	3
				Gasto de agua	5 puntos	3	3	4
<b>Sociales</b>	10	20	10	Aceptación de la ciudadanía	5 puntos	4	3	3
				Credibilidad del proyecto	5 puntos	4	3	3
				Contribución a la infraestructura	5 puntos	4	3	3
				Mejora de condiciones de salud	5 puntos	3	5	3
				Contribución a la sociedad	5 puntos	4	5	3

CG: Maestro Constantino Gutiérrez

TSJ: Doctora Turpin Marion Sylvie Jeanne

AVM: Doctora Alethia Vázquez Morillas

Tecnología Seca -VALORGA-								
Criterios	Peso CG	Peso TSJ	Peso AVM	Subcriterios	Escala	Valor CG	Valor TSJ	Valor AVM
<b>Técnicos</b>	50	30	30	Pre o post tratamiento	5 puntos	3	3	2
				Equipo	5 puntos	3	4	4
				Flexibilidad del proceso	5 puntos	4	4	3
				Actualización de la tecnología	5 puntos	4	3	3
				Información técnica	5 puntos	2	3	3
				Temperatura de trabajo adecuada	5 puntos	4	4	4
				Tiempo de retención (días)	Puntual	21	18-25	18-25
				Energía recuperada (kWh/ton)	Puntual	700	700	700
				Rendimiento de biogás (m <sup>3</sup> /ton)	Puntual	120	120	120
				Mano de obra requerida	Puntual	4	4	4
				Número de plantas construidas	Puntual	27	27	27
<b>Económicos</b>	30	25	35	Costo de operación (dolares/ton)	Puntual	92.06	92.06	92.06
				Costo de instalación ( millones \$)	Puntual	24.15	24.15	24.15
<b>Ambientales</b>	10	25	25	Generación de olores	5 puntos	4	3	2
				Uso de suelo	5 puntos	3	3	3
				Emisiones de GEI (CO2 eq / ton)	Puntual	228	228	228
				Contaminación al agua	5 puntos	3	3	2
				Gasto de agua	5 puntos	3	3	3
<b>Sociales</b>	10	20	10	Aceptación de la ciudadanía	5 puntos	4	3	3
				Credibilidad del proyecto	5 puntos	4	3	3
				Contribución a la infraestructura	5 puntos	3	3	3
				Mejora de condiciones de salud	5 puntos	4	5	3
				Contribución a la sociedad	5 puntos	4	5	3

CG: Maestro Constantino Gutiérrez

TSJ: Doctora Turpin Marion Sylvie Jeanne

AVM: Doctora Alethia Vázquez Morillas

Tecnología Húmeda -BTA-								
Criterios	Peso CG	Peso TSJ	Peso AVM	Subcriterios	Escala	Valor CG	Valor TSJ	Valor AVM
<b>Técnicos</b>	50	30	30	Pre o post tratamiento	5 puntos	2	3	4
				Equipo	5 puntos	4	4	3
				Flexibilidad del proceso	5 puntos	3	4	4
				Actualización de la tecnología	5 puntos	4	3	3
				Información técnica	5 puntos	2	2	3
				Temperatura de trabajo adecuada	5 puntos	4	4	4
				Tiempo de retención (días)	Puntual	12	12	12
				Energía recuperada (kWh/ton)	Puntual	700	700	700
				Rendimiento de biogás (m <sup>3</sup> /ton)	Puntual	120	120	120
				Mano de obra requerida	Puntual	5	5	5
				Número de plantas construidas	Puntual	48	48	48
<b>Económicos</b>	30	25	35	Costo de operación (dolares/ton)	Puntual	128.61	128.61	128.61
				Costo de instalación ( millones \$)	Puntual	27	27	27
<b>Ambientales</b>	10	25	25	Generación de olores	5 puntos	4	4	3
				Uso de suelo	5 puntos	3	3	3
				Emisiones de GEI (CO <sub>2</sub> eq / ton)	Puntual	212	212	212
				Contaminación al agua	5 puntos	3	3	2
				Gasto de agua	5 puntos	2	2	2
<b>Sociales</b>	10	20	10	Aceptación de la ciudadanía	5 puntos	4	3	4
				Credibilidad del proyecto	5 puntos	4	3	4
				Contribución a la infraestructura	5 puntos	3	3	4
				Mejora de condiciones de salud	5 puntos	3	5	4
				Contribución a la sociedad	5 puntos	4	5	4

CG: Maestro Constantino Gutiérrez

TSJ: Doctora Turpin Marion Sylvie Jeanne

AVM: Doctora Alethia Vázquez Morillas

Tecnología Seca -KOMPOGAS-								
Crterios	Peso CG	Peso TSJ	Peso AVM	Subcriterios	Escala	Valor CG	Valor TSJ	Valor AVM
<b>Técnicos</b>	50	30	30	Pre o post tratamiento	5 puntos	3	3	2
				Equipo	5 puntos	3	4	4
				Flexibilidad del proceso	5 puntos	4	4	3
				Actualización de la tecnología	5 puntos	4	3	4
				Información técnica	5 puntos	2	3	3
				Temperatura de trabajo adecuada	5 puntos	4	4	3
				Tiempo de retención (días)	Puntual	15-20	15-20	15-20
				Energía recuperada (kWh/ton)	Puntual	585	585	585
				Rendimiento de biogás (m <sup>3</sup> /ton)	Puntual	100	100	100
				Mano de obra requerida	Puntual	3	3	3
				Número de plantas construidas	Puntual	60	60	60
<b>Económicos</b>	30	25	35	Costo de operación (dolares/ton)	Puntual	85.29	85.29	85.29
				Costo de instalación	Puntual	5.3	5.3	5.3
<b>Ambientales</b>	10	25	25	Generación de olores	5 puntos	3	4	4
				Uso de suelo	5 puntos	3	3	3
				Emisiones de GEI (CO <sub>2</sub> eq / ton)	Puntual	208	208	208
				Contaminación al agua	5 puntos	3	4	3
				Gasto de agua	5 puntos	3	3	4
<b>Sociales</b>	10	20	10	Aceptación de la ciudadanía	5 puntos	4	3	4
				Credibilidad del proyecto	5 puntos	4	3	4
				Contribución a la infraestructura	5 puntos	4	3	3
				Mejora de condiciones de salud	5 puntos	4	5	3
				Contribución a la sociedad	5 puntos	4	5	3

CG: Maestro Constantino Gutiérrez

TSJ: Doctora Turpin Marion Sylvie Jeanne

AVM: Doctora Alethia Vázquez Morillas

## Anexo 5: Flujo de caja

Concepto	Años							
	0	1	2	3	4	5	6	7
Costo total de Inversión	<b>\$4,984,172</b>							
Costos de O & M		\$221,519	\$221,519	\$221,519	\$221,519	\$221,519	\$221,519	\$221,519
Costos de mano de obra		\$430,263	\$430,263	\$430,263	\$430,263	\$430,263	\$430,263	\$430,263
Total de costos		\$651,782	\$651,782	\$651,782	\$651,782	\$651,782	\$651,782	\$651,782
Beneficios		\$1,758,349	\$1,758,349	\$1,758,349	\$1,758,349	\$1,758,349	\$1,758,349	\$1,758,349
<b>Flujo neto corregido</b>	<b>-\$4,984,172</b>	\$1,106,568	\$1,106,568	\$1,106,568	\$1,106,568	\$1,106,568	\$1,106,568	\$1,106,568
<b>VP</b>	<b>-\$4,984,172</b>	\$988,007	\$882,149	\$787,633	\$703,244	\$627,896	\$560,622	\$500,555
<b>Acumulado</b>	<b>-\$4,984,172</b>	<b>-\$3,996,165</b>	<b>-\$3,114,016</b>	<b>-\$2,326,383</b>	<b>-\$1,623,140</b>	<b>-\$995,244</b>	<b>-\$434,622</b>	\$65,933

Concepto	Años							
	8	9	10	11	12	13	14	15
Costos de O & M	\$221,519	\$221,519	\$221,519	\$221,519	\$221,519	\$221,519	\$221,519	\$221,519
Costos de mano de obra	\$430,263	\$430,263	\$430,263	\$430,263	\$430,263	\$430,263	\$430,263	\$430,263
Total de costos	\$651,782	\$651,782	\$651,782	\$651,782	\$651,782	\$651,782	\$651,782	\$651,782
Beneficios	\$1,758,349	\$1,758,349	\$1,758,349	\$1,758,349	\$1,758,349	\$1,758,349	\$1,758,349	\$1,758,349
<b>Flujo neto corregido</b>	\$1,106,568	\$1,106,568	\$1,106,568	\$1,106,568	\$1,106,568	\$1,106,568	\$1,106,568	\$1,106,568
<b>VP</b>	\$446,924	\$399,039	\$356,285	\$318,112	\$284,028	\$253,597	\$226,426	\$202,166
<b>Acumulado</b>	\$512,857	\$911,896	\$1,268,182	\$1,586,293	\$1,870,322	\$2,123,918	\$2,350,344	\$2,552,510

Concepto	Años							
	16	17	18	19	20			
Costos de O & M	\$221,519	\$221,519	\$221,519	\$221,519	\$221,519			
Costos de mano de obra	\$430,263	\$430,263	\$430,263	\$430,263	\$430,263			
Total de costos	\$651,782	\$651,782	\$651,782	\$651,782	\$651,782			
Beneficios	\$1,758,349	\$1,758,349	\$1,758,349	\$1,758,349	\$1,758,349			
<b>Flujo neto corregido</b>	\$1,106,568	\$1,106,568	\$1,106,568	\$1,106,568	\$1,106,568			
<b>VP</b>	\$180,505	\$161,165	\$143,898	\$128,480	\$114,714			
<b>Acumulado</b>	\$2,733,015	\$2,894,180	\$3,038,078	\$3,166,558	\$3,281,272			



## Anexo 6: Modelos de contratos de Interconexión

### Contrato de Interconexión para Fuentes de Energía Renovable o Sistema de Cogeneración en Pequeña Escala (CIFER-PE).

Se aplica a personas físicas o morales.



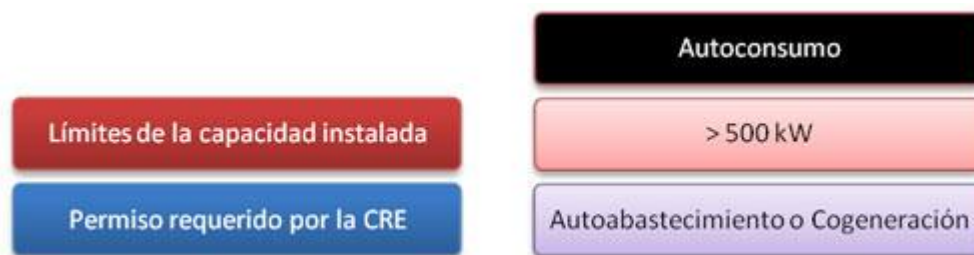
La Capacidad máxima instalada no puede exceder 10 kW para usuarios en tarifas residenciales y 30 kW para aquellos en tarifas generales en baja tensión. Este tipo de contrato no permite portear energía a otros centros de consumo. El contrato entre el generador y la Comisión Federal de Electricidad (Suministrador) tiene vigencia indefinida y no requiere de un permiso de generación de energía eléctrica de la Comisión Reguladora de Energía (CRE), toda vez que es un contrato anexo al de suministro normal. El contrato establece la medición neta (Netmetering) entre la energía eléctrica entregada por el Suministrador al Generador y la energía eléctrica entregada por el Generador al Suministrador.

### Contrato de Interconexión para Fuentes de Energía Renovable o Sistema de Cogeneración en Mediana Escala (CIFER-ME)



La capacidad máxima instalada del Generador no puede exceder 500 kW. El contrato no permite portear energía a otros centros de consumo, tiene una vigencia indefinida y no requiere de un permiso de generación de energía eléctrica de la Comisión Reguladora de Energía (CRE), toda vez que es un contrato anexo al de suministro normal. Si la fuente de energía genera más energía que la demandada por su centro de consumo, ésta podrá ser incorporada a la red eléctrica y será compensada hasta por un periodo de 12 meses.

### Contrato de Interconexión para Fuentes de Energía Renovable o Cogeneración Eficiente (CIFER)



La capacidad mínima instalada debe ser mayor a 500 kW y requiere de un permiso de generación en la modalidad de autoabastecimiento o cogeneración de la CRE.

El permisionario puede optar por el “Banco de Energía” para acumular la energía sobrante para su consumo durante los siguientes 12 meses. (CIFER, Cláusula Décima Quinta, XV.3.ii). Como alternativa la Energía Sobrante del Permisionario en un mes dado para alguno o algunos de los Periodos Horarios, podrá ser vendida al Suministrador en el mismo mes en que se generó, o acumulada para su venta en meses posteriores por 85% del Costo Total de Corto Plazo (CIFER, Cláusula Décima Quinta, XV.3.i).